ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ МЕН ТЕХНИКАСЫ

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ

TORAIGHYROV UNIVERSITY

НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

https://doi.org/10.48081/BGQF2212

Импакт-фактор РИНЦ – 0,216

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – PhD (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:
Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Кажибаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Жунусов Аблай Каиртасович – к.т.н., асс. профессор (доцент) (Павлодар, Казахстан);
Зарубежные члены редакционной коллегии:
Baigang Sun – PhD, профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия)
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).
Чайкин Владимир Андреевич– д.т.н., доцент (Сафоново, Россия);

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Assetuly D., Uderbayeva A. E., Smailova G. A., Nurakhmetova K. K., Kareneyeva Zh. A.
Theoretical and geometrical investigation of spool valve designs.....7
Аукенова Б. Қ., Есеркегенова Б. Ж., Аскерханов Е. Б., Васильков Д. С., Жексембинова Г. Б.
Зависимость изменения горизонтальной составляющей сопротивления копанию от параметров отвала с измененяемой геометрией.....25
Батырбек Ә. Е., Ногаев К. А., Гельманова З. С., Сивякова Г. А.
Численное исследование энергосиловых параметров реза горячекатаной полосы барабанными ножницами с учетом разрушения материала.....42
Джомартов А. А., Тулешов А. К., Абдураимов А. Е., Камал А. Н.
Симулятор землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота.....60
Елеманов Д. С., Роговский В. В., Қалибек Ж. С.
Аралас егіс секциясының жұмыс параметрлері мен режимдерін негіздеу.....75
Елемесов Қ. К., Мырзақұлов М. К., Басқанбаева Д. Ж., Татаева Ж. К., Көлдеев Н. Е.
Кіріс қысымының ауытқуы бар бұрандалы компрессордағы көп компонентті газды сығу процестерін CFD модельдеу.....92
Жаксыбаев Н. А., Абдрахманов Е. С., Таскарина А. Ж., Кулумбаев Н. К.
Исследование и оптимизация режимов работы роторного сепаратора при переработке алюминиевых шлаков.....105
Касенов А. Ж., Луб Т. Л., Мусина Ж. К., Итыбаева Г. Т., Сулейменов А. Д.
Анализ износа и напряжённо-деформированного состояния ротационного безвершинного токарного резца.....120
Kokayeva G. A., Ramazanova Zh. M., Mursalykova M. M., Sarsenkyzy A., Bembenek M.
Analysis and comparative assessment of machine part restoration methods.....137
Кудиярбек Қ. Е., Нугман Е. З., Мустафа А. Қ., Сағынтай М. Қ., Нургожаев Н. Д.
Влияние параметров и защитного газа на микроструктуру стали 308lsi в waam.....152
Меңлен Д. Ж., Шеров А. К., Карсакова Н. Ж., Имашева К. И., Жумагалиев Б. О.
Термофрикциялық кескіш құралдардың тозуға төзімділігін зерттеу.....163

Молдаханов Б. А., Дудкин М. В., Лешневский Т., Яковлев В. С., Байгунусов А. Ж.
Өсімдік шаруашылығы қалдықтарымен жем-шөп қоспаларын араластырғыштың жұмыс процесінің тиімділігін эксперименттік зерттеу.....180
Mukanov R. B., Madeniet H., Oksenenko A., Tokin G.,Vitulyova Ye.
CFD analysis of aerodynamic characteristics of an unmanned aerial vehicle.....199
Рахадилов Б. К., Нәбиолдина А. Б., Алтаев Е. А., Тлеубергенова Г. Т.
Формирование защитных покрытий на основе оксида алюминия методом воздушно-плазменного напыления.....212
Рахметова П. М., Сембаев Н. С., Курмангалиева Л. А., Искаков К. М.
Экспериментальное исследование ROS-ориентированной мехатронной системы автоматизированного захвата призматических объектов.....230
Sulyubayeva L. G., Buiktenov D. B., Baizhan D. R., Berdimuratov N. E., Alibekova B. A.
Tribocorrosion properties of alloy steel boride layers after thermocyclic electrolytic-plasma boriding.....240
Тошов Ж. Б., Шеров К. Т., Маздубай А. В., Қардыбай С., Теміртас Х. Б.
Үшшарошкалы бұрғылау қашауларының тозу себептері мен динамикалық кернеулі-деформациялық күйін зерттеу.....256
Sharatbekov T. T., Absadykov B. N., Askarov E. S.
Main design features and conceptual justification of cam-screw mechanical presses.....271

МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

Абижанова И. К., Абдулина С. А., Буйткенов Д. Б., Рутковска-Горчица М., Кусайнов А. Е.
Роль давлений газов в формировании свойств покрытий нанесённых методом газотермического напыления.....284
Jundibayev M. K., Bilyalov K. S., Kobegen E., Jundibayeva A. S., Mazhit A. A.
Processing of iron-manganese ore to produce rich manganese slag.....300
Zhakan A.
Microstructural features of technogenic raw materials intended Fe-Cr-Mn-Si alloy production.....313
Zhunusov A., Tyulyubayev R., Zhunusova A., Bakirov A., Onuralp Yucel
Large-laboratory smelting of ferrosilicon in an ore-thermal furnace.....325
Исагулов А. З., Махамбетов Е. Н., Сәулебек Ж. Қ., Төлеуқадыр Р. Т., Жумагалиев Е. У.
Исследование физико-химических свойств различного хромового сырья.....336

Куликов В. Ю., Қордашева А. А., Квон Св.С., Ковалев П. В.
Газдандырылатын модельдер әдісімен құю кезіндегі құйма сапасын арттыру үшін инокуляторларды қолдануды зерттеу.....351
Масалимов Р. Б., Сапинов Р. В., Касымова Д. Б., Шошай Ж., Адылканова М. А.
Мыс-молибден кендерін өңдеу технологиясын жетілдіру.....367
Tuyskhan K., Akhmetova G. E., Ulyeva G.A.
Production of silicon carbide by spark plasma sintering.....381
Якушев Н. Е., Сизикова Н. В.
Оценка влияния обработки деградированной органической фазы природными сорбентами на время разделения фаз.....393

КӨЛІК
ТРАНСПОРТ
TRANSPORT

Балабаев О. Т., Аскаров Б. Ш., Қасымжанова А. Д., Суюнбаев Ш. М., Косбармаков С. Ж.
Болат тростардың орналасуын оңтайландыру арқылы резеңкетросты конвейер таспаларының тиімділігін арттыру.....404
Евфратов Д. Ж., Булатов Н. К., Оразов О.Ш.
Повышение ресурса двигателей внутреннего сгорания за счёт использования материалов с улучшенными термостойкими и износостойкими свойствами....414
Zhumashev A., Imangazinova D., Zhetibaeva M., Karimova Zh., Iskakov D.
Theoretical study of the process of gas dinamic cleaning of the wagon body.....426
Ибраимов Т. С., Альтаева Ж. Ж., Сауханов Н. С.
Оценка транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса западного региона Казахстана.....436
Kamzanov N., Asanov B., Tashmuhanbetov A. , Abekova A.
Improving the productivity of the automobile assembly line at through reengineering of process operations.....455
Каукаров А. К., Жаманбаев Б. У., Куанышев М. К., Мурзагалиев А. Ж., Сауханов Н. С.
Іштен жанатын қозғалтқыштардағы поршендік сақиналардың құрылымдық жетілдіру жолдары.....464
Кегенбеков Ж. К., Конгуева А. К., Алипова А. Н., Бердали С., Каниев М. Е.
Роль дата-центричного подхода в обеспечении устойчивости цепочек поставок стратегических минералов.....480
Kizdarbekova M. Zh., Konyrtayeva K. B., Balabekova K. G., Zabiyeva A.B.
Reliability optimization of municipal waste collection vehicles.....497

Токмурзина Н. А., Абдуллаев С. С., Набиев Е. М.,
Сисекенова Е. Н., Аймагамбетова Б. А.
Модель prevention–appraisal–defects как инструмент оценки эффективности системы управления безопасностью железнодорожного перевозчика.....509

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors.....526

Авторларға арналған ережелер
Правила для авторов
Rules for authors.....569

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics.....579

МАШИНА ЖАСАУ

SRSTI 55.03.47

https://doi.org/10.48081/BGQF2213

D. Assetuly[1], *A. E. Uderbayeva[2], G. A. Smailova[3],
K. K. Nurakhmetova[4], Zh. A. Kareneyeva[5]
[1,2,3]K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshbaev,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[5]International Engineering and Technology University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8552-0934
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1641-7404
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2293-6232
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3399-2275
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7197-5380
*e-mail: a.uderbayeva@satbayev.university

THEORETICAL AND GEOMETRICAL INVESTIGATION OF SPOOL VALVE DESIGNS

Hydraulic valves are integral components of hydraulic drive systems, performing the functions of regulating the flow rate and direction of the working fluid. Among them, proportional spool-type directional control valves stand out due to their high control precision and reliability, which ensures their widespread use in both industrial and mobile applications. However, one of the key challenges in their design remains the flow forces generated by the momentum exchange of fluid in the control orifices. These forces can cause undesirable spool deviations, reducing system stability, control accuracy, and energy efficiency.

This study presents a theoretical and geometrical analysis of flow forces in proportional spool valves, aiming to transform them from a disturbing influence into a useful control parameter. A modified spool geometry is proposed that maintains an almost constant flow force throughout the entire stroke range. The effectiveness of the proposed approach is validated through analytical calculations and numerical simulations. The results obtained can be applied in the design of next-generation energy-efficient and high-precision hydraulic systems.

Keywords: Hydraulic valves, flow forces, spool geometry, conceptual design, future CFD study.

Introduction

Hydraulic valves are crucial components of hydraulic systems. Hydraulic valves can be divided into four types as: check valves, directional control, pressure control and flow control valves [1].

Directional proportional spool valves are used to control flow direction and flow rate in hydraulic systems. They are known by a quite reliable durability, balanced dynamic and static performance. The valves consist of a housing and a spool, some of them may contain sleeves in the hosing for easy production and maintenance reasons. Sleeves are usually used in complex proportional valves.

In systems with only one consumer the flow rate can easily be controlled by a flow rate valve, but if the systems consist out of more than one consumer like in the case of mobile machinery it becomes more difficult. Therefore, in the industry different systems have been established [2]. There are for example, an open centre system with a fixed displacement pump as shown in Figure 1. Or a constant pressure system with a variable displacement ump is taken and final example visualizes a load sensing (hereinafter referred to as LS) systems with pressure compensated load sensing valves like shown in Figure 2.

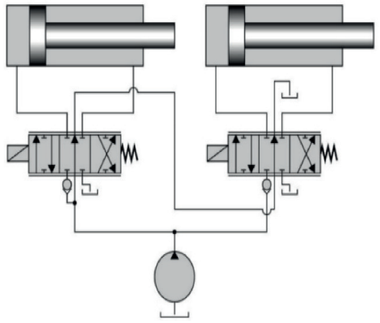


Figure 1 – Open centre valve system with fixed displacement pump

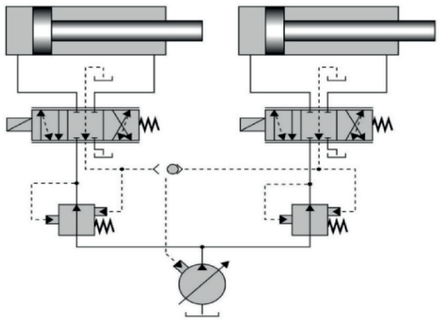


Figure 2 – LS system with pressure compensated valves and a variable displacement pump

Despite the good characteristics like simplicity, robustness and cost efficiency, the open centre system is energy inefficient, and the flow rate of this system is dependent on the spool position and load pressure. However, another constant pressure system with a variable displacement pump is known to possess better controllability than the open centre systems and no load dependence. It needs an additional control or adding an intermediate pressure line to be more energy efficient [3].

Giving these explanations, the load sensing system can be taken as an example with improved energy efficiency among other systems. However, the LS (Figure 2) requires a high-pressure margin set to ensure its operation at all points and this system always should be equipped with a pressure compensator, which leads to flow losses in order to control the pressure drop across the valve [4].

In order to accomplish this idea, a standard geometry of the spool should be modified to achieve almost constant flow forces over the stroke.

Materials and methods

Flow forces were investigated since the 1950s. According to Merritt, the flow forces can be called flow induced, Bernoulli or hydraulic reaction forces [5]. The flow forces occur with momentum exchange when fluid passes through a valve. They can be divided into steady and transient flow forces. The steady state case investigation [6; 7; 8] and transient flow [9; 10; 11; 12] forces can be found analytically, experimentally and by CFD simulations.

There are forces such as spring, viscous and inertia which are disturbing the classical controlling system. The friction and the viscous forces are often negligible comparing to the flow forces. The most important and high affected forces are flow forces. The spool is sliding by the housing guidance, therefore axial flow forces will be considered as main forces. Hence, this work is focused on the steady flow and the transient flow forces are neglected [13].

The directional control valve as depicted in Figure 3 will be considered in this work. The forces acting on the directional control valve can be investigated using control volumes (CV) with so called «meter in» or «metering out» conditions as depicted in the Figure 3.

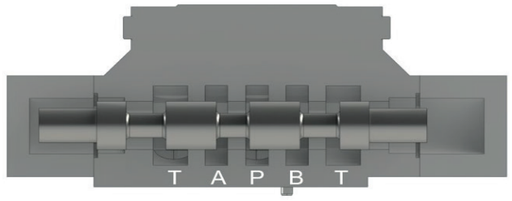
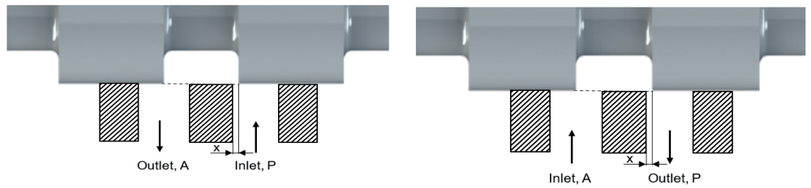


Figure 3 – Simplified directional control valve

These conditions depend on the inlet flow direction and the spool position.



(a) (b)

Figure – 4 (a) metering in (b) metering out position conditions of simplified directional control spool valve

For instance, the Figure 4, shows the «metering in» condition with inlet (port P), outlet (port A) and x.

As can be seen the x is the perpendicular distance between the spool edge and the port. In this work every consideration is based on the the metering in condition Next condition is a «metering out», which is shown in the Figure 4, b with inlet (port A), outlet (port P) and with the same opening x. The metering in condition and opening x will be used for further investigation.

The pressure forces acting on the rings of spool are noted as F_{P1} and F_{P2}. The F_{ax} is an external reaction force, which is actuated to keep the spool in a desired position. The motion of the spool can be explained by Newton's second law as in formula (1) [4].

$$F_I = m \cdot \ddot{x} = \sum F_x = F_{ax} + F_{P1} - F_{P2} - F_{fr} - F_{V1} - F_{V2} \quad (1)$$

Hydraulic fluids can be contaminated with small particles, some of which may be collected between the spool and the housing. These particles can add further friction force while actuating the spool. Moreover, the geometry tolerances of the spool and of the housing can deviate from the ideal shape. All these factors can affect the friction forces as well as to the investigation of the flow forces. Zhang studied this further and came to conclusion that the viscous forces are much smaller than the pressure forces [14]. Therefore, the viscous forces are neglected for this flow florce investigation.

Moreover, different authors used different control volumes. As an example, a model with an outlet vena contracta is taken, along with a rectangular CV model accompanied by an inlet chamber. According to Manring, the CV from Figure 5 is in the metering in condition [10].

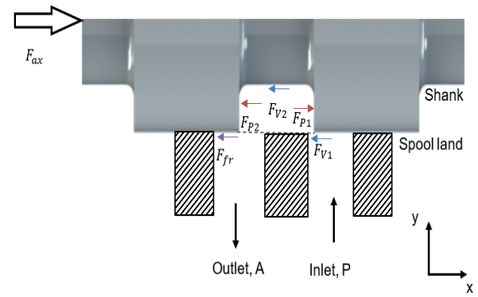


Figure – 5 Enlarged view of the control volume of simplified sharp edged directional control spool valve

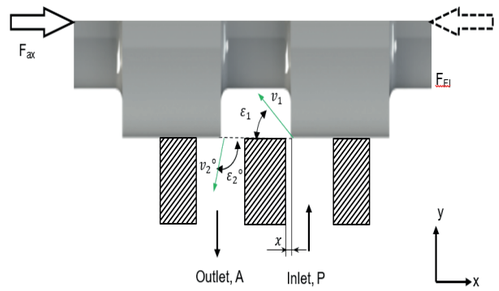


Figure 6 – Control volume for P to A ports

After comparing to other forces, it can be derived that the predominant influence on forces, which are usually acting along the flow closing direction [4]. In the Figure 7, the flow forces act against spool opening and is therefore negative in terms of the coordinate system. The opening x becomes larger or smaller according to the spool movement, allowing the flow passing through the chamber. In this thesis, the opening is between 0,05 mm and 4,25 mm.

As Bordovsky, the surface forces are pressure and viscous forces, which are cut by the control surface. The body forces consist of gravity, Coriolis and centrifugal forces.

Depending on the used model of geometry or CV and the position conditions as metering in or metring out, the inlet and outlet jet angles can differ. Bordovsky used an analytical model introduced by Lee and Blackburn [7], where he implemented a square landed chamber with a vena contracta for the metering out model. The inlet angle was assumed to be 90^o and the cos (ε_1) accordingly can be neglected. As can be seen from the Figure 5, the outlet angle was considered as 69^o.

Merrit investigated the flow forces acting on the spool valves by calculating it with the same and used the model of Lee and Blackburn [5].

He stated that the experimental values of the flow forces were different in comparison to the previously calculated analytical values of flow forces due to the taken coefficients and outlet jet angles.

Tatar considered a metering out rectangular CV [11]. The vena contracta is not taken into account, however the inlet angle was nearly 90° and the outlet jet angle was nearly 69° as can be seen from Figure 8.

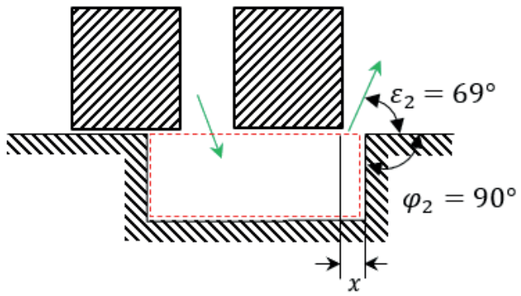


Figure 8 – Control volume of the spool valve considered by Backe and Tatar

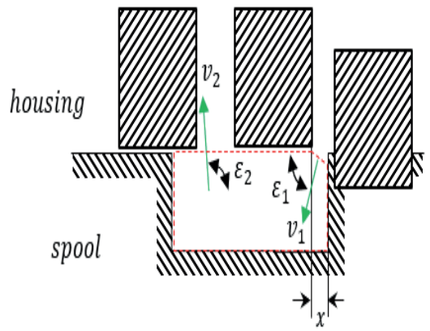


Figure 9 – Control volume by Schmitz

He used the discharge coefficient α_D between 0,6 and 0,8. This CV as shown in Figure 9, where the second metering edge is considered, and the jet angles are not 90°.

According to which CV is used and which metering edges are considered, the formula of the flow forces will change slightly.

For better spool valve performance, the flow force reduction was studied for many years. For example, Bordovsky has investigated different spool geometries as shown in the Figure 9.

One of next investigations was held by Jan Lugowski, where he changed the spool geometry as a turbine bucket as depicted in the Figure 10 [9].

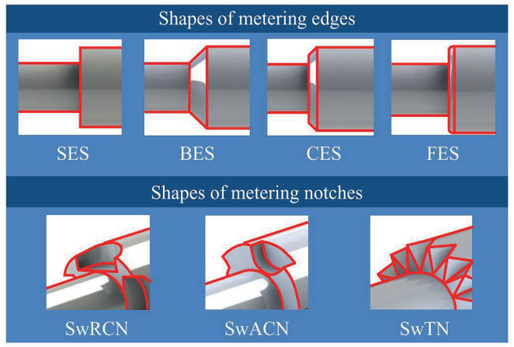


Figure 9 – Simulated spool geometries by Bordovsky

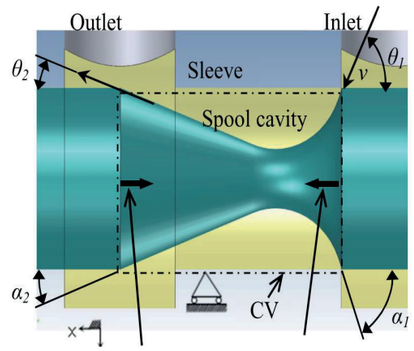


Figure 10 – Spool geometry change as a turbine bucket

He explained the current and a new theory of the flow forces investigation using the pressure curves in different walls of the turbine bucket spool geometry.

The spool model of Lugowski was taken by Daohai and studied further in 2019 [8].

Other researchers came out with various ideas to reduce the flow forces. For example, Herakovic made use of the different angles of the spool to achieve maximal flow force reduction, primarily with a combination of experiments and CFD-simulations [15].

Having simulated the several parameters, he claimed that the best combination for the flow force reduction is when values of α is 60°, β is 15°, γ is 15° and δ is 60° also shown in the Figure 11. However, these combinations worked for only up to the 0.35 mm opening case (only for small openings).

The geometry of the spool and the housing ports will be changed to have increased flow forces over the stroke.

Considering the previous studies on this topic, it can be said that the flow forces should be estimated for each spool geometry individually. The investigations were with various geometry options for the spool and the housing as well. As mentioned above, one of the spool geometry options was the turbine bucket spool geometry of Lugowski

achieved the reduced flow forces, which was proved with the right combination of geometric dimensions by Daohai [8]. This proves that the previous studies are significantly important for the future investigations and the geometry articulation could be changed to have desired results, in this case the increased flow forces are needed.

The flow control for a cylinder can be managed by a simple restrictor or so-called adjustable flow control as shown in the Figure 12 (a). Adding a pressure compensator for a similar system (Figure 12 (a)) can also give a constant pressure drop, which leads to constant velocity of the cylinder of the system.

The pressure difference, and therefore also the adjusted flow rate is depending on the supply pressure and the load pressure, which can be highly changing.

This disadvantage can be avoided by installing a pressure compensator, like in Figure 12 (b). The pressure compensator guarantees a constant pressure difference over the valve and therefore guarantees a load independent flow rate.

Based on this concept a more complex system design has been developed, the so called load sensing system, which is shown in figure Figure 12.

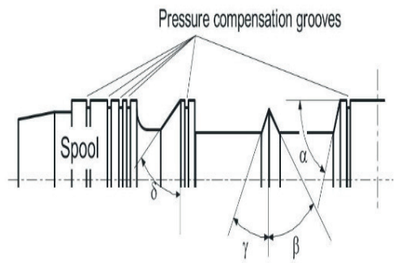


Figure 11 – Valve socket and valve spool

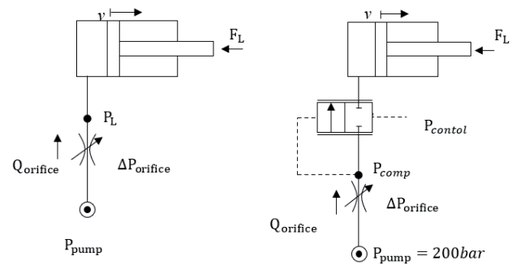


Figure 12 – Model considered by Bashta

Moreover, the speeds of cylinders will deviate according to the load for the system shown in the Figure 12 (a). The systems with the pressure compensator help to be load independent, however leads to high flow losses. In order to solve this issue and the flow control to be independent from the load, the LS control system should be introduced.

This system has the advantage, that the supplied flow rate over each valve is in depend from the load.

If the pressure difference is measured, the flow rate of the system can be controlled as well, without guaranteeing a constant pressure drop over the valve. At the same time they must be able to measure small pressure differences. Which can, depended on the sensor and the pressure difference be quite difficult.

This means with a increased flow force system control could be independent from the pressure difference measurements. As know the flow forces increase in the small opening and after settling the constant flow system, the flow forces decrease hyperbolically as explained above. Therefore, the increase constant flow forces of the stroke is under investigation.

Considering the systems as shown in Figure 13, which consists of a control valve with a constant pump supply and pressure relief valve hydraulic systems can have different operation behavior.

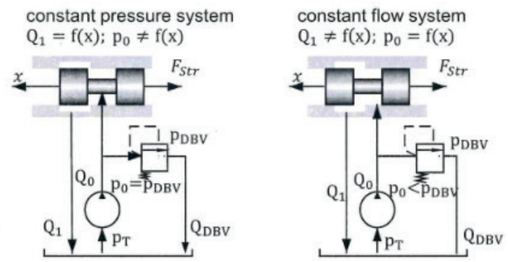


Figure 13 – Steady- state flow forces on the metering edge opening x with a directional control valve

In a small spool opening the pump delivers more flow than needed, extra flow goes to the tank trough the pressure relieve valve and the maximum pressure defined by the pressure relieve valve is reached. This system is called as a constant pressure system. If the valve is in a large opening, the whole delivered flow is used, regardless of the opening or metering area. Therefore, it is called as a constant flow system, since a further opening of the valve would not lead to an increased flow rate [1]. The Figure 14 shows relations of the constant pressure system and constant flow system to the flow force and the flow rates. It can be seen that the maximum flow forces increase as the flow rate increases.

The maximum flow force increases with the stroke and dramatically fall obtaining hyperbolic line when the constant flow system starts. This behaviour takes place if the both metering edges are considered as. However, the Figure 14 shows the flow forces for one metering edge. For both cases the flow forces decrease significantly over the stroke; therefore, it should be stabilized.

Therefore, to create geometry with desired outcomes, the working surfaces of the housing or the spool should be changed such a way to get the increased flow forces.

Depending on the outlet and the inlet jet angles the flow forces can differ significantly. For the metring in condition, flow forces of the inlet metring edge will reach high values if the jet angle is 180° or close to the horizontal line.

The variations of possible geometries or the working surfaces defined by Wallace [14]. He stated that the physical process happens in the working location and the variations of the working surface can be as following: Type, Shape, Position, Size, Number. After determining these variations of working motions should be specified. Which can be as: Type: translation, rotation; Nature: regular, irregular; Direction: x, y, z directions; Magnitude: amount or level of the speed; Number: one, several

According to Wallace, these combinations of these characteristics can serve as a first step of the development of any working structure. Geometries of the spools are defined as a fluid element. For better understanding reason, the taken CV as in Figure 14 is sketched in the Figure 15 and the working surface are shown in green colour and the boundary surfaces in red.

Several geometries of the spool are taken for the P to A ports: 1st geometry is an original spool with 9.5 mm length.

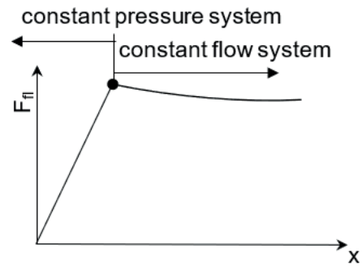


Figure 14 – Desired flow force behaviour

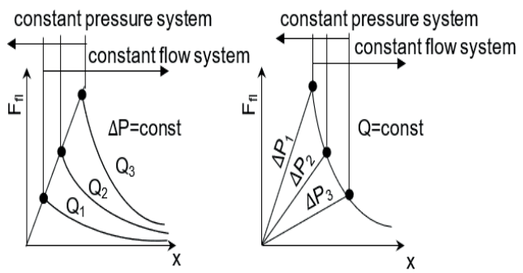


Figure 15 – Flow forces in steady state as a function of the spool stroke x of a directional control valve

1st geometry is an original geometry, and a sketch of this geometry is shown at the Figure 16 (a) with inlet v_1 and outlet v_2 velocities. For that restricted opening the flow forces are predicted to be as Figure 16 (b), because the flow forces depend on x linearly at the beginning and it should increase until the constant flow system presents. Hence, the flow forces for the 2nd geometry should look like Figure 17 (b) compared to the 1st geometry flow forces.

The high increased flow forces in the small opening take place due to the high inlet velocity in the small opening as known by Bernouli law and the outlet metering edge is close to be neglected as the $\cos(\varepsilon_2)$ obtains almost zero values.

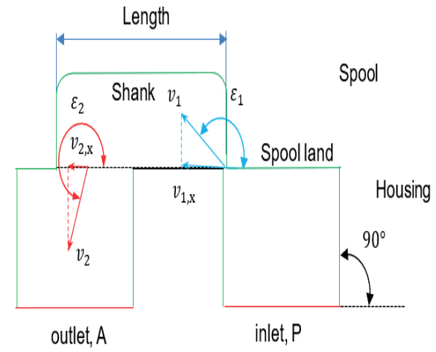


Figure 16 – MSimplified sketch of the original spool with 9.5 mm length

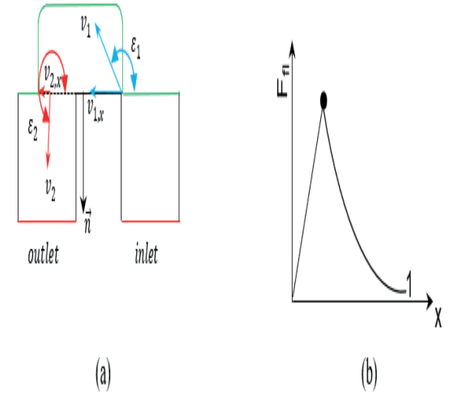


Figure 17 – 1st geometry (9,5 mm spool) in 0,05 mm opening position

As decided above the next (2nd) geometry of the investigation is the same spool length geometry as the 1st spool geometry, but with inclined ports as shown in Figure 18 (a), (b). The flow force results should be smaller to the 1st geometry flow forces, because as mentioned the outlet edge affects negatively and the current geometry has

3 mm larger outlet metering edge compared to the 1st geometry. Therefore, the flow forces should be as Figure 18 (b). Original Spool Geometry

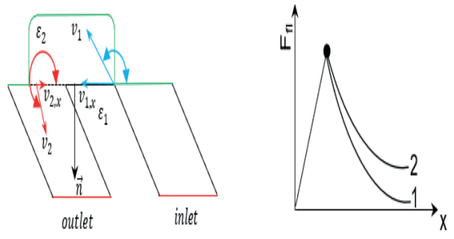
However, to improve the 3rd geometry, the inclined ports are introduced (Figure 18 (a)), which should effect positively on the flow forces.

The formulation of the flow forces for the current geometry looks like following: $v_{1,x} = v_1 \cdot \cos(180° - \varepsilon_1) = -v_1 \cdot \cos(\varepsilon_1)$, where the $\varepsilon_1$is between 90°–180° and with a negative normal vector of the CV the outlet flow forces become $\rho Q v_1 \cos(\varepsilon_1)$. Which means the inlet edge has a positive impact on the flow forces. The outlet jet angle ε_2 is between 270°–360° and using this the axial velocity for second port $-v_{2,x} = v_2 \cdot \cos(360° - \varepsilon_2) = -v_2 \cdot \cos(\varepsilon_2)$ and with a positive normal vector, the flow forces for the outlet edge turns as $-\rho Q v_2 \cos(\varepsilon_2)$.

The flow force investigation will be done by using the Ansys Fluent 2021 R2.

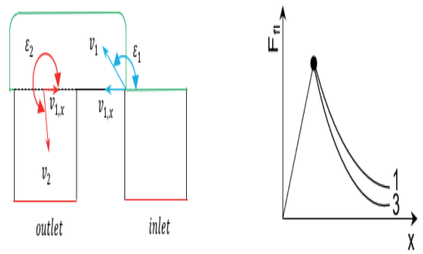
The flow forces are mostly studied for reduction, one of which was by additional and compensatory channels [12], changing the notches and the geometries of the spool [13].

These days CFD simulations are crucial in the investigation of the flow forces.



(a) (b)

Figure 18 – 2nd geometry (9,5 mm spool with inclined ports) in 0,05 mm opening position



(a) (b)

Figure 19 – 3rd spool geometry (12,5 mm spool) in 0,05 mm opening position

This technique is replacing expensive experiments at least in designing stages. The CFD simulation can be analysed by several software, such as ANSYS, COMSOL, StarCCM+ Pumplinx and other specific industrial tools. PumpLinx is used to analyse the static and dynamic forces as well as COMSOL and Ansys CFX Ansys Fluent [15] are widely used in the hydraulic system simulations. As for creating the spool prototype the Ansys Fluent is a perfect tool with less time consuming and the inexpensive approach [1].

Flow force can be investigated in 2D and 3D. Both simulations are studied [8] as well as 3D model [7; 8; 9] was studied by several researches. This study will consider 2D simulation for flow forces acting on the spool.

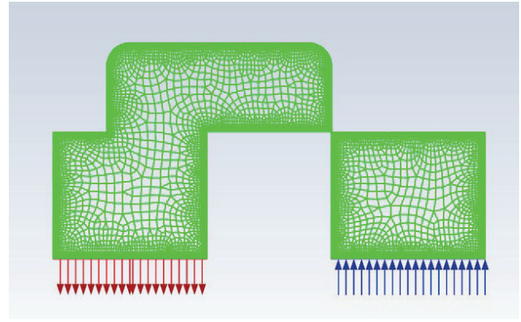


Figure 20 – Mesh of 9.5 mm spool geometry

According to Herakovic, Zong and Afatsun, the most accurate and appropriate result for the flow forces is achieved using the k−ω SST [12;13;15].

Having considered all these studies and Relying on Afatsun, Zong and Herakovic a suitable turbulence model k−ω SST is chosen for this investigation.

As Lisowski stated, the expression force_x ()@ spool can be used in the Ansys Post [11]. The forces on x axial direction is set as the outlet parameter set for all used geometry simulations.

Results and discussion

The flow forces were simulated for different spool geometries. The Figure 21 shows the simulation results of the flow forces acting on the spool over stroke. It might be due to the turbulence flow which took place in the small valve opening and they are hard to simulate in the steady state case with the constant velocity inlet. However, in the large opening cases, the flow forces showed less fluctuation. The flow forces were high in the small openings. As predicted, the flow forces hyperbolically decreased in the large openings due to the outlet metring edge.

The pressure for the inlet port reached to the infinity in the small opening as the constant pressure system is presented and the inlet velocity stayed at 10 m/s as was set in the simulation. However, the outlet velocity reached around 120 m/s value for the small opening case. Therefore, the results fluctuated for the small openings. To avoid this phenomena, the simulation should be done with the inlet constant pressure.

In the 0.05 mm opening, $\varepsilon_1$was simulated between 90_o – 180° and ε_2 was roughly more than 190– 200°. This opening point cannot describe the flow forces due to the turbulence.

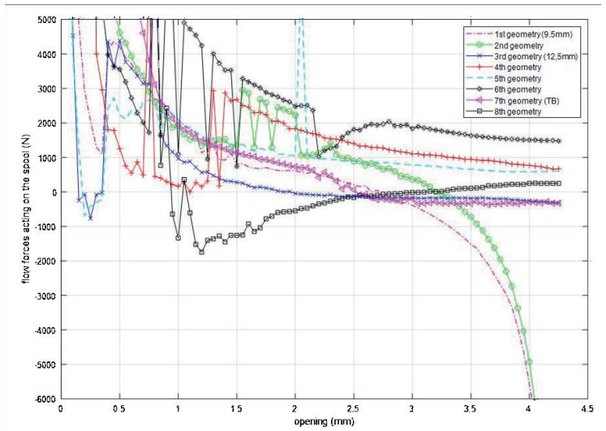


Figure 21 – Simulated flow forces over the stroke

As well as the flow forces, the pressure drops are important to describe the simulation results.

Based on the chosen flow force limits, a flow force range coefficient will be introduced $K_{fl} = \frac{F_{max}}{F_{min}}$, where F_{max} shows a maximum flow forces and F_{min} shows minimum flow forces acting on the spool geometry over the stroke.

The standart deviations and the arithmetical means fro the all geometry flow forces between the 2,5-4,33 mm openings cases are presented in the Table 1.

Table 1 – Flow forces for the 2,5–4,3 mm openings

Geometry	F_{max},N	F_{min}, N	K_{fl}
1	3922	210	18,68
2	3370	904	3.73
3	317	116	2,73
4	1405	668	2.10
5	904	604	1.50
6	1814	1476	1.23
7	327	64	5.11
8	250	162	1.54

The goal of this research is to find a constant flow forces with increased flow forces over the opening. Therefore, the geometry number 5 can be considered as best suited geometry for the given task as the standard deviations showed minimum values,

meaning almost constant flow forces over the stroke and obtained one of the highest values of the flow forces among other geometries.

Simulated geometries should be evaluated to find a suitable geometry for this given task. The 1st geometry shows the worst results for the steady flow forces over the 2,5–4,25 mm spool stroke with 18,68 flow forces coefficient (Table 1).

Considering the advantages and disadvantages of the considered geometries.

Due to the larger outlet metring edge the 12,5 spool geometry has an advantage than the original geometry.

Conclusions

The objective was to derive the geometry with increased flow forces and further development of the 2/2 way directional control valve.

The simulations were conducted to evaluate different spool valve geometry reactions for the flow forces. Using the law of momentum conservation the estimation of the flow forces were obtained. The necessary fluid or simulation quantities were taken relying on the previous scientific works.

The geometry prototype was based on the original spool directional valve, with 50 % (2 times scaled down) scaling down. However, all circumferential grooves and the ports were neglected to consider the spool geometry options deeper than the other variational options.

These simulations were in the steady state, incompressible, isothermal, viscous, two dimensional and the investigation was held in the Ansys Workbench. In the small openings all geometries faced the turbulence flow behaviour. Therefore, predictions were not accurate enough with the simulation results.

Based on the CFD simulation results: Flow forces of the geometries with inclined ports were bigger than the normal ports. The more constant flow forces were in the large openings. The average jet angles depend on flow conditions, flow directions and the valve geometry.

Inlet flow angles for the 9,5 mm spool valve were between 90° and 180° and outlet port received values between 180° and 270°. Regardless the 12,5 spool geometries the inlet jet angles varied 90° and 180°, at the same time the outlet jet angles were between 180° and 270°.

These flow angles depend on flow patterns generated by flow direction. For further development the chamber for the inlet edge is recommended. As investigation material, the industrial oil HLP46 is used.

The analysis predictions of the flow trends were made for all geometries using the CV by Backe and Tatar. As the fundament, the law of momentum conservation is taken.

The flow force investigation highly depend on the discharge coefficients and the accurate flow jet angles. There is still no precise evaluating model even if these values were significant parts of the flow force estimation. Therefore, the CFD simulation will be actual to determine the flow forces rather than using the analytical calculation.

The jet angles cannot be predicted easily, but estimation all influential values would be enough to validate the CFD simulation. To avoid the simulating each stroke position

manually, the other options or lines for the metering edges should be programmed to correspond the opening.

To further come closer to reality and obtain more accurate results, another layer of complexity can be added to simulation - Temperature. A case study can be done to study its influence and whether its addition would add to our confidence in the simulation results.

REFERENCES

1 **Schmitz, K., Murrenhoff, H.** Fundamentals of Fluid Power : Part 1: Hydraulics [Text]. Shaker Verlag GmbH, Germany, 2018. – 388 p.

2 **Backe, W.** Untersuchung des Einflusses von Störkräften auf den Schaltvorgang bei Wegeventilen der Hydraulik [Investigation of the influence of disturbing forces on the switching process in hydraulic directional control valves] [Text]. Springer-Verlag, 2013.

3 **Bashta, T. M.** Mechanical engineering hydraulics [Mashinostroitelnaya gidravlika] [Text]. Ripol Classic, 2013.

4 **Bordovsky, P.** Evaluation of steady-state flow forces in spool valves: Evaluierung stationärer Strömungskräfte in Schieberventilen [Text]. – Shaker Verlag, 2019.

5 **Merritt, H. E.** Hydraulic Control Systems [Text]. – Wiley. New York, 1967.

6 **Fan, Y. L. Fan, Y. L., Lei, Y., Zhang, J. W., Wang, J., Li, Z.** Flow force of pressure independent control valve with different valve core structural [Text]. IOP Publishing – In Journal of Physics : Conference Series, 2020. – Vol. 1634, № 1. – P. 012149.

7 **Gerakovich, N. Dukhovnik, J., Simic, M.** CFD modeling of flow force reduction in hydraulic valves [Text]. In Technical Bulletin/Tekhnichki Vesnik, 2015. – № 22 (2).

8 **Lisowski, E., Filo, G., Rajda, J.** Pressure compensation using flow forces in a multi-section proportional directional control valve [Text] – In Energy Conversion and Management, 2015. – № 103. – P. 1052–1064.

9 **Lugowski, J.** Steady-state flow-force compensation in a hydraulic spool valve [Text]. In arXiv preprint, 2013. – arXiv:1312.1310.

10 **Manring, N. D., Fales, R. C.** Hydraulic control systems [Text]. – N. D. Manring, John Wiley & Sons, 2019.

11 **Tatar, H.** Störkräfte bei elektromagnetisch betätigten Wegeventilen [Disturbing forces in electromagnetically actuated directional valves] [Text]. – Doctoral dissertation, Rheinisch -Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1974.

12 **Afatsun, A. C. Tuna Balkan, R.** A mathematical model for simulation of flow rate and chamber pressures in spool valves [Text] – In Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2019. – № 141(2). – P. 021004.

13 **Zong, C. Zheng, F., Chen, D., Dempster, W., Song, X.** Computational fluid dynamics analysis of the flow force exerted on the disk of a direct-operated pressure safety valve in energy system [Text] – In Journal of Pressure Vessel Technology, 2020. – № 142(1). – P. 011702.

14 **Zhang, S.** Testing the pressure transient flow-force for spool-type two-way valves [Text]. – University of Missouri-Columbia, 2011.

15 **Axin, M.** Mobile working hydraulic system dynamics [Text]. – Linkopings Universitet (Sweden), 2015.

Received 20.10.25.
Received in revised form 09.04.26.
Accepted for publication 20.05.26.

Д. Әсетұлы[1], *А. Е. Удербаева[2], Г. А. Смаилова[3], К. К. Нурахметова[4], Ж. А. Каренеева[5]

[1,2,3]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

[4]Мұхамеджан Тынышбаев атындағы ALT Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

[5]Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

20.10.25 ж. баспаға түсті.
09.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЗОЛОТНИКТІК КЛАПАН ҚҰРЫЛЫМДАРЫН ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Гидравликалық клапандар – жұмыс сұйықтығының ағынын және бағытын реттеу функцияларын орындайтын гидравликалық жетектер жүйесінің ажырамас элементтері болып табылады. Олардың ішінде пропорционалды золотникті тарату клапандары басқару дәлдігі мен сенімділігімен ерекшеленіп, өнеркәсіпте және мобильді техникада кеңінен қолданылады. Алайда, оларды жобалау кезінде негізгі мәселелердің бірі – басқарушы тесіктердегі сұйықтық импульсінің алмасуынан туындайтын ағыс күштері. Бұл күштер золотниктің қажетсіз ауытқуына себеп болып, жүйенің тұрақтылығын, басқару дәлдігін және энергия тиімділігін төмендетуі мүмкін. Осы зерттеуде пропорционалды золотникті клапандардағы ағыс күштері теориялық және геометриялық тұрғыда зерттеліп, оларды бұзушы фактор емес, басқарушы параметр ретінде қолдану мүмкіндігі қарастырылды. Золотниктің қозғалыс диапазонында ағыс күшін тұрақты деңгейде ұстап тұратын модификацияланған геометрия ұсынылды. Ұсынылған тәсілдің тиімділігі аналитикалық есептеулер мен сандық модельдеу арқылы дәлелденді. Алынған нәтижелер жаңа буындағы энергия үнемдейтін және жоғары дәлдіктегі гидравликалық жүйелерді жобалауда қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: гидравликалық клапандар, ағын күштері, сұйықтық импульсі, клапан жобалау, тұрақтылық, энергия тиімділігі, басқарылу, золотник геометриясы, аналитикалық әдістер, CFD-симуляция.

Д. Әсетұлы[1], *А. Е. Удербаева[2], Г. А. Смаилова[3],
К. К. Нурахметова[4], Ж. А. Каренеева[5]
[1,2,3]Казахский национальный технический исследовательский университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]ALT Университет имени Мухамеджана Тынышбаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[5]Международный инженерно-технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 20.10.25.
Поступило с исправлениями 09.04.26.
Принято в печать 20.05.26.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЗОЛОТОНИКОВЫХ КЛАПАНОВ

Гидравлические клапаны представляют собой неотъемлемые элементы гидроприводных систем, выполняющие функции регулирования расхода и направления потока рабочей жидкости. Среди них пропорциональные золотниковые распределительные клапаны отличаются высокой точностью управления и надёжностью, что обеспечивает их широкое применение в промышленности и мобильной технике. Однако при их проектировании одной из ключевых проблем остаются силы потока, возникающие из-за обмена импульсом жидкости в управляющих отверстиях. Эти силы могут вызывать нежелательные отклонения золотника, снижая устойчивость, точность управления и энергетическую эффективность системы. В данной работе выполнено теоретическое и геометрическое исследование сил потока с целью их трансформации из возмущающего воздействия в полезный управляющий параметр, из силы потока в пропорциональных золотниковых клапанах с целью использования их в качестве управляющего параметра, а не возмущающего фактора. Предложена модифицированная геометрия золотника, позволяющая поддерживать практически постоянную силу потока на всём диапазоне его перемещения. Эффективность предложенного подхода подтверждена с использованием аналитических расчётов и численного моделирования. Полученные результаты могут быть применены при проектировании энергоэффективных и высокоточных гидравлических систем нового поколения.

Ключевые слова: гидравлические клапаны, силы потока, импульс жидкости, проектирование клапанов, устойчивость, энергетическая эффективность, управляемость, геометрия золотника, аналитические методы, CFD-моделирование.

МРНТИ 55.57.33
https://doi.org/10.48081/BGQF2214

****Б. Қ. Аукенова[1], Б. Ж. Есеркегенова[2], Е. Б. Аскерханов[3],***
Д. С. Васильков[4], Г. Б. Жексембинова[5]
[1,2,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Назарбаев Университет, Республика Казахстан, г. Астана;
[4]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, г. Москва.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2724-4447
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3719-2582
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5092-4382
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5317-2503
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2540-2948
*e-mail: bekzat89a@mail.ru

ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОПАНИЮ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛА С ИЗМЕНЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Земляные работы являются ключевыми и самыми объемными при строительстве дорог, аэродромов, промышленных площадок. Выполняются они землеройно-транспортными машинами, в том числе и бульдозерами различного тягового класса и отвалами самых разных конструкций. Данная работа посвящена нахождению и совмещению положительных преимуществ разных отвалов, например, сферических и полусферических, расчету их эффективности по какому-либо показателю и экспериментальному подтверждению рациональности этого совмещения. В работе кратко рассмотрено влияние угла установки козырька отвала на поведение стружки грунта и его потери в боковые валики, так как в известных рекомендациях параметры профиля отвала обеспечивают набор и перемещение грунта без участия козырька. В работе сделано предположение, что для уменьшения сил трения грунта по отвалу козырек должен иметь возможность перемены угла своей установки. Также в работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса копания отвалом с изменением в процессе копания углом резания. Исследования, связанные с публикацией, финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан – грант AP22684640 – «Разработка шарнирно-сочлененной конструкции бульдозерного отвала с разноуровневым изменением геометрии».

Ключевые слова: резание грунта, бульдозер, отвал, сферическая форма отвала, призма волочения грунта, силы сопротивления резанию.

Введение

При производстве больших объемов земляных работ 30–35 % их количества выполняются бульдозерами. Причем производительность одних и тех-же бульдозеров на различных грунтах оказывается разной. Объясняется это конструкцией применяемого в каждом конкретном случае их рабочего органа – отвала, который может быть прямым, сферическим или полусферическим, поворотным, выдвижным и т.д., и который по форме своей и геометрическим размерам по разному приспособлен к работе с тем или иным грунтом, а адаптацией к их перемене в процессе работы возможно не обладает. Адаптация отвала к разрабатываемому грунту может выглядеть по разному и требует либо изменения конструкции отвала, либо изменения его формы, либо изменения углов его установки относительно рабочей поверхности, либо и того, и другого, и третьего одновременно. При этом у каждого отвала есть какое-то положительное преимущество перед другими, при работе в каких-то конкретных грунтовых условиях.

Бульдозерное оборудование с разноуровневым изменением геометрии и угла резания [1; 2; 3; 4; 5], а также с гибкой вставкой с изменяемым углом наклона (рисунок 1) в зависимости от режимов работы и физико-математических свойств грунта позволяют улучшить тягово-сцепные качества базовой машины за счет рационального изменения угла наклона результирующей сопротивления копанию и снизить удельную энергоемкость процесса копания, а также уменьшить количество включений системы управления и увеличить рабочую скорость.

Материалы и методы

При работе отвала с разноуровневым изменением геометрии можно изменить ширину отвала или угол резания (рисунок 1,а), а отвал с гибкой вставкой (рисунок 1,б) представляет собой конструкцию отвала, в которой перед заотвальным лобовым листом 1, на котором установлены вертикальные плоские пружины 5, жестко на ноже смонтирована вставка из гибкого металла 2, которая в зависимости от плотности грунта имеет возможность менять свою кривизну по высоте отвала, как показано на рисунке 2, где P – высота отвала, R – кривизна отвала в конкретной зоне, за счет того, что она не закреплена жестко сверху [1]. После завершения копания под действием пружин 5, гибкая вставка 2 возвращается в исходное положение.

Для данных конструкций вызывает интерес оптимизация углов резания на конечном наиболее энергоемком этапе копания, когда происходит перемещение максимального объема призмы волочения с одновременным подрезанием грунта в зависимости от прочностных свойств грунта.

Рисунок 1 – Бульдозерное оборудование: а) с изменяемым углом резания и разноуровневым изменением геометрии; б) с гибкой вставкой

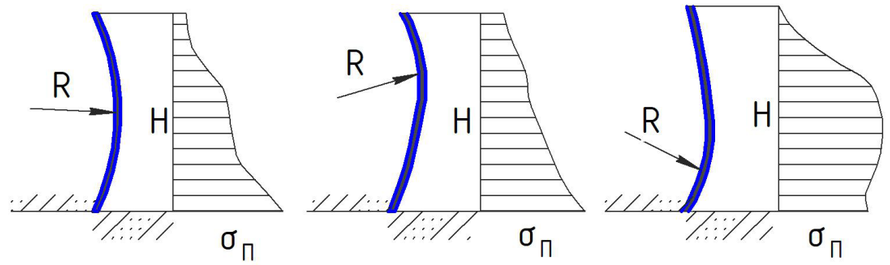


Рисунок 2 – Примеры изменения кривизны отвала по высоте

На основании анализа рабочего процесса копания грунта отвалами бульдозера с разноуровневым изменением геометрии и с гибкой вставкой установлены граничные условия:

$$P_v \to 0; \qquad P_r + P_b \le T$$

где P_v – вертикальная составляющая сопротивления копанию;
P_r – горизонтальная составляющая сопротивления копанию;
P_b – сопротивление перемещению самого бульдозера;
T – максимально возможная тяга бульдозера по сцеплению.

Данное условие характеризует один из режимов работы бульдозера, например, работу отвала в плавающем положении при производстве планировочных работ и перемещении грунта по относительно ровным поверхностям [6]. Отсутствие

вертикальных нагрузок на отвал ($P_v = 0$) позволяет повысить качество планировочных работ и увеличить рабочую скорость, а соблюдение требования $P_r + P_b \leq T$ позволяет определить режим работы, когда тяговые возможности бульдозера используются максимально, а входными параметрами являются свойства грунтов. Например, сцепление, $C\omega$, углы внутреннего и внешнего трения ρ и δ, число ударов специального ударника ДорНИИ $C_{уд}$, а также параметры отвалов бульдозеров тягового класса от30 до 350 кН.

Не стоит также при изменении радиуса кривизны отвала забывать о положении козырька, правильное направление установки которого может продлить движение стружки в виде пласта грунта по отвалу с наименьшим сопротивлением и трением.

Проанализируем влияние угла установки козырька отвала с разноуровневым изменением геометрии или с гибкой вставкой на процесс копания грунта. Известные и рекомендуемые параметры профиля отвала обеспечивают набор и перемещение грунта без участия козырька, как бы забывая о его существовании. Однако при неблагоприятных условиях возможно пересыпание грунта через отвал, поэтому отвалы общего назначения снабжают козырьками с углом их установки 90°, значение которого соответствует наиболее распространенному углу резания $\propto_r = 55^{\circ}$. При работе отвалом с разноуровневым изменением геометрии и с изменяемым в процессе копания углом резания, угол установки козырька может принимать значение $\pm 15^{\circ}$ относительно вертикали [7–9].

Сопротивление копанию отвалом бульдозера с разноуровневым изменением геометрии или с гибкой вставкой определяется явлениями, протекающими при движении вырезанной из массива грунта стружки по всей отвальной поверхности. Расчетная схема движения стружки по криволинейной поверхности скольжения показана на рисунке 3,а.

Ниже линии 00_1 стружка находится в равновесии под действием нормальных напряжений, а выше линии 00_1 нормальное напряжение, действующее со стороны призмы, вызывает сдвиг стружки в сторону козырька отвала. Это приводит к попаданию грунта в пространство между козырьком и поверхностью, касательной к верхней кромке отвала и образованию валика налипшего на козырек грунта.

При дальнейшем движении стружки трение грунта по отвалу вынужденно, за счет налипшего участка, заменяется трением по грунту, создавая при этом дополнительное сопротивление продвижению пласта и увеличивая энергоемкость.

Из схемы сил, действующих на элемент стружки в районе перехода от поверхности скольжения отвала к поверхности козырька (рисунок 3,б), можно получить равенство:

$$dT_1' = dT_1 + \Delta T' \quad (1)$$

где dT_1' – сила трения пласта о грунт валика;
dT_1 – сила трения пласта о поверхность отвала;
ΔT_1 – дополнительная сила трения, препятствующая продвижению пласта.

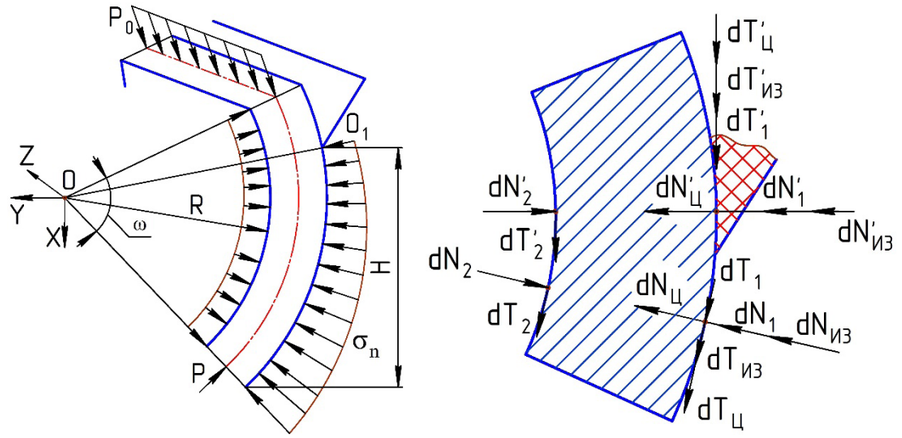


Рисунок 3 – а) Схема движения стружки по криволинейной поверхности скольжения; б) схема сил, действующих на элемент стружки в районе перехода от поверхности скольжения, к поверхности козырька при $\propto_r = 55°$

Величина ΔT_1 направлена (1) сверху вниз и определяется как разница указанных сил трения. Величины dT_1 и dT_1' линейно зависят от силы нормального давления dN_1 и dN_1' и от коэффициентов трения грунта по стали и грунта по грунту. Для устранения дополнительной силы трения рекомендуется у отвалов с изменяемым в процессе копания углом резания козырек выполнять продолжением криволинейной отвальной поверхности или предусмотреть управляемый козырек. При наклоне отвала назад козырек должен изменить угол установки и занять положение касательной к верхней кромке отвала.

Проведем анализ результатов экспериментальных исследований процесса копания отвалом с изменением в процессе копания углом резания.

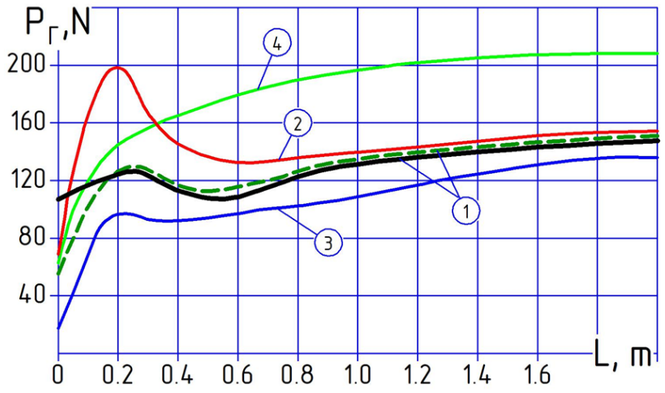
На эффективность работы бульдозера существенную роль оказывает интенсивность возрастания сопротивления копанию А, определяемая зависимостью

$$A = \frac{dP_k}{dS} \quad (2)$$

где
dP_k – приращение сопротивления копанию;
dS – бесконечно малый участок пути копания.

Величина А (2) зависит от следующих факторов: ширины отвала, удельного сопротивления резанию, скоростей опускания и подъема отвала и движения бульдозера, изменения глубины резания, прочностных свойств грунта, углов резания и затупления.

Анализ результатов отдельно проведенных экспериментов (рисунок 4) показывает, что увеличение диапазона изменения угла резания α_P вызывает увеличение интенсивности возрастания сопротивления копанию.



1) $\Delta\alpha_P = 55^0 \rightarrow 40^0$; 2) $\Delta\alpha_P = 65^0 \rightarrow 40^0$; 3) $\Delta\alpha_P = 46^0 \rightarrow 40^0$; 4) $\Delta\alpha_P = 55^0$

Рисунок 4 – Зависимость горизонтальной составляющей сопротивления копанию $P_г$ в функции пути L

Величина P_g растет до определенной величины, затем происходит снижение, особенно интенсивное при изменении угла резания от 64 до 40º, с последующим плавным нарастанием и его стабилизацией при установившемся движении. В начале копания преобладает сопротивление резанию, а по мере набора призмы волочения происходит перераспределение величины P_g за счет увеличения сопротивлений движению стружки по отвальной поверхности и и перемещению призмы волочения, а также пригрузки от массы призмы.

Зависимость отношения средней величины горизонтальной составляющей сопротивления копанию к массе призмы волочения показана на рисунке 5,а. Показатель имеет минимальную величину при изменении угла резания в пределах от 55 до 40º.

Величина показателя P_{gsr}/m_{pr} снижается для диапазонов изменения углов резания 46–40º, 55–40º, 64–40º по сравнению с обычным отвалом, угол резания которого равен α_p=55º=const, соответственно меньше на 31, 30,5 и 24,6 %. Удельная энергоемкость минимальна при изменении угла резания от 46 до 40º (рисунок 5,б).

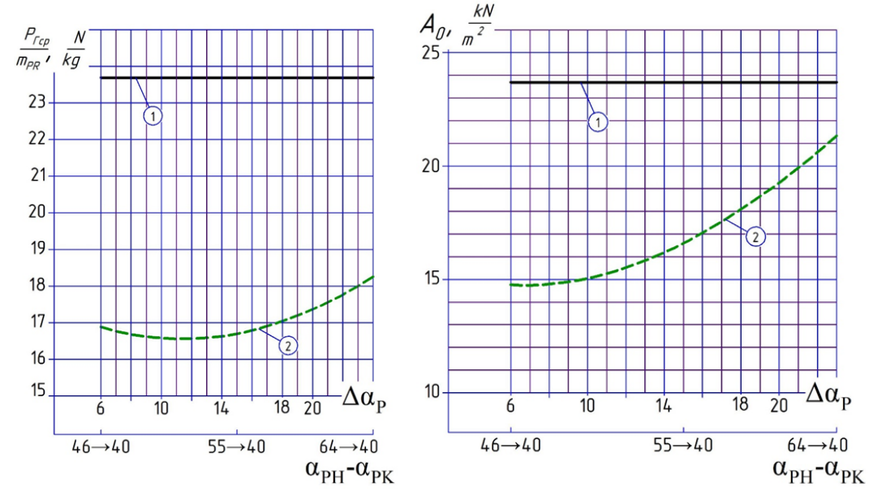


Рисунок 5 – Зависимость показателя $P_{ГСР}/m_{PR}$ и удельной энергоёмкости процесса копания A_0 от диапазона изменения в процессе копания угла резания при h = 0,015 м и СМ = 7 уд: 1) $\alpha_р$ = 55º; 2) $\alpha_р \neq$ const

Учитывая, что процесс заглубления наиболее эффективен при больших значениях угла резания >65º, а также изменение глубины копания в реальных условиях за счет изменения угла резания в процессе копания без подъема отвала, центром плана дальнейших экспериментальных исследований принимаем диапазон изменения угла резания в пределах от 55 до 40º.

Реализация опытов в центре плана позволила получить статистические характеристики показателей процесса копания (таблица 1). Необходимое число повторений в каждом опыте определялось при надежности Р=0,95 исходя из максимальной величины коэффициента вариации $К_{вар}$=9,78 % и составляло n≤3.

Таблица 1 – Статистические характеристики показателей процесса копания

Показатель	Статистические характеристики		
	Математическое ожидание	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
1. Среднее значение горизонтальной составляющей сопротивления копанию , Н	75,21	16,22	5,35
2. Масса потерь грунта в боковые валики m_{bv}, кГ	0,629	0,0038	9,78
3. Энергоемкость процесса копания, $А_0$, кГ/м^2	15,67	1,13	6,78

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований обработаны с помощью методов математической теории планирования эксперимента. Статистическая оценка

значимости коэффициентов математической модели, проверка полученной модели на адекватность производились при уровне значимости α=0,05. Полученные математические модели с вероятностью не менее 95 % описывают рассматриваемые зависимости выходных параметров от исследуемых факторов. Зависимости показателей P_{gsr}, m_{bv}, A_0 составлены для участка копания L=0,4м, где варьировался в процессе копания угол резания:

1) средняя величина горизонтальной составляющей сопротивления копанию грунта, $P_{g.sr}$, Н (рисунок 6):

$$P_{g.sr} = -16{,}56 + 4{,}47h + 7{,}115C_m - 3{,}305(\alpha_{pn} - \alpha_{pk}) - \\ -0{,}26C_m^2 + 0{,}1685(\alpha_{pn} - \alpha_{pk})^2 \quad (3)$$

2) масса потерь грунта в боковые валики, $m_{bv,}$ кГ (рисунок 7):

$$m_{bv} = 0{,}8739 - 0{,}045h - 0{,}0125C_m - 0{,}0343(\alpha_{P\text{н}} - \alpha_{P\text{к}}) + \\ +0{,}0029h^2 + 0{,}016 \cdot (\alpha_{P\text{н}} - \alpha_{P\text{к}})^2 \quad (4)$$

3) удельная энергоемкость процесса резания грунта (без учета потерь грунта в боковые валики), A_0, кН/м^2 (рисунок 8):

$$A_0 = 18.796 - 0.8205 \cdot h + 1.553 \cdot C_M - 1.07 \cdot (\alpha_{P\text{н}} - \alpha_{P\text{к}}) + \\ +0.034 \cdot h^2 + 0.0486 \cdot (\alpha_{P\text{н}} - \alpha_{P\text{к}})^2 - 0.0519 \cdot h - C_M \quad (5)$$

Рост глубины копания с 0,006м до 0,024м для значений диапазона изменения угла резания в процессе копания от 46 до 40º, до 55→40º и 64→40º вызывает увеличение показателя P_{gsr} соответственно на 211,8, 196,3 и 115,8%, а повышение разницы между начальным и конечным значением угла резания от 46→40º до 64→40º для глубины копания 0,006м, 0,015м и 0,024м величина показателя P_{gsr} растет на 82,9 %, 40,27 % и 26,5 % (рисунок 6,а).

Повышение прочности грунта с 1 до 14 уд для диапазона изменения угла резания 46→40º до 55→40º и 64→40º вызывает рост показателя P_{gsr} на 122,8 %, 114,38 % и 69,2 %, а диапазон изменения угла резания $\Delta\alpha_r$ от 46→40º до 64→40º для значений прочности грунта 1 уд, 7уд и 14 уд увеличивает величину показателя P_{gsr} на 77,47 %, 40,27 % и 34,7 % (рисунок 6,б).

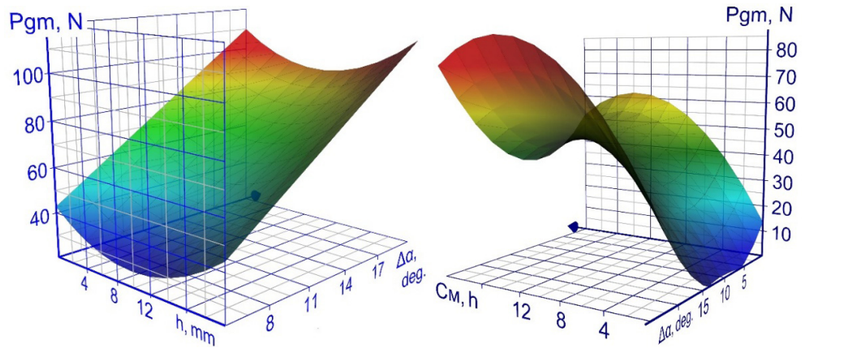


Рисунок 6 – Зависимость средней величины горизонтальной составляющей сопротивления копанию: а) от диапазона изменения в процессе копания угла резания α_r и глубины копания h при $C_м$= 7 уд; б) от диапазона изменения в процессе копания угла резания α_r и прочности грунта $C_м$ при h=0,015м

При значении диапазона изменения угла резания свыше 15º (55º→40º) наблюдается повышение потерь грунта в боковые валики для всех исследуемых величин глубины копания h и $C_м$ (рисунок 7 а, б).

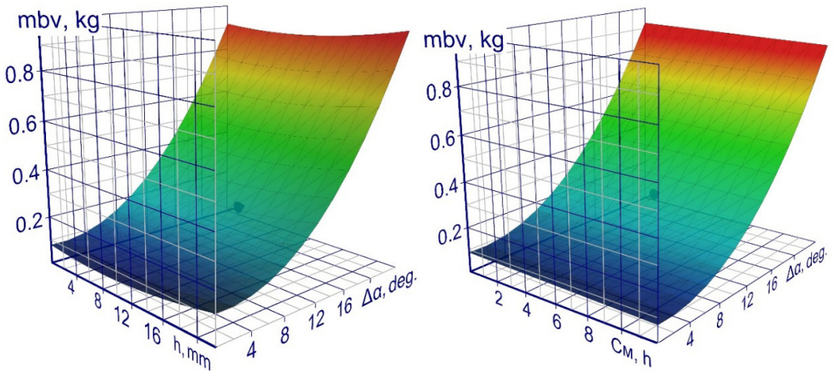


Рисунок 7 – Зависимость массы потерь грунта в боковые валики: а) от диапазона изменения в процессе копания угла резания α_r и глубины копания h при $C_м$= 7 уд; б) от изменения угла резания α_r в процессе копания и прочности грунта $C_м$ при h=0,015м

Энергоемкость A_0 процесса копания интенсивно растет с увеличением диапазона изменения угла резания (рисунок 8 а,б) свыше 15º (55º→40º). Так, при глубине копания h=0,015 м и прочности грунта $C_м$=7 ударов для диапазонов изменения угла резания в процессе копания от 46→40º и 55→40º величина показателя A_0 изменяется на 5 %, а для диапазонов 20º (60º→40º) и 24º (64º→40º) соответственно на 28,4 и 54,3 %.

Рост прочности грунта См от 1 до 14 уд вызывает линейное увеличение удельной энергоемкости для диапазонов изменения угла резания с 6º (46º→40º) до 24º (64º→40º) для значений прочности грунта 1 уд, 7 уд и 14 уд – на 69,6%, 44,8 % и 33 %, так как при этом доминируют силы сопротивления резанию.

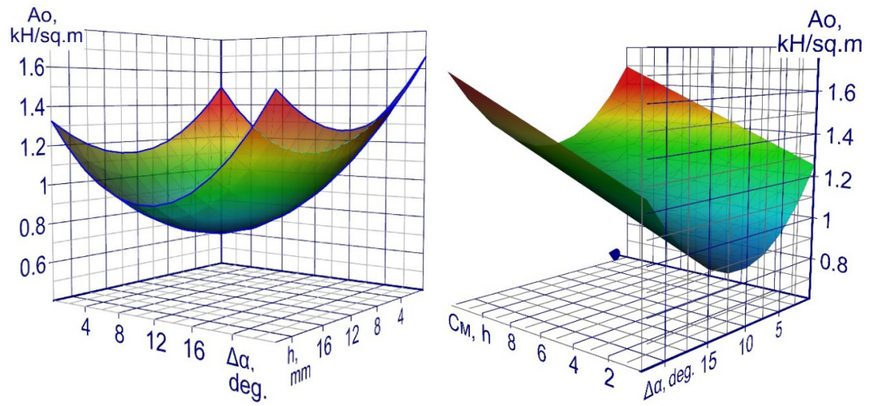


Рисунок 8 – Зависимость энергоемкости:
а) – от диапазона изменения в процессе копания угла резания и глубины копания h при $С_м$= 7 уд; б) – от диапазона изменения в процессе копания угла резания и прочности грунта $С_м$ при h=0,015м

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований по выявлению сравнительной эффективности применения бульдозерного оборудования с изменяемым углом резания и кривизной отвальной поверхности в различных грунтовых условиях.

Важнейшим этапом экспериментальных исследований является определение области рационального применения предложенных конструкций отвалов в зависимости от грунтовых условий, при которых они работают наиболее эффективно [10]. Зависимость энергоемкости от глубины копания для трех вариантов конструкции отвалов представлена на рисунке 9.

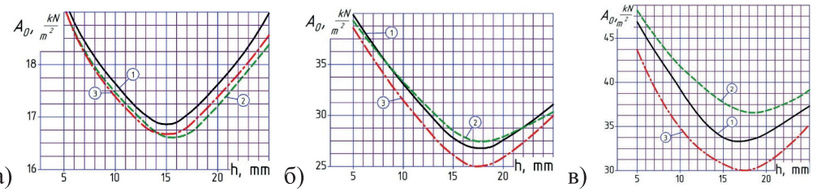


Рисунок 9 – Зависимость энергоёмкости копания грунтов а) песка; б) среднего суглинка; в) суглинка прочного от глубины копания; 1 – обычный отвал $\alpha_Р$ = 550; 2 – с изменяемым углом резания от 400 до 600; 3 – с изменяемым углом резания от 600 до 400

При копании сухого песка $С_м$=1 уд, = 0% (рисунок 9,а) указанными отвалами подъем грунта по отвалу не наблюдался и стружка не образовывалась. Визуальное наблюдение и анализ кривых показывает, что процесс копания сухого песка качественно и количественно одинаковы для обычного отвала $\alpha_р$ =55º и отвалов с изменением угла резания от 40º до 60º и от 60º до 40º. Энергоемкость принимает минимальные значения при h=0,013-0,015 м.

При копании среднего суглинка $С_м$=7уд, =7 % отмечено движение стружки по отвальной поверхности. У отвала с изменяемым углом резания в процессе копания от 60º до 40º наблюдался подъем стружки грунта на большую высоту, чем у обычного отвала с $\alpha_р$ =55º и отвала с изменяемым углом резания от 40º до 60º (рисунок 9,б). Рациональное значение глубины копания смещается в большую сторону и равно h=0,016–0,017м.

Энергоемкость у отвала с изменяемым углом резания от 40º до 60º на 2 % чем у обычного отвала с $\alpha_р$ = 55º, а у отвала с изменяемым углом резания от 60º до 40º меньше на 6 %, чем у обычного отвала с = 55º. У отвала с изменяемым углом резания от 40º до 60º кривизна отвальной поверхности перемещается при этом снизу вверх, что вызывает снижение высоты призмы волочения до высоты отвала и увеличение потерь грунта в боковые валики.

Анализ зависимостей энергоемкости копания прочного суглинка См=14 уд, =7 % (рисунок 9, в) показал, что характер качественно аналогичен соответствующим зависимостям, полученным для среднего суглинка. Энергоемкость копания прочных грунтов по сравнению с обычным отвалом с $\alpha_р$ =55º отвалами с изменяемым углом резания от 40º до 60º и от 60º до 40º соответственно больше на 8,1 % и меньше на 11,1 %. Снижение энергоемкости обусловлено тем, что по мере набора призмы волочения происходит увеличение сопротивления перемещению грунта и одновременно угол резания изменяется в меньшую сторону, что в свою очередь снижает сопротивление резанию и благоприятствует продвижению стружки грунта по отвальной поверхности.

Характер протекания процесса взаимодействия с грунтом отвала с поворотной отвальной поверхностью при крайних ее положениях снят черно-белой скоростной камерой HSc [11], и показан на рисунке 10. Копание связного грунта $С_м$=7 уд, =6–7 % при крайнем заднем положении (рисунок 10,а) отвальной поверхности сопровождается повышением энергоемкости. Это обусловлено тем, что стружка вначале движется по отвальной поверхности, а затем, по мере наполнения грунта под криволинейной поверхностью, происходит его уплотнение и стружка, меняя направление, фонтанирует через призму волочения.

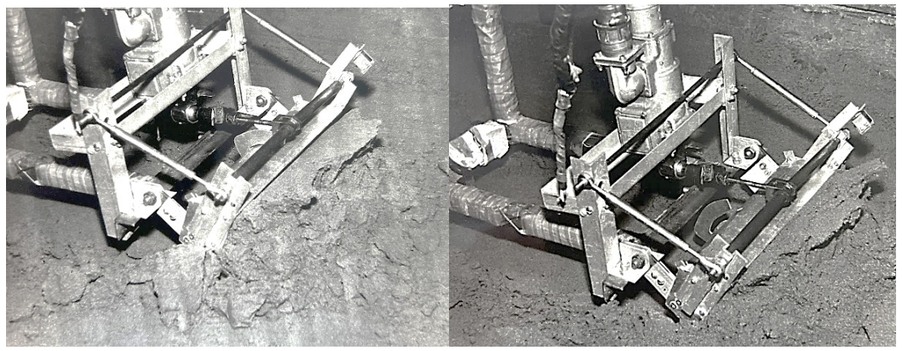


Рисунок 10 – Характер протекания процесса взаимодействия с грунтом отвала с поворотной отвальной поверхностью при крайних ее положениях: а) крайнее переднее положение; б) крайнее заднее положение

Разработка сыпучего грунта $С_м$<3 уд отвалом с поворотной отвальной поверхностью при крайнем заднем ее положении по сравнению с обычным отвалом при равных углах резания α_p = 55º дает увеличение массы призмы волочения до 30%. При разработке связных грунтов $С_м$=7уд, =6–7 % процесс набора призмы волочения целесообразно производить при крайнем переднем положении отвальной поверхности, а при перемещении грунта – при крайнем заднем положении отвальной поверхности. При работе на 2–3-й передачах угол резания режущего ножа равен α_p = 70º, гидроцилиндры подъема и опускания отвала должны быть в плавающем положении, при этом объем призмы волочения по сравнению с обычным отвалом при α_p > 70º повышается на 27 %. Кроме того, уменьшается число включений системы управления из-за отсутствия эффекта самозатягивания отвала, что соответственно повышает производительность.

На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов копания отвалами с изменяемым углом резания и кривизной отвальной поверхности разработана методика определения основных параметров и режимов работы бульдозерного оборудования с изменяемым в процессе копания углом резания.

Информация о финансировании

Исследования, связанные с публикацией, финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК - грант AP22684640 – «Разработка шарнирно-снформацияочлененной конструкции бульдозерного отвала с разноуровневым изменением геометрии».

Выводы

Полученные экспериментальные данные позволяют произвести оценку влияния угла резания и физико-механических свойств грунтов соответственно на объем и сопротивление перемещению призмы волочения грунта и могут быть использованы для расчета производительности и тягового расчета бульдозера с изменяемым углом резания.

Выявленные закономерности позволяют оптимизировать угол наклона результирующей сопротивления копанию в зависимости от геометрических размеров рабочего оборудования, свойств грунта и координаты центра движения бульдозера на грунт.

Для отвалов бульдозеров с разноуровневым изменением геометрии и изменяемым в процессе копания углом резания козырек целесообразно выполнять продолжением криволинейной отвальной поверхности или предусмотреть его управляемым, не изменяя общей высоты отвала.

Для проверки корректности принятых допущений, достоверности аналитических зависимостей и обоснования рациональных углов резания и диапазона их изменения в процессе копания, а также областей их применения необходимо проведение полных экспериментальных исследований процесса копания грунта отвалами с изменяемым в процессе копания углом резания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Aukenova, B., Doudkin, M., Kim, A., Moldakhanov, B., Kabdullina, D., Varavin, Y.** Computational Framework for Geometric Optimization of Bulldozer Blade With Multi-Level Side Section Rotation. IEEEAccess. Volume 13, 2025. – P. 206181–206197. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3638809

2 **Аукенова, Б. Қ., Молдаханов, Б. А., Дудкин, М. В.** Бульдозерлі қайырмамен қазуға қарсылық күшіне әсер ететін кесу және ұстау бұрыштарын анықтау. Қазақстан ғылымы мен техникасы. – № 3. – 2024. – С. 6–17.

3 **Dudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., Andryukhov, N.** Experimental Studies on the Interaction Process with the Environment of an Adaptable Bulldozer Blade with Variable Geometry. International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.), Vol. 15. – N. 11. – 2021. – P. 554–565. – https://doi.org/10.15866/ireme.v15i11.21756

4 **Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., Andryukhov, N.** Theoretical investigations of the process of interaction with the environment of a bulldozer bladow with variable geometry. Journal of Applied Engineering Science. – Vol. 20. – № 3. – 2022. – 986. – P. 798–807. – https://doi.org/10.5937/jaes0-37210

5 **Аукенова, Б. Қ.** Обоснование параметров и разработка конструкции отвала с изменяемой геометрией для бульдозера-террасера: Дис. PhD. – Алматы. : КазНИТУ, 2024. – 155 с.

6 **Сурашов, Н. Т., Асматулаев, Р. Б., Толымбек, Д. Н.** Определение рациональной формы отвала бульдозера с учетом грунтового фона Республики Казахстан. Вестник СибАДИ. – Том 18. – № 6. – 2021. – Омск–: СибАДИ. – 2021. – С. 662–677.

7 **Карасев, Г. Н., Доценко, А. И., Кустарев, Г. В.** «Машины для земляных работ». – М. : Бастет. – 2012. – 688 с.

8 **Бабаев, Т. К.** Обоснование рациональных параметров и разработка конструкции дополнительного бокового отвала, расположенного вне опорной плоскости гусеничного бульдозера. Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 – дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины: – М : МАДИ, 2021. – 159 с.

9 **Сурашов, Н. Т., Асматулаев, Р. Б., Толымбек, Д. Н.** Определение оптимальных конструктивных параметров отвала бульдозера. Вестник СибАДИ, Том 19. – № 4. – 2022. – Омск: СибАДИ. – 2022. – С. 500–513.

10 **Баловнев, В. И.** Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты–: учеб. пособие/ В. И. Баловнев. – М. : МАДИ, 2014. – 180 с.

REFERENCES

1 **Aukenova, B., Doudkin, M., Kim, A., Moldakhanov, B., Kabdullina, D., Varavin, Y.** Computational Framework for Geometric Optimization of Bulldozer Blade With Multi-Level Side Section Rotation. IEEEAccess. Volume 13, 2025. – P. 206181–206197. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3638809

2 **Aukenova, B. K., Moldakhanov, B. A., Dudkin, M. V.** Determination cutting and grip angles affecting force of digging resistance with bulldozer blade. Science and technology of Kazakhstan. – № 3. – 2024. – P. 6–17.

3 **Dudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., Andryukhov, N.** Experimental Studies on the Interaction Process with the Environment of an Adaptable Bulldozer Blade with Variable Geometry. International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.), Vol. 15. – N. 11. – 2021. – P. 554–565. – https://doi.org/10.15866/ireme.v15i11.21756

4 **Doudkin, M., Kim, A., Aukenova, B., Radenkov, R., Saveliev, A., Andryukhov, N.** Theoretical investigations of the process of interaction with the environment of a bulldozer bladow with variable geometry. Journal of Applied Engineering Science. – Vol. 20. – № 3. – 2022. – 986. – P. 798–807. – https://doi.org/10.5937/jaes0-37210

5 **Aukenova, B. K.** Obosnovaniye parametrov i razrabotka konstruktsii otvala s izmenyayemoy geometriyey dlya bul'dozera-terrasera [Substantiation of parameters and design development of a blade with variable geometry for a bulldozer-terraser]: PhD thesis. Almaty : KazNITU, 2024. – 155 p.

6 **Surashov, N. T., Asmatulaev, R. B., Tolymbek, D. N.** Opredeleniye ratsional'noy formy otvala bul'dozera s uchetom gruntovogo fona Respubliki Kazakhstan [Determination of the rational shape of a bulldozer blade taking into account the soil background of the Republic of Kazakhstan]. SibADI Bulletin, Volume 18. – № 6. – 2021. – Omsk : SibADI, 2021. – P. 662–677.

7 **Karasev, G. N., Dotsenko, A. I., Kustarev, G. V.** «Mashiny dlya zemlyanykh rabot» [«Machines for earthworks»], Moscow: Bastet, 2012. – 688 p.

8 **Babaev, T. K.** Obosnovaniye ratsional'nykh parametrov i razrabotka konstruktsii dopolnitel'nogo bokovogo otvala, raspolozhennogo vne opornoy ploskosti gusenichnogo bul'dozera [Justification of rational parameters and design development of an additional side dump located outside the reference plane of a tracked bulldozer]. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.05.04 – dorozhnyye, stroitel'nyye i pod"yomno-transportnyye mashiny: – M : MADI, 2021. – 159 p.

9 **Surashov, N. T., Asmatulaev, R. B., Tolymbek, D. N.** Opredeleniye optimal'nykh konstruktivnykh parametrov otvala bul'dozera [Determination of optimal design parameters of a bulldozer blade]. SibADI Bulletin, Volume 19. – № 4. – 2022. – Omsk: SibADI, 2022. – P. 500–513.

10 **Balovnev, V. I.** Opredeleniye optimal'nykh parametrov i vybor dorozhno-stroitel'nykh mashin metodom analiza chetvertoy koordinaty [Determination of optimal parameters and selection of road construction machines by analyzing the fourth coordinate]: textbook. manual / V. I. Balovnev. – M. : MADI, 2014. – 180 p.

Поступило в редакцию 02.02.26.
Поступило с исправлениями 12.02.26.
Принято в печать 12.02.26.

Б. Қ. Аукенова[1], Б. Ж. Есеркегенова[2], Е. Б. Әскерханов[3], Д. С. Васильков[4], Г. Б. Жексембинова[5]
[1,2,5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Назарбаев Университет, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[4]Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университеті, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.
02.02.26 ж. баспаға түсті.
12.12.26 ж. түзетулерімен түсті.
12.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӨЗГЕРМЕЛІ ГЕОМЕТРИЯСЫ БАР ҚАЙЫРМАНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНЕ БАЙЛАНЫСТЫ ҚАЗУҒА КЕДЕРГІ КҮШІНІҢ КӨЛДЕНЕҢ ҚҰРАМДАС БӨЛІГІНІҢ ӨЗГЕРУ ТӘУЕЛДІЛІГІ

Жер жұмыстары жол, аэродром және өнеркәсіптік алаңдар құрылысындағы негізгі және ең ауқымды кезең болып табылады. Бұл

жұмыстарды әртүрлі тарту класындағы және конструкциясы сан алуан қайырмалармен жабдықталған жер қазу-көлік машиналары, соның ішінде бульдозерлер орындайды. Аталған жұмыс әртүрлі қайырмалардың (мысалы, сфералық және жартылай сфералық) артықшылықтарын анықтау мен біріктіруге, олардың тиімділігін белгілі бір көрсеткіш бойынша есептеуге және осы біріктірудің ұтымдылығын эксперименттік тұрғыдан дәлелдеуге арналған. Жұмыста қайырма күнқағарының орнату бұрышының топырақ жоңқасының қозғалысына және оның бүйірлік үйінділерге ысырап болуына әсері қысқаша қарастырылған, себебі белгілі ұсынымдарда қайырма профилінің параметрлері топырақты күнқағардың қатысуынсыз жинауды және жылжытуды қамтамасыз етеді. Жұмыста топырақтың қайырма бойымен үйкеліс күшін азайту үшін күнқағардың орнату бұрышын өзгерту мүмкіндігі болуы керек деген болжам жасалған. Сондай-ақ, жұмыста қазу процесінде кесу бұрышы өзгеретін қайырмамен қазу процесін эксперименттік зерттеу нәтижелері берілген. Жарияланымға байланысты зерттеулерді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетімен AP22684640 – «Көп деңгейлі геометриялық өзгерісі бар бульдозер қайырмасының топсалы-буындасқан құрылымын әзірлеу» гранты бойынша қаржыландырылады.

Кілтті сөздер: Топырақты кесу, бульдозер, қайырма, қайырманың сфералық формасы, топырақтың сүйреу призмасы, кесуге қарсылық күштері.

B. K. Aukenova[1], B. Zh. Eserkegenova[2],
Y. E. Askerkhanov[3], D. S. Vasilkov[4], G. B. Zheksembinova[5]
[1,2,5]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Nazarbayev University, Republic of Kazakhstan, Astana;
[4]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
Russian Federation, Moscow.
Received 02.02.26.
Received in revised form 02.02.26.
Accepted for publication 12.02.26.

DEPENDENCE OF THE CHANGE IN THE HORIZONTAL COMPONENT OF THE DIGGING RESISTANCE ON THE PARAMETERS OF THE BLADE WITH VARIABLE GEOMETRY

Earthworks are key and the most extensive operations in the construction of roads, airfields, and industrial sites. They are performed by earthmoving machines, including bulldozers of various traction classes and blades of various designs. This work is devoted to finding and combining the advantages of different blades, such as spherical and semi-spherical, calculating their efficiency according to specific indicators, and experimentally confirming the rationality of this combination. The paper briefly considers the influence of the blade visor angle on the behavior of the soil chip and its loss into side rollers, since in known recommendations the blade profile parameters ensure soil collection and movement without the visor's involvement. The study hypothesizes that to reduce the friction forces of the soil against the blade, the visor should have the capability to change its installation angle. The paper also presents the results of experimental studies of the digging process with a blade that changes its cutting angle during operation. The research related to the publication is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan - grant AP22684640 – «Development of an articulated design of a bulldozer blade with a multi-level geometry change».

Keywords: soil cutting, bulldozer, blade, spherical blade shape, soil drag prism, cutting resistance forces.

МРНТИ 55.35.99

https://doi.org/10.48081/BGQF2215

Ә. Е. Батырбек[1], *К. А. Ногаев[2], З. С. Гельманова[3], Г. А. Сивякова[4]

[1,2,3,4]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3369-6804
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1332-6352
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9052-9490
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7689-8433
*e-mail: k.nogayev@tttu.edu.kz

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ БАРАБАННЫМИ НОЖНИЦАМИ С УЧЕТОМ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА

В статье представлено конечно-элементное исследование процесса реза горячекатаной полосы барабанными ножницами с целью определения энергосиловых параметров, необходимых для оценки нагруженности рабочих органов и электроприводов оборудования. Актуальность исследования обусловлена существенно нестационарным и нелинейным характером процесса реза горячей полосы, при котором усилие реза и крутящий момент определяются кинематикой инструмента, геометрией полосы, температурными условиями, контактным взаимодействием и разрушением материала. Трехмерная численная модель была разработана в программном комплексе DEFORM-3D с использованием стали DIN-C45 из библиотеки материалов. Контактное взаимодействие между ножами и полосой описывалось законом трения Зибеля. Для описания разрушения материала применен критерий вязкого разрушения Ояне (Oyane). В предполагаемой зоне разрушения было выполнено локальное уплотнение сетки для повышения точности описания локализации пластической деформации, накопления поврежденности и развития трещины. Результаты моделирования показали, что процесс реза характеризуется кратковременным импульсным характером нагружения, сопровождающимся быстрым увеличением и последующим снижением усилия реза и крутящего момента на барабанах. Установлено, что максимальные значения усилия и крутящего момента не совпадают по времени, что объясняется изменением плеча приложения контактной силы в процессе вращения барабанов. Полученные временные зависимости нагрузок могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки барабанов, валов, редукторов и электроприводов, а также для разработки стратегий управления, направленных на стабилизацию скорости и момента в наиболее нагруженной фазе цикла реза.

Ключевые слова: барабанные ножницы; горячекатаная полоса; конечно-элементное моделирование; DEFORM-3D; усилие реза; крутящий момент; разрушение материала; нагружение электропривода.

Введение

Определение энергосиловых параметров технологического процесса является одним из ключевых этапов исследования нагрузочных характеристик электроприводов металлургического оборудования. В условиях прокатного производства фактический режим работы привода определяется не только кинематическими параметрами машины, но и характером взаимодействия рабочего инструмента с обрабатываемым металлом. Усилие деформирования, крутящий момент и потребляемая мощность определяют уровень механической нагрузки, передаваемой на валы, редукторы, муфты и двигатель, а также влияют на величину тока, перегрузочную способность и динамическую устойчивость приводной системы [1; 2].

Современные исследования показывают, что прогнозирование силы прокатки и крутящего момента повышает точность описания технологического процесса, а учет моторных нагрузок по клетям может использоваться для балансировки нагрузки, повышения производительности и снижения эксплуатационных затрат [1; 3]. Анализ изменения нагрузочного момента и скорости двигателя во времени позволяет более корректно оценивать электрические переменные привода в реальных условиях работы металлургического агрегата [2]. Поэтому определение энергосиловых параметров следует рассматривать как необходимую расчетно-аналитическую основу для моделирования и оптимизации приводных систем металлургического оборудования.

Особое значение данная задача приобретает для летучих ножниц прокатного производства. В отличие от оборудования с относительно установившимся характером нагружения, летучие ножницы работают в высокодинамичном циклическом режиме. Фаза реза сопровождается кратковременным импульсным возрастанием момента сопротивления, которое вызывает колебания скорости, перераспределение нагрузки между элементами механической передачи и увеличение длительности переходных процессов [4; 5; 6]. Поэтому при анализе и настройке электропривода необходимо учитывать не только максимальное значение усилия или крутящего момента, но и характер их изменения во времени.

Энергосиловые параметры процесса реза определяются совокупностью геометрических, кинематических и физико-механических факторов. К ним относятся размеры полосы, температура металла, сопротивление деформации, условия разрушения, глубина внедрения ножей, длина активной линии реза, межножевой зазор, скорость инструмента и характер относительного движения ножей и заготовки. Изменение указанных параметров непосредственно влияет на усилие реза, крутящий момент, мощность и ток двигателя [4; 5; 6].

Достоверное определение нагрузочных параметров осложняется существенно нелинейным и нестационарным характером процесса. В зоне взаимодействия ножей с металлом последовательно развиваются вдавливание режущих кромок, интенсивное пластическое течение, локализация деформации, накопление поврежденности, зарождение трещины и окончательное разделение материала.

При этом площадь контакта, напряженно-деформированное состояние и условия разрушения изменяются во времени.

Особую сложность представляет описание стадии фактического разделения металла. В отличие от процессов формоизменения без нарушения сплошности, при резе необходимо моделировать переход от пластического течения к разрушению, включая накопление поврежденности, локальное перераспределение напряжений и образование новых свободных поверхностей. Исследования процессов вырубки и сдвигового резания показывают, что достоверность расчета определяется корректным выбором критерия вязкого разрушения, межножевого зазора и процедуры удаления или деградации конечных элементов после достижения критического значения поврежденности [7; 8; 9; 10; 11].

Существенное влияние на результаты моделирования оказывает межножевой зазор. Его изменение влияет на форму кривой усилия, распределение пластической деформации, условия зарождения трещины и качество поверхности разделения [8; 9]. Кроме того, при больших пластических деформациях традиционные лагранжевы конечно-элементные модели могут сталкиваться с искажением элементов и снижением точности расчета. Поэтому особое внимание должно уделяться локальному уплотнению сетки в зоне контакта ножей с металлом и корректной настройке процедуры перестроения сетки [10].

Для горячего реза принципиально важно учитывать термомеханическую природу процесса. Температура металла влияет на сопротивление пластической деформации, интенсивность накопления поврежденности и требуемое усилие реза. В зоне локализованной деформации часть механической работы преобразуется в тепло, что может изменять локальное температурное поле и свойства материала. Следовательно, расчетная модель должна учитывать большие пластические деформации, контактное трение, температурно-зависимое поведение материала и развитие разрушения.

Прямое экспериментальное определение напряжений, деформаций, контактных давлений и поврежденности в зоне реза затруднено вследствие кратковременности процесса и закрытого характера контактной области. В этих условиях эффективным инструментом исследования является трехмерное конечно-элементное моделирование. Оно позволяет воспроизвести реальную геометрию ножей и полосы, задать кинематику рабочих органов, учесть контактное взаимодействие и получить временные зависимости усилия реза, крутящего момента и мощности [11; 12].

При моделировании процессов реза в программном комплексе DEFORM-3D особое значение имеет выбор критерия разрушения. Расчетное усилие и характер разделения материала чувствительны как к типу критерия, так и к его параметрам [13]. Поэтому конечно-элементную модель реза следует рассматривать как связанную нелинейную задачу, включающую геометрию ножей и полосы, контактное трение, температурно-зависимое пластическое течение, локализацию деформации, накопление поврежденности и численную процедуру разделения металла.

Таким образом, трехмерное моделирование процесса реза летучими ножницами формирует расчетную базу для оценки пиковых и переходных нагрузок, проверки работоспособности механической передачи, выбора параметров электропривода и разработки алгоритмов управления, направленных на стабилизацию скорости и крутящего момента в наиболее нагруженной фазе технологического цикла.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были приняты барабанные ножницы производства Частного акционерного общества «Новокраматорский машиностроительный завод» (Украина). Оборудование предназначено для обрезки головной и хвостовой частей горячекатаной полосы перед ее поступлением на последующие технологические операции прокатного процесса. Общий вид барабанных ножниц представлен на рисунке 1.

Согласно технической документации, барабанные ножницы предназначены для реза горячего подката из малоуглеродистых, низколегированных и углеродистых конструкционных сталей. Основные технические параметры разрезаемой полосы и оборудования приведены в таблице 1.

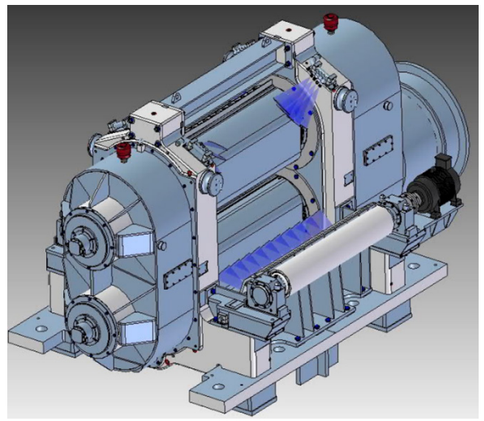


Рисунок 1 – Барабанные ножницы для обрезки головной и хвостовой частей горячекатаной полосы

Таблица 1 – Основные технические характеристики барабанных ножниц

Параметр	Значение
Параметры разрезаемого подката	
Материал подката	Малоуглеродистые, низколегированные и углеродистые конструкционные стали
Предел прочности, МПа	750
Предел текучести, МПа	350
Толщина полосы, мм	20–45
Ширина полосы, мм	700–1550
Температура металла, °С	900–1000
Скорость движения полосы при резе, м/с	0,58–2,0

Краткая техническая характеристика оборудования	
Усилие реза, т	350
Максимальный крутящий момент, т·м	150
Количество ножей на каждом барабане, шт.	2
Межосевое расстояние между барабанами, мм	1000
Количество электродвигателей, шт.	2
Мощность каждого электродвигателя, кВт	1650
Частота вращения электродвигателя, об/мин	185

Рассматриваемые барабанные ножницы относятся к высоконагруженному технологическому оборудованию, предназначенному для реза горячей полосы значительной толщины и ширины. Поэтому при конечно-элементном моделировании необходимо учитывать геометрию заготовки, кинематику движения ножей, температурное состояние металла, контактное взаимодействие, условия разрушения материала и формирование переменных нагрузок на барабанах [5; 6; 11; 12].

В настоящем исследовании рассмотрены барабанные ножницы с дифференциальной скоростью резания, кинематическая схема которых представлена на рисунке 2. В отличие от обычных ножниц с одинаковыми радиусами режущих траекторий верхнего и нижнего барабанов (), в исследуемой конструкции выполняется условие (). При заданной угловой скорости это обеспечивает различие окружных скоростей режущих кромок и последовательное изменение межножевого зазора по схеме «минус – ноль – плюс».

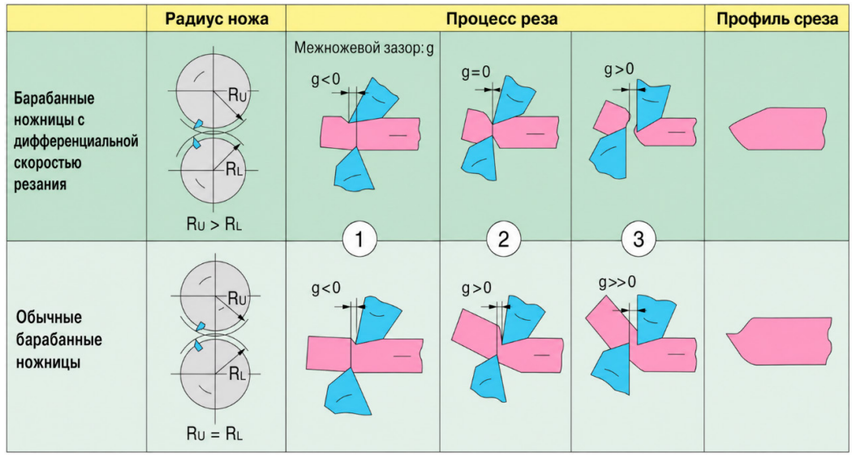


Рисунок 2 – Кинематические схемы процесса реза в барабанных ножницах с дифференциальной и одинаковой скоростью режущих кромок

На начальной стадии отрицательный зазор способствует внедрению ножей в металл и формированию зоны интенсивного пластического сдвига. При нулевом зазоре происходит активное развитие зоны разделения, а при переходе

к положительному зазору завершается отделение разрезаемой части полосы. Для обычных ножниц при одинаковых радиусах барабанов окружные скорости режущих кромок практически совпадают, а межножевой зазор быстрее переходит в положительную область. Это может ухудшать условия формирования профиля среза. Выбор ножниц с дифференциальной скоростью резания позволяет исследовать влияние изменяющегося межножевого зазора и различия скоростей режущих кромок на пластическое деформирование, разрушение материала и энергосиловые параметры процесса.

В расчетной модели барабаны задавались как вращающиеся инструменты с угловой скоростью 4,84328 рад/с, соответствующей частоте вращения 46,25 об/мин. Такая постановка позволила воспроизвести рабочий поворот барабанов и получить временные зависимости усилия реза, крутящего момента и мощности, необходимые для оценки нагружения электропривода.

Геометрические модели барабанов, ножей и разрезаемого листа были разработаны в системе КОМПАС-3D (АСКОН, Россия) в соответствии с технической документацией оборудования (рис. 3). Затем геометрия была импортирована в программный комплекс DEFORM-3D (Scientific Forming Technologies Corporation, США), где задавались контактные условия, материал заготовки, граничные условия, параметры сетки и модель разрушения.

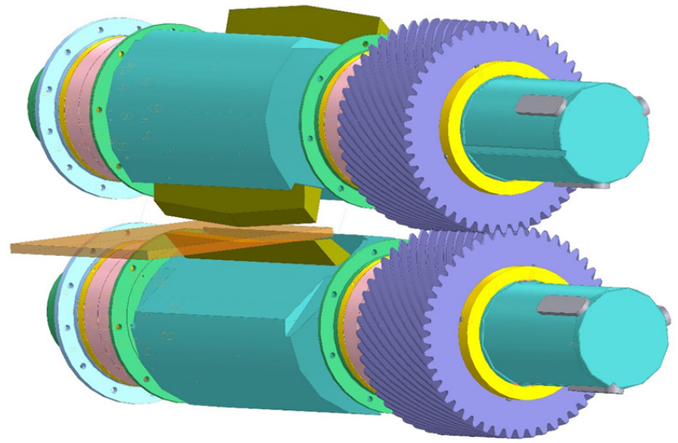


Рисунок 3 – Геометрическая модель

При постановке задачи барабаны и ножи рассматривались как абсолютно жесткие тела, поскольку их деформации пренебрежимо малы по сравнению с деформацией горячего металла. Заготовка задавалась как деформируемое тело из однородного и изотропного материала, поведение которого описывалось в вязкопластической постановке с учетом температурной зависимости сопротивления деформации. Такие допущения широко применяются при

моделировании процессов летучего реза, сдвигового резания и вырубки, поскольку позволяют сосредоточить расчет на деформировании, накоплении поврежденности и разделении металла [7, 11, 12].

В качестве материала заготовки была выбрана сталь DIN-C45 [70–2000 °F (20–1100 °C)] из библиотеки DEFORM-3D. Сталь С45 относится к среднеуглеродистым конструкционным сталям и близка по характеристикам к SAE/AISI 1045 [14]. Библиотечная модель DIN-C45 содержит температурно-зависимые данные в диапазоне 20–1100 °C, соответствующем условиям горячего реза. Начальная температура заготовки была принята равной 950 °C, что находится в пределах технологического диапазона работы ножниц 900–1000 °C.

Размеры расчетной заготовки составляли 45×1550×1000 мм. Выбранные толщина и ширина соответствуют верхней границе технических возможностей оборудования, поэтому расчетная схема отражает наиболее нагруженный режим работы ножниц и обеспечивает консервативную оценку усилия реза, крутящего момента и мощности.

Контактное взаимодействие между ножами и заготовкой задавалось по закону трения Зибеля с фактором трения (m=0,7). Данное значение используется в расчетах горячего пластического деформирования в DEFORM-3D как рекомендуемое для условий сухого трения на границе контакта «инструмент – заготовка» [15]. Его применение обусловлено высокими контактными давлениями, интенсивным пластическим течением и ограниченным относительным скольжением металла вдоль режущих кромок.

Фактор трения в зоне реза не является строго постоянной физической характеристикой: его фактическое значение зависит от температуры металла, состояния поверхностей ножей, наличия окалины, контактного давления и скорости относительного скольжения. Поэтому значение (m=0,7) принято как инженерное допущение для тяжелых условий горячего контакта и подлежит последующей верификации по экспериментальным или производственным данным.

Особенностью моделирования реза является необходимость описания не только пластического деформирования, но и фактического разделения металла. Процесс включает упругопластическое вдавливание ножей, локализацию деформации, накопление поврежденности, зарождение трещины и окончательное разделение заготовки. Достоверность численного расчета определяется корректным учетом вязкого разрушения, межножевого зазора, локального уплотнения сетки и процедуры удаления или деградации конечных элементов после достижения критического значения поврежденности [7; 9; 11].

Для описания разрушения материала в свойствах заготовки была задана модель Ояне (Oyane). Данный критерий относится к группе феноменологических критериев вязкого разрушения и учитывает влияние напряженного состояния, включая гидростатическую составляющую напряжений и напряженную триосность, на накопление поврежденности [16; 17].

В принятой постановке накопление поврежденности по критерию Ояне описывалось интегральной зависимостью

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \left(1 + a_0 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\varepsilon},$$

где D – накопленная поврежденность материала;

$\bar{\varepsilon}$ – эквивалентная пластическая деформация;

σ_m – среднее гидростатическое напряжение;

$\bar{\sigma}$ – эквивалентное напряжение по Мизесу;

a_0 – параметр модели Ояне, определяющий влияние напряженного состояния на развитие поврежденности.

Напряженная триосность в данной модели может быть представлена отношением

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}},$$

где η характеризует вклад гидростатической составляющей напряжений в процесс накопления поврежденности.

Тогда критерий Ояне можно записать в более компактной форме:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} (1 + a_0 \eta) d\bar{\varepsilon}.$$

Условие начала численного разделения материала задавалось как достижение критического значения поврежденности:

$$D \geq D_{cr},$$

где D_{cr} – критическое значение поврежденности.

При выполнении данного условия конечный элемент считается утратившим несущую способность, что соответствует переходу от пластического течения к локальному разрушению и формированию поверхности разделения металла.

В настоящем исследовании для критерия Ояне были заданы параметры $a_0 = 0{,}25$ и $D_{cr} = 0{,}9$. Эти параметры приняты как инженерная калибровка для моделирования горячего реза стали С45 при температуре 950 °C. Критическое значение поврежденности не является универсальной константой материала: оно зависит от напряженного состояния, температуры, скорости деформации и выбранной модели разрушения [17, 18]. Поэтому принятые параметры следует рассматривать как исходные расчетные значения, подлежащие дальнейшей верификации по моменту полного разделения материала, морфологии поверхности реза и кривой усилия.

Для заготовки была сформирована конечно-элементная сетка, включающая 51 706 узлов, 226 338 конечных элементов и 53 384 поверхностных полигона. В зоне предполагаемого контакта ножей с металлом и последующего разделения заготовки выполнено локальное уплотнение сетки с применением инструмента

Mesh Window. Коэффициент отношения размера элемента внутри окна уплотнения к размеру элемента вне окна (Size Ratio to Element Outside Window) был задан равным 0,5. Это позволило уменьшить характерный размер элемента в зоне интенсивного сдвига приблизительно в два раза без чрезмерного увеличения общего числа элементов.

При размерах заготовки 45 × 1550 × 1000 мм ее расчетный объем составляет (69{,}75 \times 10^6) мм³. Условный средний объем одного элемента равен приблизительно 308 мм³, что соответствует эквивалентному линейному размеру около 6,7 мм. С учетом локального уплотнения характерный размер элемента в зоне реза ориентировочно составляет 3–4 мм. Данная оценка является приближенной, поскольку реальное распределение размеров элементов зависит от локальной геометрии, контактной области и параметров автоматического перестроения сетки.

Необходимость локального уплотнения обусловлена развитием разрушения в узкой зоне интенсивного сдвига вблизи режущих кромок, где формируются высокие градиенты пластической деформации, контактного давления и поврежденности. Исследования трехмерного моделирования процессов точной вырубки показывают, что мелкая сетка вблизи режущей кромки необходима для корректного описания напряженно-деформированного состояния и формирования поверхности среза, тогда как равномерное измельчение всей расчетной области существенно увеличивает вычислительные затраты [19].

Следует также учитывать, что при моделировании сдвигового резания традиционные лагранжевы конечно-элементные модели могут сталкиваться с искажением элементов и снижением точности при больших пластических деформациях [10]. Локальное уплотнение сетки позволяет более устойчиво отслеживать развитие пластической деформации, накопление поврежденности и начало удаления элементов после достижения критического значения критерия разрушения.

Принятое количество элементов можно считать достаточным для данной расчетной постановки, поскольку сетка локально уплотнена именно в области максимальных градиентов деформации и поврежденности, что соответствует подходам, применяемым при моделировании процессов реза и точной вырубки [10, 19]. При этом вычислительная эффективность обеспечивается сочетанием общей сетки заготовки с локальным уплотнением в критической зоне [19,20]. Дополнительное измельчение сетки по всему объему заготовки существенно увеличило бы расчетные затраты без пропорционального повышения точности в областях, удаленных от зоны реза.

Численное моделирование процесса реза (рис. 4) выполнялось при следующих параметрах: количество шагов – 500, шаг сохранения результатов – 10, временной шаг – 0,0002 с/шаг. Общая продолжительность моделирования составила 0,100 с, а временной интервал между сохраняемыми результатами – 0,002 с. Такая детализация достаточна для анализа изменения усилия реза, крутящего момента и мощности в условиях кратковременного и существенно нестационарного нагружения барабанных ножниц.

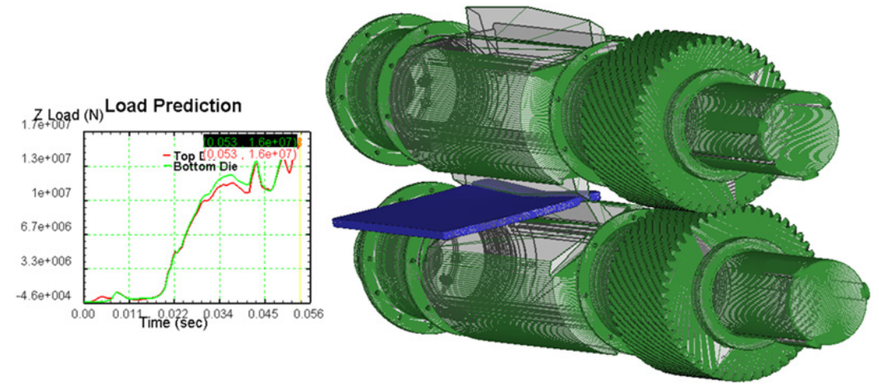


Рисунок 4 – Моделирование процесса реза в DEFORM-3D

Результаты и обсуждения

В результате конечно-элементного моделирования получены временные зависимости вертикальной составляющей усилия реза на ножах и крутящего момента на барабанах. Эти зависимости позволяют оценить максимальные нагрузки и характер их изменения в течение кратковременного цикла реза.

На рисунке 5 представлено изменение вертикальной составляющей усилия реза для верхнего и нижнего ножей. До момента времени 0,010–0,012 с значения усилия остаются сравнительно малыми, что соответствует начальному контакту и вдавливанию режущих кромок в металл. После 0,012 с усилие резко возрастает, причем наиболее интенсивный рост наблюдается в интервале 0,014–0,020 с вследствие формирования локализованной зоны сдвига, увеличения контактных давлений и накопления поврежденности материала.

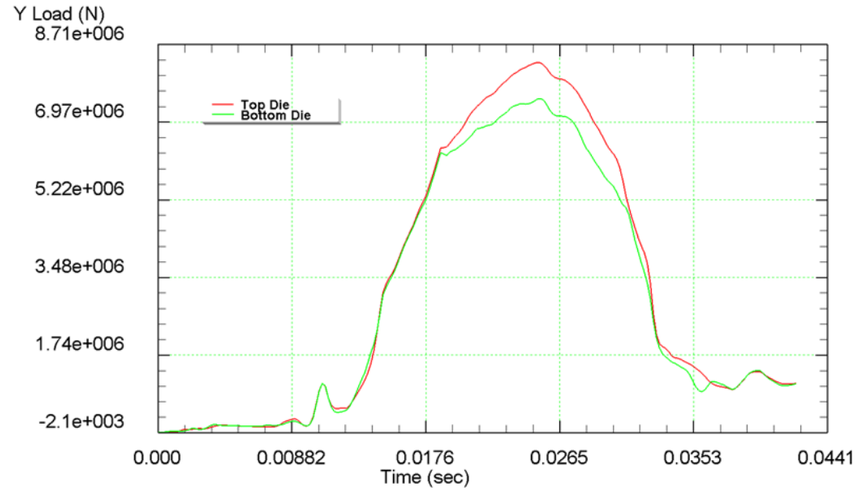


Рисунок 5 – Изменение вертикальной составляющей усилия реза на верхнем и нижнем ножах

Максимальное значение вертикальной составляющей усилия составляет приблизительно 8,0–8,2 МН для верхнего ножа и 7,0–7,2 МН для нижнего ножа. Пиковые значения достигаются в интервале 0,023–0,026 с. Различие усилий связано с относительным положением режущих кромок, изменением межножевого зазора при вращении барабанов и перераспределением контактных давлений. После 0,027 с происходит резкое снижение нагрузки, соответствующее распространению трещины, потере несущей способности металла в зоне сдвига и окончательному разделению заготовки. Основная фаза реза завершается примерно к 0,034–0,035 с.

Полученный характер зависимости согласуется с результатами исследований сдвигового резания, в которых процесс рассматривается как последовательность стадий вдавливания инструмента, пластического течения, развития вязкого разрушения и окончательного разделения материала [11]. Сопоставимые закономерности отмечены при трехмерном моделировании летучей резки горячекатаной стальной плиты X100, где учитывались кинематика ножей, упругопластическое поведение металла и движение рабочих органов [12].

На рисунке 6 приведены временные зависимости крутящего момента на верхнем и нижнем барабанах. В отличие от вертикального усилия, кривые момента имеют более выраженный асимметричный и колебательный характер, поскольку момент определяется не только величиной контактной силы, но и текущим плечом ее приложения относительно оси вращения барабана.

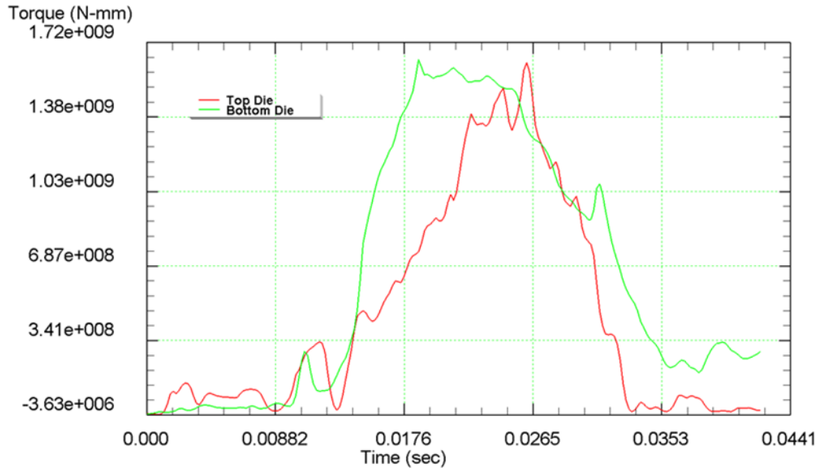


Рисунок 6 – Изменение крутящего момента на верхнем и нижнем барабанах

До момента времени 0,010–0,012 с значения крутящего момента остаются малыми. Для нижнего барабана интенсивный рост начинается примерно при 0,013–0,014 с, а максимум (1{,}55–1{,}60 \times 10^9) Н·мм достигается в интервале 0,018–0,020 с. Для верхнего барабана аналогичный максимум фиксируется позднее – примерно при 0,025–0,026 с. Такая асимметрия связана с кинематикой вращения барабанов, последовательным изменением межножевого зазора по схеме «минус – ноль – плюс» и изменением плеча действия контактных сил.

Максимальный крутящий момент (1{,}55–1{,}60 \times 10^9) Н·мм соответствует 1550–1600 кН·м. Паспортное значение максимального момента оборудования составляет 150 т·м, или приблизительно 1470 кН·м при пересчете из тонна-сила-метров. Таким образом, расчетные пиковые значения находятся в сопоставимом диапазоне с технической характеристикой оборудования, что косвенно подтверждает инженерную согласованность модели.

Импульсный характер крутящего момента соответствует данным работы [5], в которой показано, что роторные ножницы подвергаются кратковременной ударной нагрузке, сопоставимой с номинальным моментом двигателя. Это делает стабилизацию скорости в фазе реза самостоятельной задачей управления приводом. Аналогичный вывод следует из работы [6], где барабанные ножницы рассматриваются как сложная электромеханическая система с переменной во времени нагрузкой и выраженными колебательными процессами.

Сопоставление кривых усилия и крутящего момента показывает, что их максимумы не совпадают по времени. Вертикальная составляющая усилия достигает максимума в период наибольшего сопротивления металла разделению, тогда как положение максимума момента дополнительно зависит от текущего плеча приложения нагрузки. Поэтому при оценке нагружения электропривода

необходимо анализировать не только максимальное усилие реза, но и полные временные зависимости крутящего момента для каждого барабана.

С позиции механики разделения материала полученные результаты согласуются с исследованиями полного цикла вырубки, в которых показано характерное увеличение усилия на стадии пластического течения и его последующее снижение после разрушения металла [9]. При интерпретации колебательных участков расчетных кривых следует учитывать, что они могут быть обусловлены не только физической нестационарностью процесса, но и особенностями численной реализации удаления элементов и локализации разрушения. Как отмечено в работе [10], традиционные лагранжевы конечно-элементные модели при больших деформациях могут сталкиваться с искажением элементов и снижением точности расчета.

На основе полученных временных зависимостей выделены характерные стадии процесса реза, приведенные в таблице 2.

В целом результаты моделирования показывают, что рез горячекатаной полосы толщиной 45 мм и шириной 1550 мм барабанными ножницами представляет собой кратковременный, нелинейный и высоконагруженный процесс. Основная фаза нагружения сосредоточена в интервале 0,012–0,034 с. Полученные временные зависимости усилия реза и крутящего момента могут использоваться для оценки нагружения барабанов, валов, редукторов и электроприводов, анализа переходных и перегрузочных режимов, а также разработки алгоритмов стабилизации скорости в наиболее нагруженной фазе цикла реза.

Таблица 2 – Характерные стадии процесса реза по результатам конечно-элементного моделирования

Стадия процесса	Временной интервал, с	Характер изменения параметров
Начальный контакт ножей с металлом	0,000–0,012	Усилие и крутящий момент малы; происходит подвод ножей к заготовке и их начальное вдавливание
Интенсивное пластическое деформирование	0,012–0,020	Быстрый рост усилия и крутящего момента; формируется локализованная зона сдвига
Максимальное сопротивление резу	0,020–0,026	Достигаются пиковые значения усилия и крутящего момента
Развитие разрушения и разделение материала	0,026–0,034	Происходит резкое снижение усилия и крутящего момента вследствие потери сплошности материала
Завершение контакта	После 0,034	Наблюдаются остаточные колебания нагрузочных параметров

Выводы

В программном комплексе DEFORM-3D разработана конечно-элементная модель реза горячекатаной полосы барабанными ножницами, учитывающая геометрию рабочих органов, кинематику их вращения, контактное взаимодействие, температурно-зависимые свойства стали DIN-C45 и разрушение материала по критерию Ояне. В качестве наиболее нагруженного расчетного варианта принята полоса размером 45 × 1550 × 1000 мм при температуре 950 °C. Для повышения точности описания зоны разделения выполнено локальное уплотнение сетки; расчетная модель включала 51 706 узлов, 226 338 конечных элементов и 53 384 поверхностных полигона.

Установлено, что процесс реза имеет выраженный нестационарный и импульсный характер. Вертикальная составляющая усилия реза после начального внедрения ножей резко возрастает вследствие интенсивного пластического деформирования и накопления поврежденности, а затем снижается при развитии разрушения и окончательном разделении металла. Максимальное усилие составило приблизительно 8,0–8,2 МН для верхнего ножа и 7,0–7,2 МН для нижнего ножа. Основная фаза нагружения сосредоточена в интервале 0,012–0,034 с.

Крутящий момент на барабанах изменяется асимметрично и имеет колебательный характер. Его максимальные значения составляют (1{,}55–1{,}60 \times 10^9) Н·мм, или приблизительно 1550–1600 кН·м, что сопоставимо с паспортным уровнем максимального момента оборудования. Максимумы усилия реза и крутящего момента не совпадают по времени, поскольку момент определяется не только величиной усилия, но и текущим плечом его приложения, угловым положением ножей и изменением межножевого зазора. Полученные зависимости могут использоваться для оценки нагрузок на барабаны, валы, редукторы и электроприводы, а также для выбора параметров привода и разработки алгоритмов стабилизации скорости в наиболее нагруженной фазе реза.

REFERENCES

1 **Bagheripoor, M., Bisadi, H.** Application of artificial neural networks for the prediction of roll force and roll torque in hot strip rolling process // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – Vol. 37. – № 7. – P. 4593–4607. – https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.070.

2 **Orcajo, G. A., Rodríguez, J., Ardura, P., Cano, J. M., Norniella, J. G., Llera, R., Cifrián, D.** Dynamic estimation of electrical demand in hot rolling mills // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52. – № 3. – P. 2714–2723. – https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2533483.

3 **Lee S., Son Y.** Motor load balancing with roll force prediction for a cold-rolling setup with neural networks // Mathematics. – 2021. – Vol. 9. – № 12. – Article 1367. – https://doi.org/10.3390/math9121367.

4 **Gelmanova, Z. S., Nogaev, K. A., Batyrbek, A., Fayez Wazani Abdul Walid.** Flying shears for hot cutting of rolled metal: Technology, equipment and modern development trends // Metallurg. – 2026. – № 3. – P. 104–114. – https://doi.org/10.52351/00260827_2026_3_104.

5 **Šlapák, V., Ďurovský, F., Kyslan, K., Smoleň, P.** Shearing work analysis and control design of rotary shears in material processing lines // Power Electronics and Drives. – 2024. – Vol. 9. – № 1. – P. 482–501. – https://doi.org/10.2478/pead-2024-0030.

6 **Batyrbek, A., Kuznetsov, V., Kuznetsov, V., Rojek, A., Kovalenko, V., Tkalenko, O., Tytiuk, V., Krasovskyi, P.** Control of drum shear electric drive using self-learning artificial neural networks // Energies. – 2025. – Vol. 18. – № 21. – Article 5763. – https://doi.org/10.3390/en18215763.

7 **Hambli, R., Potiron, A.** Finite element modeling of sheet-metal blanking operations with experimental verification // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – Vol. 102. – № 1–3. – P. 257–265. – https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00496-9.

8 **Sahli, M. L., Roizard, X., Assoul, M., Colas, G., Giampiccolo, S., Barbe, J. P.** Finite element simulation and experimental investigation of the effect of clearance on the forming quality in the fine blanking process // Microsystem Technologies. – 2021. – Vol. 27. – P. 871–881. – https://doi.org/10.1007/s00542-020-04983-7.

9 **Rizk, J., Rachik, M., Maillard, A.** Finite element simulation of the complete sheet metal blanking cycle: Effect of blanking clearance on force curve and cut edge quality // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – № 9. – Article e30334. – https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30334.

10 **Sandin, O., Rodríguez, J. M., Larour, P., Parareda, S., Frómeta, D., Hammarberg S., Kajberg, J., Casellas, D.** A particle finite element method approach to model shear cutting of high-strength steel sheets // Computational Particle Mechanics. – 2024. – Vol. 11. – P. 1863–1886. – https://doi.org/10.1007/s40571-023-00708-5.

11 **Bohdal, Ł., Kułakowska, A., Kułakowski, M.** Finite element analysis and experimental investigation of cut surface formation of magnetic silicon steel in shear cutting // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 21. – Article 6415. – https://doi.org/10.3390/ma14216415.

12 **Qian, L., Fang, G., Zeng, P.** Three-dimensional finite element analysis for flying shearing of X100 hot-rolled steel plate // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – P. 2488–2493. – https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.355.

13 **Wang, C., Zhu, Y., Ni, H., Shen, W., Zhu, Y.** Cutting force simulation of aluminum alloy 7075 by DEFORM-3D software and its selection of fracture criterion // Materials for Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 43. – № 2. – P. 69–72. – 77. – https://doi.org/10.11973/jxgccl201902014.

14 **Ovako.** C45 Steel Grade. Material Data Sheet. Steel Navigator, 2025 [Electronic resource]. – https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/c45/pdf?variantIDs=466 (accessed: 15.05.2026).

15 **Nogayev K., Kamarov A., Abishkenov M., Ashkeyev Z., Sembayev N., Kydyrbayeva S.** Finite element-based multi-objective optimization of a new inclined oval rolling pass geometry // Modelling. – 2025. – Vol. 6. – № 3. – Article 110. – https://doi.org/10.3390/modelling6030110.

16 **Oyane M., Sato T., Okimoto K., Shima S.** Criteria for ductile fracture and their applications // Journal of Mechanical Working Technology. – 1980. – Vol. 4. – № 1. P. 65–81. – https://doi.org/10.1016/0378-3804(80)90006-6.

17 **Poláková I., Šebek F., Kubík P., Petruška J.** Using DEFORM software for determination of parameters for two fracture criteria on DIN 34CrNiMo6 // Metals. – 2020. – Vol. 10. – № 4. – Article 445. – https://doi.org/10.3390/met10040445.

18 **Pater Z.** A new approach to numerical modeling of material fracture in cross wedge rolled parts // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – Vol. 37. – P. 687–699. – https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.047.

19 **Manopulo N., Tong L., Karadogan C., Hora P.** A dual-mesh strategy for the 3D simulation of fineblanking processes // International Journal of Material Forming. – 2009. – Vol. 2. – Suppl. 1. – P. 589–592. – https://doi.org/10.1007/s12289-009-0495-8.

20 **Hsia S. Y., Chen S. C., Huang Y. M.** Analysis of sheet metal tapping screw fabrication using a finite element method // Applied Sciences. – 2016. – Vol. 6. – № 10. – Article 300. – https://doi.org/10.3390/app6100300.

Поступило в редакцию 01.06.26.
Поступило с исправлениями 08.06.26.
Принято в печать 08.06.26.

Ә. Е. Батырбек[1], *К. А. Ногаев[2], З. С. Гельманова[3], Г. А. Сивякова[4]
[1,2,3,4]Қарағанды индустриялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Темиртау қ.
01.06.26 ж. баспаға түсті.
08.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
08.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МАТЕРИАЛДЫҢ БҰЗЫЛУЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, БАРАБАНДЫ ҚАЙШЫЛАРМЕН ЫСТЫҚТАЙ ИЛЕНГЕН ЖОЛАҚТЫ КЕСУДІҢ ЭНЕРГИЯ-КҮШТІК ПАРАМЕТРЛЕРІН САНДЫҚ ЗЕРТТЕУ

Мақалада жабдықтың жұмыс органдары мен электржетектерінің жүктелуін бағалау үшін қажетті энергия-күштік параметрлерді анықтау мақсатында барабанды қайшылармен ыстықтай иленген жолақты кесу процесінің соңғы элементтер әдісімен зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі ыстық жолақты кесу процесінің айқын тұрақсыз және бейсызықты сипатымен негізделеді, бұл жағдайда кесу күші мен бұраушы момент құралдың кинематикасымен, жолақ геометриясымен, температуралық жағдайлармен, контактілік өзара әрекеттесумен және материалдың бұзылуымен анықталады. Үшөлшемді сандық модель DEFORM-

3D бағдарламалық кешенінде материалдар кітапханасындағы DIN-C45 болатын қолдану арқылы әзірленді. Пышақтар мен жолақ арасындағы контактілік өзара әрекеттесу Зибель үйкеліс заңы бойынша сипатталды. Материалдың бұзылуын сипаттау үшін Ояне (Oyane) тұтқыр бұзылу критерийі қолданылды. Пластикалық деформацияның локализациясын, зақымданудың жинақталуын және жарықшақтың дамуын дәлірек сипаттау үшін болжамды бұзылу аймағында торды жергілікті тығыздау орындалды. Модельдеу нәтижелері кесу процесінің қысқа мерзімді импульстік жүктелу сипатымен ерекшеленетінін көрсетті, бұл барабандардағы кесу күші мен бұраушы моменттің жылдам артуымен және кейіннен төмендеуімен сипатталады. Кесу күші мен бұраушы моменттің максималды мәндері уақыт бойынша толық сәйкес келмейтіні анықталды, бұл барабандардың айналу процесінде контактілік күштің әсер ету ішінің өзгеруімен түсіндіріледі. Алынған жүктеменің уақыттық тәуелділіктері барабандарды, біліктерді, редукторларды және электржетектерді бағалау үшін бастапқы деректер ретінде, сондай-ақ кесу циклінің ең жоғары жүктелген фазасында жылдамдық пен моментті тұрақтандыруға бағытталған басқару стратегияларын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: барабанды қайшылар; ыстықтай иленген жолақ; соңғы элементтер әдісімен модельдеу; DEFORM-3D; кесу күші; бұраушы момент; материалдың бұзылуы; электржетектің жүктелуі.

A. E. Batyrbek[1], *K. A. Nogaev[2], Z. S. Gelmanova[3], G. A. Sivyakova[4]
[1,2,3,4]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau.
Received 01.06.26.
Received in revised form 08.06.26.
Accepted for publication 08.06.26.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE ENERGY-FORCE PARAMETERS OF HOT-ROLLED STRIP CUTTING USING DRUM SHEARS ACCOUNTING FOR MATERIAL FRACTURE

This article presents a finite element study of the hot-rolled strip cutting process using drum shears in order to determine the energy-force parameters required for assessing the loading of the working elements and electric drives of the equipment. The relevance of the study is determined by the highly transient and nonlinear nature of hot strip cutting, in which cutting force and torque are governed by tool kinematics, strip geometry, thermal conditions, contact interaction, and material fracture. A three-dimensional numerical model was developed in the DEFORM-3D software package using DIN-C45 steel from the material library. The contact interaction between the knives and the strip was described by the Siebel friction law. The Oyane ductile fracture criterion was used to describe material fracture. Local mesh refinement was applied in the expected fracture zone to improve the accuracy of describing plastic strain localization, damage accumulation, and crack development. The simulation results showed that the cutting process is characterized by short-term impulse loading, accompanied by a rapid increase and subsequent decrease in

cutting force and torque on the drums. It was established that the maximum values of cutting force and torque do not coincide in time, which is explained by the change in the lever arm of the contact force during drum rotation. The obtained time-dependent load histories can be used as input data for assessing drums, shafts, gearboxes, and electric drives, as well as for developing control strategies aimed at stabilizing speed and torque during the most heavily loaded phase of the cutting cycle.

Keywords: drum shears; hot-rolled strip; finite element modelling; DEFORM-3D; cutting force; torque; material fracture; electric drive loading.

МРНТИ 55.30.03

https://doi.org/10.48081/BGQF2216

А. А. Джомартов[1], А. К. Тулешов[2], А. Е. Абдураимов[3], А. Н. Камал[4]
Институт механики и машиноведения имени У. А. Джолдасбекова,
Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7262-5267
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9775-3049
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0815-3349
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4454-8233
*e-mail: legsert@mail.ru

СИМУЛЯТОР ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОГО ТРОСОВОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РОБОТА

Симулятор землетрясения – это устройство для имитации движения грунта при землетрясении, и предназначен для воспроизведения сейсмических волн. Симулятор землетрясений применяется для проведения сейсмических тренировок людей, для обучения их поведения при реальном землетрясении сотрудниками министерства по чрезвычайным ситуациям. В работе разработан и изготовлен прототип симулятора землетрясения для обучения поведения людей при землетрясении на основе плоского тросового параллельного робота, имитирующего реальное землетрясение, согласно заданной сейсмограммы землетрясения. Разработан симулятор землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота с подвижной платформой, которая приводится в движение на неподвижном основании четырьмя тросами, посредством лебедок с серводвигателями. Четыре серводвигателя, через лебедки наматывают (разматывают) тросы, и тем самым обеспечивают движение подвижной платформы в направлении осей X и У. Исследована кинематика и статика4-х тросового плоского ТПР, где мобильная платформа совершает поступательные движения в направлении осей X и У. Составлена проектно-конструкторскую документация (ПКД), по которой изготовлен прототип симулятора землетрясения на основе плоского тросового робота Проведённые экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота, подтвердили возможность воспроизведения им заданной сейсмограммы.

Ключевые слова: симулятор землетрясения, сейсмограмма, тросовый параллельный робот, прототип, кинематика, статика.

Введение

За последние десятилетия во всем мире произошло несколько мощных землетрясений. Одним из показательных примеров является Великое восточно-японское землетрясение 2011 года магнитудой 9,0. [1]. В мире сотни миллионов людей подвержены существенному сейсмическому риску катастрофического ущерба. В зону риска разрушительного землетрясения входит и город Алматы.

Однако многие люди не осознают его серьезного влияния на их жизнь. на их жизнь. Люди думают, что уже познали опасность сотрясения земли при землетрясении и могут справиться с этой ужасной ситуацией. Однако реальный опыт землетрясения может повергнуть людей в состояние паники. Произошедшее весной 2024 года относительное небольшое по мощности землетрясение вызвало большую панику у горожан. Большинство горожан не подозревали, что землетрясение может вызвать раскачку зданий, особенно это коснулось детей, которые сильно испугались. Таким образом, необходимо обучать людей тому, как себя чувствовать и вести себя, когда происходит землетрясение, и предоставлять специалистам по чрезвычайным ситуациям хорошие планы того, как сотрудничать друг с другом в случае большой катастрофы [2:3].

В связи с тем, что землетрясение не может быть предсказано, большое значение имеет моделирование землетрясений при помощи симуляторов землетрясения. В настоящее время в мире большое внимание уделяется проектированию симуляторов землетрясения для обучения поведения людей при землетрясении. Симулятор землетрясения - устройство воспроизведения сейсмических волн, возникающих при землетрясении. Симуляторы землетрясений применяются для экспериментальных исследований макетов зданий и их фундаментов на сейсмоустойчивость, и что самое главное для проведения сейсмических тренировок людей. Симуляторы землетрясений помогают воспроизвести реальные сейсмические волны прошлых землетрясений. Тренировки на симуляторах землетрясений помогают выработать эффективную реакцию у людей на землетрясения. С этой точки зрения симулятор землетрясения можно использовать для предупреждения и обучения людей опасностям землетрясения путем имитации его стихийного бедствия. Большую роль симулятор землетрясения окажет на психику детей, которые будут подготовлены к раскачке зданий, и в случае реального землетрясения будут адекватно реагировать и действовать, согласно правилам поведения, при землетрясении. Ущерб, нанесенный землетрясением инфраструктуре на обширной территории, напрямую вызван сейсмическим ускорением и скоростью в основании конструкции из-за сильного сейсмического движения грунта. Люди чувствуют движения земли при землетрясении из-за сейсмического ускорения и скорости. Таким образом, для разработки симулятора движения грунта необходимо разработать устройство, которое может создавать сейсмическое ускорение и скорость, которое отражает сейсмограмма землетрясения. Основное требование к симулятору землетрясения это воспроизведение заданной сейсмограммы землетрясения (рисунок 1). Для примера, на рисунке 1 показана сейсмограмма основания дома, при землетрясении 1964 года в городе Ниигата (Япония) [1].

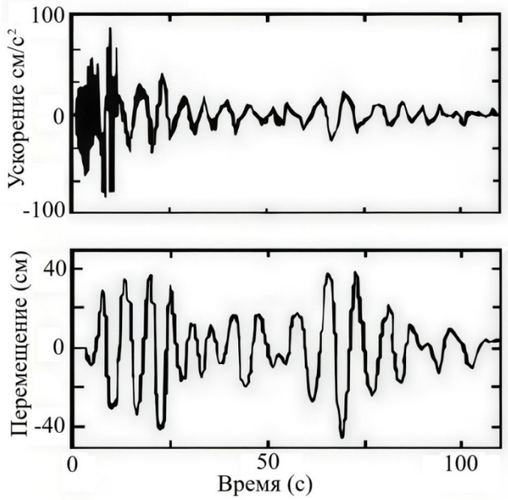


Рисунок 1 – Сейсмограмма землетрясения

Первыми действующими симуляторами землетрясений, были оснащены электрогидравлическими сервосистемами. Эти симуляторы большие, с достаточными степенями свободы для воспроизведения реальных землетрясений [4]. Из-за своих больших размеров они строились и устанавливались на объектах компаний, исследовательских центров или университетов. По этой причине многие люди редко знают о симуляторах, за исключением исследователей, которым необходимо понимать сейсмическую реакцию конструкций. Однако эти симуляторы полезны не только для исследований они могут быть использованы для обучения поведения людей при землетрясении.

Для воспроизведения сейсмических волн разработаны различные виды симуляторов землетрясений. В Японии был разработан большой симулятор землетрясения E-Defense [5] для воспроизведения различных сейсмических волн с высокой точностью. Симулятор землетрясения E-Defense имеет движущуюся платформу размером 20 х 15 м, с 14 гидравлическими приводами, поэтому не может транспортироваться. В работе [6] представлен портативный симулятор землетрясения Jishin-The-Vuton 3D, который реализует движение вверх и вниз для имитации трехмерного движения грунта при землетрясении. По сравнению с существующими тренажерами, предлагаемый тренажер небольшой и, следовательно, портативный. Поэтому многие люди могут легко испытать разрушительные движения грунта при землетрясении. Недостатком симулятора Jishin-The-Vuton 3D является склонность к опрокидыванию из-за небольшой площади контакта приводной системы с сидящим на нем человеком. Разработан симулятор землетрясения [7] с вибрирующей платформой, которая установлена на раме. Платформа приводится в возвратно-поступательное движение гидравлическим приводом, через систему рычагов. Недостатком

данного симулятора землетрясения является сложность конструкции и управления из-за наличия гидроприводов, невозможность воспроизведения больших ускорений, низкая транспортабельность, непригодность для проведения сейсмических тренировок людей. Разработан симулятор землетрясения на базе пространственного параллельного механизма и установлен на грузовой машине. Симулятор землетрясений является мобильным, простым по конструкции, гибким и точным в управлении, и может широко использоваться для научной популяризации исследований землетрясений в школах и населенных пунктах. Недостатком указанного симулятора землетрясения является дороговизна и большие размеры.

В статье разработан симулятор землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота, который будет воспроизводить только поступательные декартовые перемещения. Подвижная платформа симулятора землетрясения совершает поступательные движения в направлении осей Х или У за счет применения плоского тросового параллельного робота (ТПР) [9]. По сравнению с традиционными параллельными роботами с жесткой связью, ТПР имеют меньшие инерционные характеристики и более высокое отношение полезной нагрузки к весу, что обеспечивает высокую скорость [10;11;12;13]. Кроме того, благодаря широкому диапазону использования и гибкости тросов, ТПР могут применяться для решения сложных задач с большой рабочей зоной обслуживания [14;15].

Материалы и методы

На рисунке 2 показана схема симулятора землетрясения, построенная на основе ТПР. Подвижная платформа симулятора землетрясения приводится в движение на неподвижном основании четырьмя тросами, которые соединены с лебедками, которые приводятся в движение серводвигателями. Симулятор землетрясения содержит 4 серводвигателя соединенных с 4-мя лебедками, на которые наматываются тросы, соединенные с подвижной платформой. Четыре серводвигателя, через лебедки наматывают (разматывают) тросы, и тем самым обеспечивают движение подвижной платформы в направлении осей Х и У. Симулятор работает следующим образом. Компьютер, при помощи специально разработанной программы, выдает сигналы для управления на контроллер серводвигателей 1÷4. Серводвигатели 1÷4 начинают натягивать тросы, путем наматывания и разматывания на лебедки 1÷4, осуществляя перемещение платформы горизонтально по осям Х, У на шаровых стальных опорах, и тем самым имитируя реальное землетрясение, согласно заданной сейсмограммы.

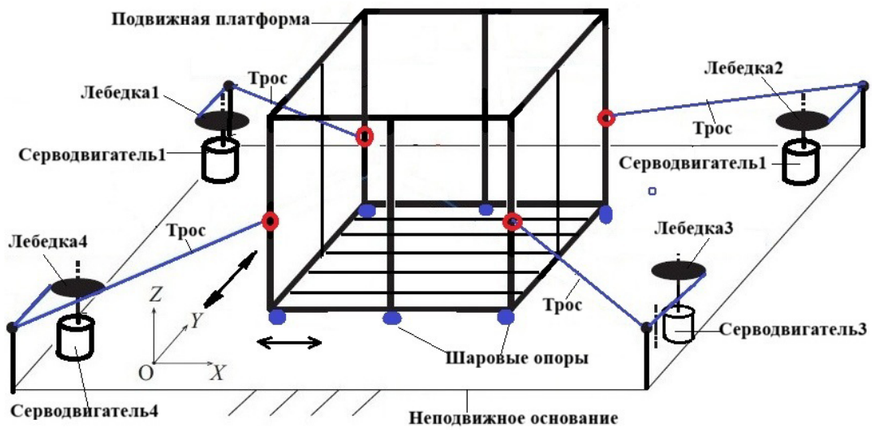
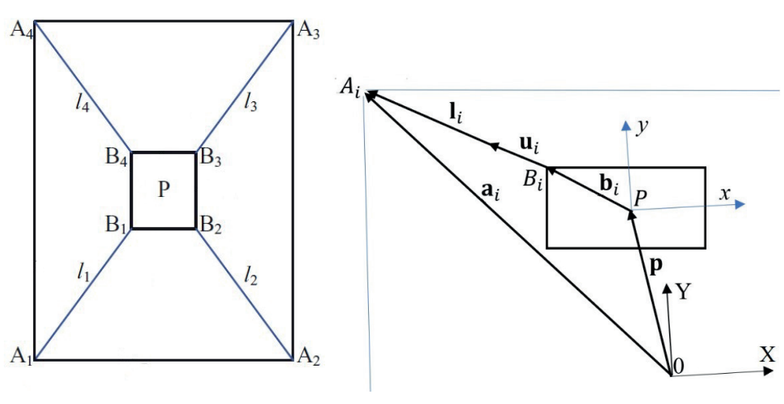


Рисунок 2 – Схема симулятора землетрясения

Рассмотрим кинематику 4-х тросового плоского ТПР, где мобильная платформа совершает поступательные движения в направлении осей X и У. Кинематическая схема плоского ТПР с четырьмя тросами показана на рисунке 3. Основание определяется четырьмя точками приводов тросов $A_i, i = 1, \dots, 4$ Глобальная система координат {X0Z} установлена центре основания. Локальная система координат {xPy} находится в геометрическом центре P прямоугольной платформы с вершинами в точках соединения тросов $B_i, i = 1, \dots, 4$.



(а) (б)

Рисунок 3 – Кинематическая схема плоского ТПР с четырьмя тросами: а) общий вид ТПР, б) замкнутая векторная цепочка

На рисунке 3б показана замкнутая векторная цепочка. Здесь введены следующие обозначения: $\mathbf{a}_i$ – векторы положения точек приводов тросов A_i, в глобальной системе координат $O(XY)$, $\mathbf{b}_i$ – вектор точек соединения тросов B_i с подвижной платформой в локальной системе координат $P(x\ y)$, $\mathbf{l}_i$, – вектор длины i – го троса в глобальной системе координат $O(XY)$, $\mathbf{u}_i$, – единичный вектор направления i -й троса от точки до точки B_i, A_i, $\mathbf{p} = [x, y]^T \in \mathbb{R}^2$ – вектор декартового положения мобильной платформы, относительно глобальной системы координат $O(XY)$,

Применяя метод замкнутых векторных контуров (рис. 3б), получим

$$l_i \mathbf{u}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{b}_i \qquad i = 1, \dots, 4 \tag{1}$$

Длина i -го троса может быть получена как

$$l_i = \sqrt{(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{b}_i)^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{b}_i)} \tag{2}$$

Дифференцируя обе части уравнения (1) по времени, можно получить

$$\dot{l}_i = \mathbf{u}_i^T \dot{\mathbf{p}} \quad i = 1, \dots, 4 \tag{3}$$

Запишем уравнение (3) в матричной форме

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{X}} \tag{4}$$

где $\dot{\mathbf{L}} = [\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4]^T$ и $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{x}_p, \dot{y}_p]^T$ и скорости тросов и мобильной платформы соответственно. J – обратная матрица Якоби (4x3), которая выглядит в виде

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^T \\ \mathbf{u}_2^T \\ \mathbf{u}_3^T \\ \mathbf{u}_4^T \end{bmatrix} \tag{5}$$

Рассмотрим статику 4-х тросового плоского ТПР. Для равновесия сил и моментов подвижной платформы плоского ТПР, совершающего только поступательное движение, необходимо учитывать все силы, действующие на платформу (рис. 4). Таким образом, справедливо [10]

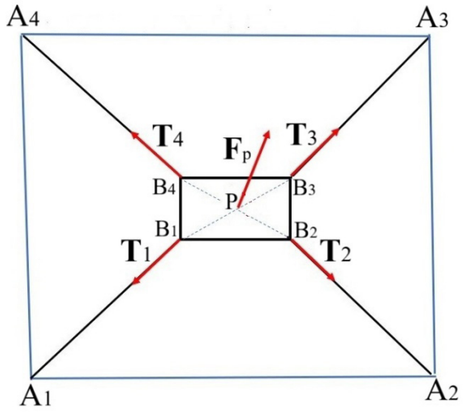


Рисунок 4 – Схема сил, действующих на подвижную платформу ТПР

Из рисунка 4 получаем

$$\sum_{i=1}^{4} \mathbf{T}_i + \mathbf{F}_\mathrm{p} = 0 \quad (6)$$

Сила $\mathbf{T}_i$ i - го троса, приложенная к подвижной платформе в точке B_i, может быть выражена как $\mathbf{T}_i = T_i \mathbf{u}_i$. Здесь $\mathbf{F}_\mathrm{p}$ – внешняя сила.

Запишем (6) в матричной форме

$$\mathbf{ST} + \mathbf{F}_\mathrm{p}^\mathrm{T} = \mathbf{0} \quad (7)$$

где $\mathbf{S} = \boldsymbol{J}^\mathrm{T} \in \mathbb{R}^{3\times4}$ – структурная матрица ТПР, $\mathbf{T} = [T_1, T_2, T_3, T_4]^\mathrm{T} \in \mathbb{R}^2$ – вектор силы троса,

Определение силы троса можно рассматривать как решение матричной задачи, заключающейся в нахождении вектора T в заданном диапазоне и удовлетворяющего уравнению (6). Для нормальной работы ТПР необходимо выполнение следующего условия

$$0 < \mathbf{T}_\mathrm{min} \leq \mathbf{T} \leq \mathbf{T}_\mathrm{max} \quad (8)$$

где $\mathbf{T}_\mathrm{min}$ и $\mathbf{T}_\mathrm{max}$ это минимальное и максимальное усилия троса соответственно.

Матрица структуры $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{3\times4}$ является неквадратной матрицей, а силы троса могут быть определены как [15]

$$\mathbf{T} = \mathbf{S}^{+}\mathbf{F}_\mathrm{p}^\mathrm{T} + (\mathbf{I} - \mathbf{S}^{+}\mathbf{S})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (8)$$

где $\mathbf{S}^{+}$ – псевдообратная Мура-Пенроуза к структурной матрице $\mathbf{S}$ и $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{4\times4}$ единичная матрица, $\boldsymbol{\lambda}$ – произвольный вектор-столбец. $(\mathbf{I} - \mathbf{S}^{+}\mathbf{S})\boldsymbol{\lambda}$ – однородное решение уравнения (7), который образует нулевой пространственный вектор матрицы $\mathbf{S}$. Внешней силой $\mathbf{F}_\mathrm{p}$ в нашем симуляторе землетрясения является сила трения между шаровыми стальными колесиками и неподвижным основанием.

В Институте механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова был разработан прототип симулятора землетрясения на основе плоского ТПР. Составлена проектно-конструкторскую документация (ПКД) [16], по которой изготовлен прототип симулятора землетрясения на основе плоского ТПР (см. рисунок 5). Здесь были использованы тросы марки Dyneema, LIROS D-Pro 01505-0200 и диаметром 3 мм. Каждый трос приводится в движение серводвигателем переменного тока мощностью 600 Вт, который через планетарный редуктор с передаточным отношением 1: 10 соединен с лебедкой. Тросы плоского ТПР прикреплены, через датчики силы S Type Load Cells DYLY-101, к подвижной платформе, размерами 0,8 х 0,8 х 0,8 м. Датчики силы подключены к тензостанции ZET 058 [17] для сбора данных о натяжениях тросов.

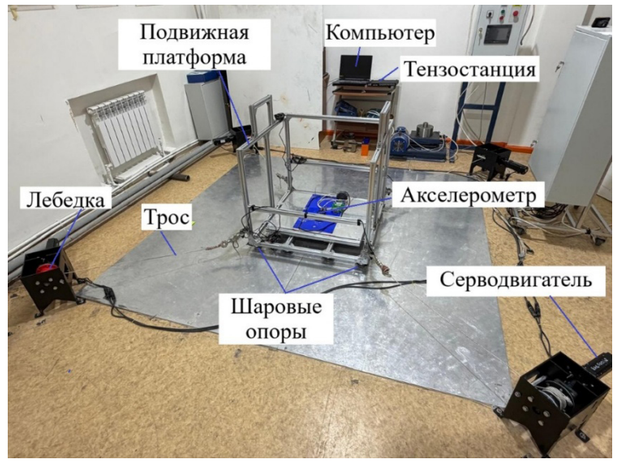


Рисунок 5 – Прототип симулятора землетрясения

Разработан интерфейс программы для управления прототипом симулятора землетрясения основе плоского ТПР для воспроизведения заданной сейсмограммы землетрясения на языке Python (см. рисунок 6).

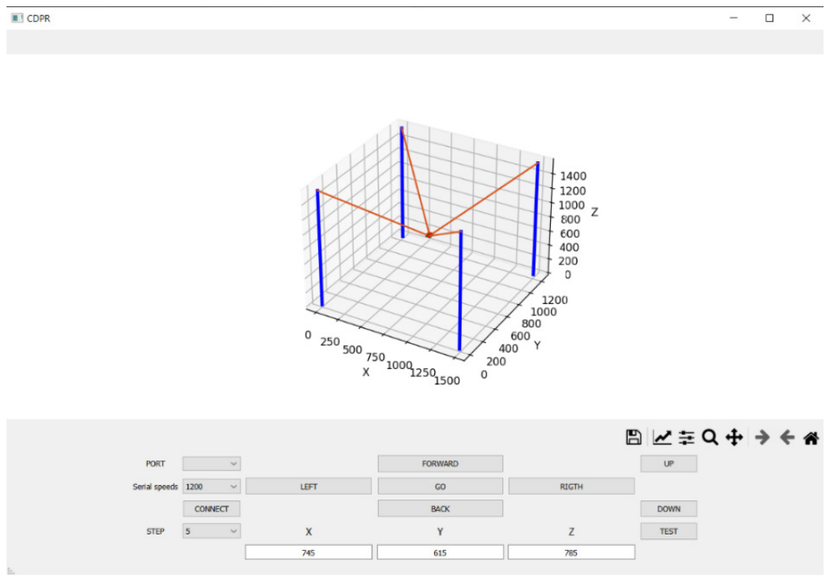


Рисунок 6 – Интерфейс программы для управления прототипом симулятора землетрясения

Интерфейс управления прототипа симулятора землетрясения, позволяет воспроизводить заданную сейсмограмму землетрясения.

Проведем экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения основе плоского ТПР. Зададим траекторию движения подвижной платформы симулятора в виде уравнения

$$\begin{cases} x = 0.2\sin(2\pi \cdot 0.5t)\sin(2\pi \cdot 0.05t) \\ y = 0, \\ 0 \le t \le 10 \end{cases} \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает движение платформы симулятора в направлении оси X, с максимальной амплитудой в пределах ± 0.2 м. Уравнение движения задается в виде синусоидальной волны с частотой 0,5 Гц, амплитуда которой модулируется огибающей с частотой 0,05 Гц. Для измерения ускорения платформы в направлении движения оси X, проводились при помощи цифрового акселерометра ZET 7052-N [17]. Цифровой акселерометр ZET 7052-N предназначен для измерения линейного ускорения по трем взаимно перпендикулярным плоскостям. Цифровой акселерометр ZET 7052-N представляет собой вибродатчик со встроенным трехкомпонентным чувствительным элементом, осуществляющим преобразование постоянной составляющей ускорения в цифровой код по трем взаимно перпендикулярным осям X, Y и Z.

На рисунке 6 показаны заданное и измеренное ускорения платформы в направлении оси X. Как видно из рисунка 6 симулятор может обеспечить пиковые значения ускорения заданной траектории движения платформы.

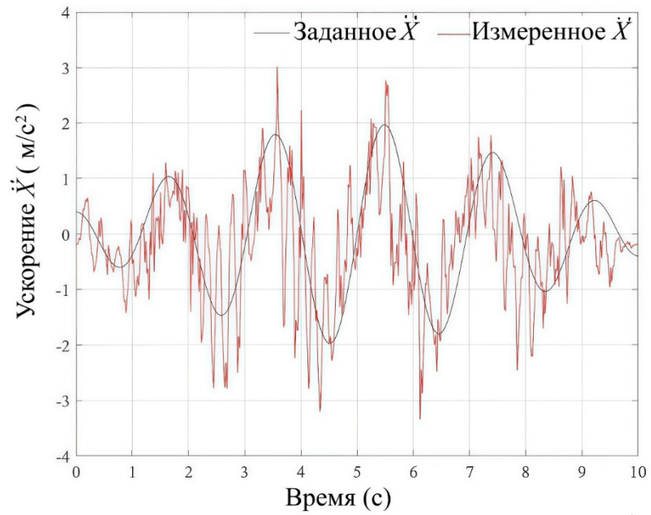


Рисунок 6 – Заданное и измеренное ускорения платформы в направлении оси X

Путем двойного интегрирования ускорения определяем перемещение подвижной платформы. Данные ускорения, полученные путем измерения цифрового акселерометра ZET 7052-N, содержат большой уровень низкочастотного шума и постоянного дрейфа ускорения. Непосредственное интегрирование данных ускорения, приведет к недопустимым погрешностям в определении перемещения. Интегрирование ускорения для определения перемещения, проводилось с помощью фильтрации и поправки на базовую линию [18].

На рисунке 7 показаны заданное и измеренное перемещение подвижной платформы.

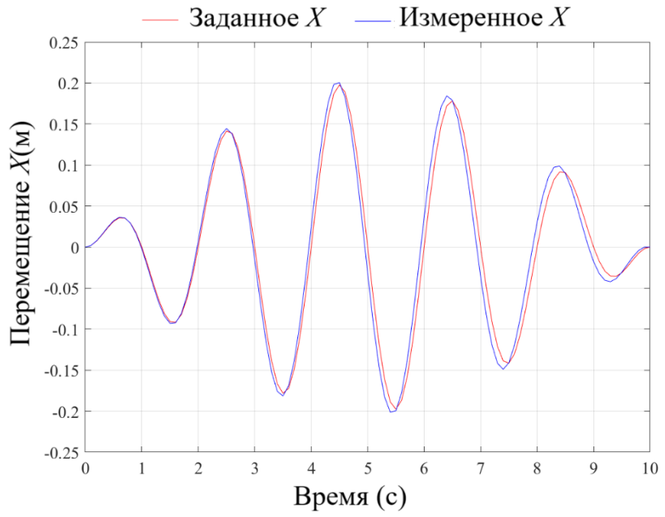


Рисунок 7 – Заданное и измеренное перемещение подвижной платформы

На рисунке 8 показаны натяжения тросов ТПР, полученные с тензодатчиков. Как видно из рисунка 8 натяжения тросов имеют положительные значения.

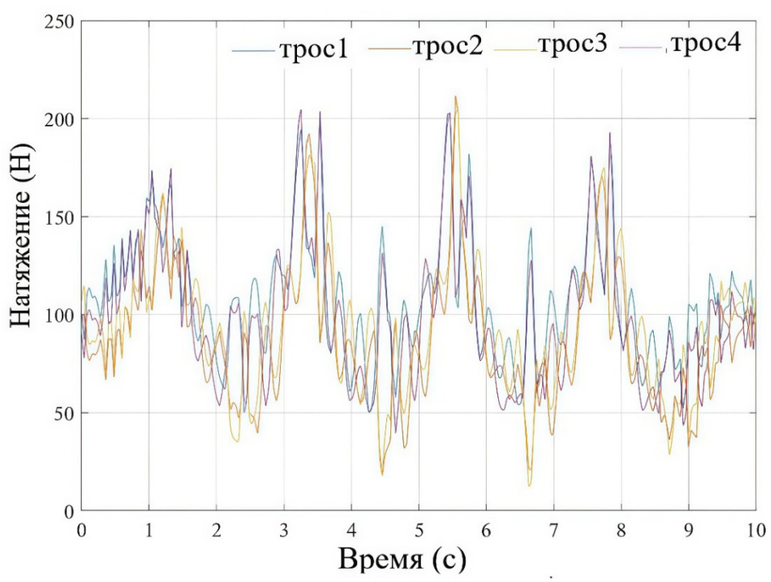


Рисунок 8 – Натяжения тросов ТПР

Ошибка отслеживания траектории (см. рисунок 7) происходит из-за снижения натяжения тросов (см. рисунок 8), в следствии резкого изменения ускорения платформы.

Результаты и обсуждение

В работе разработан симулятор землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота, для воспроизведения движения грунта при землетрясении, согласно сейсмограмме землетрясения. Подвижная платформа прототипа симулятора землетрясения совершает плоскопараллельное движение в направлении осей X или У за счет намотки или смотки тросов ТПР,

Проведены кинематический и статический анализы симулятора землетрясения. Спроектирован и изготовлен прототип симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота. Проведены экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения, которые подтвердили возможность воспроизведения им заданной сейсмограммы.

Прототип симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота будет применятся для обучения поведения людей при землетрясении. Кроме того, разработка симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота, способна значительно расширить экспериментальную базу ученых сейсмологов.

По сравнению с симуляторами землетрясений, разработанных в работах [2;3;4;5;6;7;8], данный симулятор отличается простотой и дешевизной в изготовлении, за счет применения плоского тросового робота.

Работа внесет свой вклад в область теории машин и механизмов, за счет дальнейшего исследования тросовых параллельных роботов.

Новизна конструктивного решения прототипа симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота, подтверждена патентом [19]

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках грантового проекта AP26195455 «Разработка симулятора землетрясения для обучения поведения людей при землетрясении на основе тросового параллельного робота» и финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Выводы

Разработанный в статье симулятор землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота, позволяет воспроизводить реальные сейсмограммы землетрясения, за счет применения плоского ТПР. Благодаря широким функциональным возможностям плоских ТПР, таких как малые инерционные характеристики и большая зона обслуживания, удалось осуществить требуемое ускорение подвижной платформы симулятора землетрясения. Разработанный в работе прототип симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота планируется доработать для реализации вертикального перемещения подвижной платформы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Koketsu, H., Miyake, H.** A Seismologies Overview of Long-Period Ground Motion // Journal of Seismology. – 2008. – № 12(2). – P. 133–143. – https://doi.org/10.1007/s10950-007-9080-0.

2 **Wang, J., Gonzales, B., Milewski, A., Tepfenhart, W.** Design and development of an Earthquake Disaster Simulator // Proc. IEEE Int. Conf. Systems Man and Cybernetics. – 2010. – P. 2557–2563. – https://doi.org/10.1109/ICSMC.2010.5641916.

3 **Takeuchi, L.** Rescue Simulation and Its Road Map // Proc. Int. Conf. SICE. – 2002. – P. 1056–1061. – https://doi.org/10.1109/SICE.2002.1195422.

4 **Martelli, A., et al.** New activities performed in Italy on innovative antiseismic techniques for civil and industrial structures // ASME J. Pressure Vessels & Piping Division. – 1999. – № 387. – P. 311–326.

5 **Ohtani. K., Ogawa, N., Takayama, T., Shibata, H.** Construction of E-DEFENSE (3-D lull-scale earthquake testing facility) // Third tenth World Conference on Earthquake Engineering. – 2001. – № 189.

6 **Roh, S., et al.** Development of the portable ground motion simulator of an earthquake // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan. – 2013. – P. 5339–5344. – https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6697129.

7 **Ouellette, J. F., Poeling, D. L.** Earthquake simulator // Patent США, US. – 1978. - № 4112776A.

8 **Wang, L., Liu, Y., Zheng, S., Li. B.** Vehicular earthquake simulator based on 4-RPS (Range Positioning System) space parallel mechanism // Patent Китай. – 2010. CN №101819727A.

9 **Jomartov, A., Kamal, A., Abduraimov, A.** Development of a planar cable parallel robot for practical application in the educational process // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021. – № 4(7(112). – P. 67–75. – https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237772.

10 **Trautwein, F., Dietrich, D., Pott, A., Verl, A.** Strategy for Topological Reconfiguration of Cable-Driven Parallel Robots // ASME. J. Mechanisms Robotics. – 2025. – № 17(1): 010908. – https://doi.org/10.1115/1.4065642.

11 **Guerra, F., Ida, E., Carricato, M, Agrawal, S.** Performance evaluation of cable-driven wrench applicators: geometric and experimental analysis // Robotics. – 2026. – № 15(2):36. – https://doi.org/10.3390/robotics15020036.

12 **Wu, Q., Zi, B., Hu, B., Li, Y.** Design, kinematics and stiffness analysis of a reconfigurable cabledriven parallel robot // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2025. – № 38:98. – https://doi.org/10.1186/s10033-025-01267-x.

13 T**ho, T. P., Thinh, N. T.** An Overview of Cable-Driven Parallel Robots: Workspace, Tension Distribution, and Cable Sagging // Mathematical Problems in Engineering, 2022. – Article ID 2199748. – P. 1–15. – https://doi.org/10.1155/2022/2199748.

14 **Dion-Gauvin, P., Gosselin, C.** Trajectory planning for the static to dynamic transition of point-mass cable-suspended parallel mechanisms // Mechanism and Machine Theory. – 2017. – № 113. – P. 158–178. – https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.003.

15 **Tho, T. P., Thinh, N. T.** An Overview of Cable-Driven Parallel Robots: Workspace, Tension Distribution, and Cable Sagging // Mathematical Problems in Engineering, 2022. – Article ID 2199748. – P. 1–15. – https://doi.org/10.1155/2022/2199748.

16 **Джомартов, А. А., Камал, А. Н.** Проектно-конструкторская документация (ПКД) прототипа симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота // Mendeley Data, V1 – [Электронный ресурс]. – https://data.mendeley.com/datasets/68mtrcj9bc/1 (дата обращения 04.02.2026).

17 **Dzhomartov, A. A., Kamal, A. N.** Proektno-konstruktorskaya dokumentaciya (PKD) prototipa simulyatora zemletryaseniya na osnove ploskogo trosovogo parallel`nogo robota [Design documentation (D&D) for a prototype earthquake simulator based on a plane cable parallel robot] // Mendeley Data, V1. – [Electronic resource]. – https://data.mendeley.com/datasets/68mtrcj9bc/1 (Accessed: 04.02.2026). ZETLAB – [Electronic resource]. – http://www.zetlab.com (Accessed: 04.02.2026).

18 **Jomartov, A., Tuleshov, A., Seidakhmet, A., Kamal, A., Abduraimov, A.** Experimental determination of trajectory of motion and tensions of cable-suspended parallel robot with point-mass end-effector // International Journal of Mechanical Engineering Education. 2025. – https://doi.org/10.1177/03064190251356823.

19 **Джомартов, А. А., Камал, А. А., Абдураимов, А. Е., Джамалов, Н. К.** Симулятор землетрясения // Евразийский патент на изобретение. – 2022. № 040346.

19 **Dzhomartov, A. A., Kamal, A. A., Abduraimov, A. E., Dzhamalov, N. K.** Simulyator zemletryaseniya // Evrazijskij patent na izobretenie. – 2022. – № 040346. – [Earthquake simulator // Eurasian patent for invention. – 2022. – № 040346.]

Поступило в редакцию 11.01.26.
Поступило с исправлениями 05.02.26.
Принято в печать 20.04.26.

А. А. Джомартов[1], А. Қ. Төлешов[2], А. Е. Абдураимов[3], А. Н. Камал[4]
Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы қ.
11.01.26 ж. баспаға түсті.
05.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.04.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖАЛПАҚ ПАРАЛЛЕЛЬДІ СЫМАРКАНДЫ РОБОТЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН ЖЕР СІЛКІНУІ СИМУЛЯТОРЫ

Жер сілкінісі симуляторы – жер сілкінісі кезінде жер қозғалысын модельдеуге арналған құрылғы және сейсмикалық толқындарды тудыруға арналған. Жер сілкінісі симуляторын төтенше жағдайларға жауап беру қызметкерлері сейсмикалық жаттығулар жүргізу және оларды нақты

жер сілкінісіне жауап беруге үйрету үшін пайдаланады. Әлемде кем дегенде жүздеген миллион адам апатты сейсмикалық зақымдану қаупінде. Бұл мәселе әсіресе Алматыда өткір, онда 2024 жылдың көктеміндегі соңғы жер сілкінісі адамдар арасында үрей тудырды және жер сілкінісі кезінде қалай әрекет ету және өзін-өзі ұстау керектігі туралы дайындықтың толық болмауын көрсетті. Жер сілкінісі барлығына қауіп төндіреді, және барлығы тиісті білім мен қорғаныс шараларын білуі керек. Бұл зерттеу жер сілкінісі кезіндегі адамның мінез-құлқын үйретуге арналған жер сілкінісі симуляторының прототипін әзірледі және шығарды. Бұл симулятор берілген жер сілкінісі сейсмограммасына негізделген нақты жер сілкінісін модельдейтін жалпақ параллель арқан роботына негізделген. Жалпақ параллель сымарканды роботына негізделген жер сілкінісі симуляторы X немесе Y бағытында трансляциялық бір осьтік қозғалыстарды орындайды. Жалпақ параллель сымарканды роботқа негізделген жер сілкінісі симуляторының прототипінің эксперименттік зерттеулері оның берілген сейсмограмманы қайталау мүмкіндігін растады.

Кілтті сөздер: жер сілкінісі симуляторы, сейсмограмма, параллель сымарканды робот, прототип, кинематика, статика.

A. Jomartov[1], A. Tuleshov[2], A. Abduraimov[3], A. Kamal[4]
Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty.
Received 11.01.26.
Received in revised form 05.02.26.
Accepted for publication 20.04.26.

EARTHQUAKE SIMULATOR BASED ON A PLANAR CABLE PARALLEL ROBOT

An earthquake simulator is a device for simulating ground motion during an earthquake and is designed to generate seismic waves. The earthquake simulator is used by emergency response personnel to conduct seismic training and to train them to respond to a real earthquake. At least hundreds of millions of people worldwide are at significant risk of catastrophic seismic damage. This problem is particularly acute in Almaty, where the last earthquake in the spring of 2024 caused panic among people and demonstrated a complete lack of preparedness for how to react and behave during an earthquake. Earthquakes pose a danger and risk to everyone, and everyone should be aware of the appropriate knowledge and protective measures. This study developed and manufactured a prototype earthquake simulator for training human behavior during earthquakes. This simulator is based on a flat parallel rope robot that simulates a real earthquake based on a given earthquake seismogram. The earthquake simulator, based on a planar cable parallel robot, performs translational single-axis movements in the X or Y direction. Experimental studies of the prototype earthquake simulator, based on a planar cable parallel robot, confirmed its ability to reproduce a given seismogram.

Keywords: earthquake simulator, seismogram, cable parallel robot, prototype, kinematics, statics.

FTAMP 55.57.43
https://doi.org/10.48081/BGQF2217

Д. С. Елеманов[1], В. В. Роговский[2], Ж. С. Қалибек[3]
[1,2,3]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3530-9476
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0109-6342
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8322-1894
*e-mail: atonai2009@mail.ru

АРАЛАС ЕГІС СЕКЦИЯСЫНЫҢ ЖҰМЫС ПАРАМЕТРЛЕРІ МЕН РЕЖИМДЕРІН НЕГІЗДЕУ

Бұл мақалада егіс кешеніне арналған құрамдастырылған егіс секциясының құрылымдық параметрлерін негіздеу бойынша жүргізілген зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Зерттеулер теориялық және эксперименттік түрде жасалды. Жұмыстың өзектілігі – Шығыс Қазақстан облысының жағдайында дәнді дақылдарды өсіру кезінде тиімділікті арттыру және ресурстарды үнемдеу қажет. Осы мәселені шешу үшін біз себу секциясының жаңа конструкциясын ұсындық. Бұл конструкция келесі элементтерден тұрады:біріктірілген көтергіш рама;алдыңғы кесу дискісі; екі бүйірлік себу дискісі; қосарланған ұшы бар жазық кесетін жебелі табан; домалатқыш каток. Негізгі ерекшелік – алдыңғы дискіні раманың бойлық осіне қарағанда асимметриялық түрде орнатуға болады. Осының арқасында секцияның жалпы ұзындығы қысқарады және оның металл сыйымдылығы төмендейді. Біз сондай-ақ дискілердің радиусын, жүріс тереңдігін және шабуыл бұрышын ескере отырып, көлденең және тік жазықтықтағы жұмыс органдарына әсер ететін күштерді есептедік. Бұл есептеулерді теориялық тұрғыдан анықтадық. Сонымен қатар, сол және оң жақ егіс дискілерінің тарту кедергісінің құрамдас бөліктерін анықтауға арналған формулаларды (аналитикалық өрнектерді) шығардық. Эксперимент нәтижелері. Біз жаңа конструкцияны сынап көрдік. Оның көмегімен себу дискілерінің әсер ету бұрышын 6 ± 1° диапазонында өзгертуге болады. Осы кезде тұқымдарды бітеу тереңдігі тұрақты болып қалады (70±1 мм). Бұл – жақсы көрсеткіш. Секцияның курстық орнықтылығын қамтамасыз ету үшін қажетті домалатқыш катокты мәжбүрлі түрде қысу күші 70–428 Н құрайтыны айқындалды. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның жер жағдайлары үшін қолданыстағы егіс кешендерін жаңғырту және жаңаларын құру кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: егіс секциясы, құрамдастырылған жинағыш, жазық кесетін табан, тарту кедергісі, шабуыл бұрышы, жүріс тұрақтылығы.

Кіріспе

Ауыл шаруашылығы Қазақстан Республикасы экономикасының негізгі салаларының бірі болып табылады, ал оның қазіргі заманғы көп функционалды машиналармен жарақтану дәрежесі, алынатын өнімнің құны мен сапасына тікелей байланысты. Қазақстанда ауыл шаруашылығы дақылдарын өсіру үшін әр түрлі технологиялар қолданылады: дәстүрлі, ең төменгі, «нөлдік» және қарқынды. Оларды таңдау көбінесе шаруашылықтардың техникалық жабдықталуына байланысты, ал бір технологиядан екіншісіне көшу техниканың әртүрлі түрлерін сатып алуға байланысты үлкен шығындарға әкеп соқтырады [1; 4; 9].

Қазақстанның аграрлық әлеуетінің дамуына қарай мемлекет тарапынан агроөнеркәсіптік кешенді техникалық қамтамасыз етуді арттыру мәселелеріне көп көңіл бөлінеді. Қазіргі заманғы техника мен ауыл шаруашылығын механикаландыру құралдарына сұранысты негіздейтін факторлар өсіру технологиясына қойылатын талаптар, дамушы шаруашылықтарда өндірістің үдемелі мамандануы мен шоғырлануы, сондай-ақ аграрлық жабдықтармен және техникамен жарақтандырудың сандық және сапалық жай-күйі болып табылады. Өсімдік шаруашылығы өнімінің тұрақты өндірісі ең алдымен қолданылатын технологияларға және ұтқыр ауыл шаруашылығы кешендеріне, өндірістің негізгі құралдарына байланысты. Әлемде бірнеше агрегаттардың функцияларын үйлестіретін егіс кешендерін техникалық жаңғырту технологиялары дами бастады. Егіс процесін механикаландырудың қазіргі заманғы ғылыми пысықталуын талдаумен мынадай ғалымдар, Аббасов З. М., Адуов М. А., Қалиасқаров М. С., Жұматай Г. С., Жазықбаева Ж. М., Беляев А. И., Воробьев В. А., Калинников В. В., Мезенцев М. М., Гусаков Ф. А., Руденко В. Н., Кулаев Е. В., Солнцев В. Н., Тарасенко А. П., Аринов К. К., Карипов Р. Х., И. И. Жұмағұлов, А. В. Иванников, Н. В. Шрамко, Қ. М. Мұқажанов, И. А. Спасин, Раднаев Д. Н., Сүлейменова Н. Ш., Еспергенов Ж. Қ., Асанғалиев Е. А. және басқалары айналысты [3, 675–682-бб.].

Әлемдік өндіріс және егіс жабдықтарын жетілдіру саласындағы жетекші фирмалар: John Deere (АҚШ); Amazone, Franz Kleine, Kverneland-Accord (Германия); Kongskilde (Дания); Crucianelli (Аргентина); MaterMacc, Agricola Italiana, Mashio Gaspardo (Италия); Monosem, Kuhn (Франция) және т.б. Қазақстан Республикасында дәнді және дәнді-бұршақты дақылдардың тұқымдарын «ең төменгі» немесе «нөлдік» топырақ өңдеу технологиялары бойынша егу үшін пайдаланылатын топырақ өңдеу-егу агрегаттары неғұрлым кең таралған. Егіс кешендерін жетілдірудің негізгі қазіргі заманғы бағыттары: агрооперацияларды орындау жылдамдығын арттыру, егіс агрегаттарына тұқымдар мен тыңайтқыштарды құю уақытын қысқарту, себілетін материалдарды мөлшерлеу дәлдігін және оларды топыраққа бітеу тереңдігінің біркелкілігін арттыру, егістен кейін алаң бетін тегістеуге арналған катоктарды қолдану, егіс кешенінің құрылымының технологиялық әмбебаптылығы мен модульділігі [5, 85–91-бб.]. Өнімділікті арттыру, металл сыйымдылығын төмендету, энергия

тиімділігін, сенімділікті және басқа да пайдалану сипаттамаларын арттыру өзекті болып қалуда.

Шығыс Қазақстан облысының және тұтастай алғанда Қазақстанның шаруашылықтары үшін проблемалық мәселе егіс кешендерінің ресурстық сенімділігін арттыру, яғни егіс кешені элементтерінің қызмет ету мерзімін ұлғайту болып табылады. Пайдалану практикасы көрсеткендей, атақты өндірушілердің қазіргі заманғы жабдықтары да (мысалы, Crucianelli) өңірдің күрделі топырақ жағдайларына бейімделуін талап етеді. Атап айтқанда, ШҚО-ның күрделі егістік жерлеріндегі сорғыштардың жедел тозуы (бір маусым ішінде), ал кейбір жағдайларда дискілік элементтердің жеткіліксіз бейімделуі байқалады, бұл тез бітелуге және технологиялық процестің бұзылуына алып келеді.

Дәнді дақылдарды егу кезінде шығындарды төмендетудің тиімді тәсілі – бір жұмыс өткелінің ішінде бірнеше операцияны біріктіру. Атап айтқанда: топырақты дайындау, кесу және тығыздау, негізгі тыңайтқышты тұқымнан төмен енгізу, тұқым себу және артынан домалату. Бұл үшін қымбат шетелдік техника сатып алудың қажеті жоқ. Себебі нарықта қолжетімді материалдар мен сенімді тораптарды пайдалана отырып, қолда бар жабдықты жаңғыртуға болады [8, 15]. Осы зерттеу кезеңінің мақсаты құрамдастырылған егіс секциясының конструктивтік параметрлерін теориялық және эксперименттік тұрғыдан негіздеу. Біздің міндетіміз тартымдық кедергіні төмендету және технологиялық процестің тұрақтылығын арттыру.

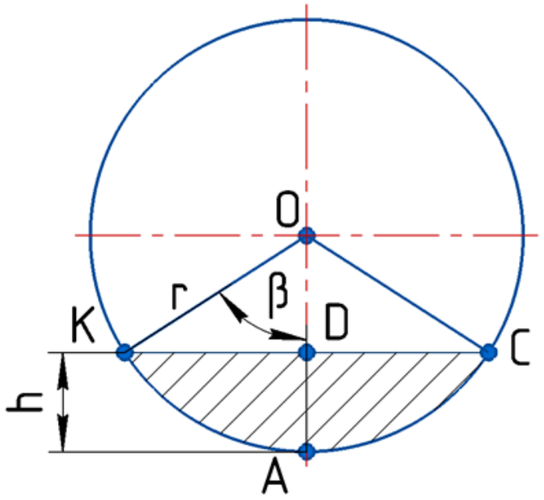
Материалдар мен әдістері

Зерттеу объектісі – дәнді дақылдарды егудің ең төменгі және нөлдік технологияларына арналған құрамдастырылған себу секциясы. Бұл секцияның құрамына келесі элементтер кіреді: біріктірілген көтергіш рама; алдыңғы кесу дискісі, екі бүйірлік себу дискісі, екі ұшы бар жазық кесетін жебелі табан, домалатқыш каток.

Секцияның ерекшелігі: алдыңғы дискіні салмақ түсіретін раманың бойлық осіне қарағанда асимметриялық түрде орнатуға болады. Осының арқасында секцияның жалпы ұзындығы қысқарады және оның металл сыйымдылығы төмендейді. Себу секциясының параметрлерін есептеу үшін біз классикалық механика мен топырақпен жұмыс органдарының өзара әрекеттесу теориясын қолдандық. Мақсатымыз - секция элементтеріне әсер ететін күштерді анықтау және оның түзу сызықты қозғалысының тұрақтылығын бағалау.

Себу дискілерінің топырақпен әрекеттесуі кезінде пайда болатын кедергі күштерін есептеу үшін біз диск сегментінің ауданын есептеу әдісі қолданылды. Бұл әдіс бойынша бастапқы параметрлер: диск радиусы – $r_п$, жүріс тереңдігі – $h_с$, әсер ету бұрышы – τ, топырақтың физикалық-механикалық қасиеттері (меншікті кедергі K).

$S_{КДСА}$ сегментінің ауданы мына формуламен анықталады: сектор ауданы мен радиус пен хордадан пайда болған үшбұрыш ауданының айырмасы ретінде (1-сурет).



1-сурет – Топырақпен жанасқан кездегі егістік дискілеріне
тік жазықтықта әсер ететін күштердің орналасу схемасы

мұндағы: $\beta = \arcsin(1 - \frac{h_c}{r_п})$ – хорданың орнын анықтайтын бұрыш

Көлденең жазықтықтағы тұрақтылықты бағалау үшін біз күштер моментінің теңдеуін құрдық. Бұл теңдеу буындалған раманың бұрылу осіне қатысты жасалды (2-сурет). Есептеу схемасында мына күштер ескерілді:

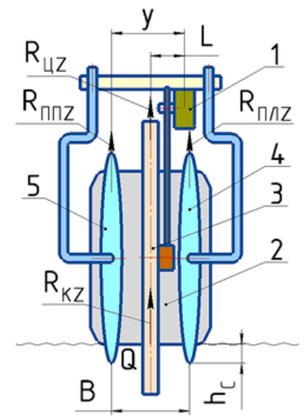
– R_{plx} – алдыңғы дискіге әсер ететін курстық кедергі;

– сол және оң себу дискілерінің орын ауыстыруына кедергі күштері (R_{plx}, R_{ply});

– F_k – домалатқыш катоктың топырақпен көлденең ілінісу күші.

Далалық сынақтарды «ОХМК» ЖШС (Шығыс Қазақстан облысы) базасында жүргіздік. Сынақтар 20 гектар учаскеде өтті. Топырақтың ылғалдылығы 5–10 см тереңдікте 20,3 %, ал қаттылығы 0,52 мПа болды. Егіс агротехникалық мерзімде орындалды. Сынау барысында келесі көрсеткіштерді анықтадық: меншікті тарту кедергісі, тұқымдарды себу тереңдігі, тұқымдардың егіс алаңы бойынша біркелкі бөлінуі.

Эксперимент барысында өзгермелі параметрлер мыналар болды: дискілердің жүру тереңдігі (40–80 мм), сеппе дискілерінің әсер ету бұрышы (5–20°), агрегаттың қозғалыс жылдамдығы (11 км/сағ дейін). Тәжірибе үш рет қайталанды.



1 – буындалған рама, 2 – домалатқыш каток 3 – алдыңғы диск,
4 – оң жақ себу дискілері, 5 – сол жақ себу дискілері
2-сурет – Көлденең бағыттағы себу секциясының
модельдеріне күштерді бөлу (алдыңғы көрініс)

Нәтижелер және талқылау

Теориялық зерттеулер процесінде егіс дискілерінің топырақпен жанасқан кезінде туындайтын кедергі күші, өзара біріккен бірнеше факторлармен шешілетіні анықталды. Оларға дискілердің геометриялық параметрлері (радиусы rп, қалыңдығы, қайрау бұрышы), режимдік параметрлері (жүріс тереңдігі hc, τ әсер ету бұрышы, қозғалыс жылдамдығы), сонымен қатар К жылжуының меншікті кедергісімен, ылғалдылығымен және қаттылығымен сипатталатын топырақтың физикалық-механикалық қасиеттері жатады.

Қозғалыс бағытына үшкір бұрышпен орнатылған сол жақ себу дискісі үшін көлденең және тік жазықтықтарда тең әсер ететін күштің үш құрамдас бөлігін анықтау үшін тқмендегідей өрнектер құрылды.

Ох осі бойынша құраушы (қозғалыс бағыты):

$$R_{плх} = S_{KDCA} \cdot K_у \cdot \sin(\tau_л) \quad (1)$$

Оу осі бойынша құраушы (көлденең бағыт):

$$R_{плу} = S_{KDCA} \cdot K_у \cdot cos(\tau_л) \quad (2)$$

мұндағы, $S_{КДСА}$ – топыраққа тереңдетілген диск сегментінің ауданы, м²;

$K_у$ – топырақтың жылжуға үлестік кедергісі, кН/м²;

$\tau_л$ – сол жақ себу дискісінің әсер ету бұрышы, град.

Сол жақ себу дискісіне әсер ететін күштің тік құраушысы мынадай арақатынастан айқындалды:

$$R_{\text{plz}} = \frac{R_{\text{plx}}}{\tan\left(\arcsin\sqrt{\frac{h_C}{r_П}}\right)} \quad (3)$$

Алынған өрнектердің құрылымын талдау R_{plx} (тартымдық кедергі) құрамдас бөлігінің дискінің топырақпен жанасу ауданына және жылжудың меншікті кедергісіне пропорционалды екенін көрсетеді. Бұл әсер ету бұрышына тәуелділігі синусоидалдық сипатта болатынын көрсетті. R_{ply} құрамдас бөлігі (көлденең күш) байланыс ауданына да қатысты, бірақ оның әсер ету бұрышымен байланысы косинусоидальды функциясымен анықталады. R_{plz} тік құраушысы γ бұрышының тангенсіне кері пропорционалды, ал ол енгізу тереңдігіне және диск радиусына байланысты.

S_{KDCA} байланыс алаңының өзі диск радиусы мен енгізу тереңдігінің күрделі функциясы болып табылатынын атап өту маңызды. Есептік схемада көрсетілгендей (1-сурет), енгізу тереңдігінің ұлғаюымен байланыс алаңы сызықтық емес өседі, бұл 3 және 4-суреттерде ұсынылған тәуелділіктердің сипатын түсіндіреді.

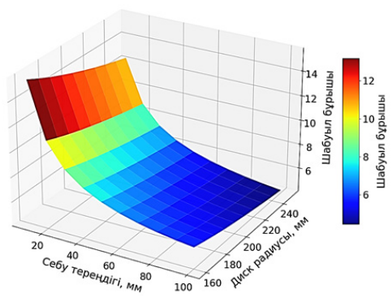
Сол жақ себу дискісінің әсер ету бұрышы (τл) – бұл борозданың сапасы мен тарту кедергісіне әсер ететін маңызды параметрлердің бірі.

Зерттеу кезінде біз бұл бұрыштың бірнеше шамаға тәуелді екенін байқадық. Атап айтқанда: дискінің радиусына, себудің тереңдігіне, тұқым өткізгішті орналастыруға қажетті сырғаның сыртқы бөлігінің еніне. Осы тәуелділікті көрсететін формула төмендегідей:

$$\tau_Л = arcsin\frac{K_Л}{2r_П \cdot cos\left(\arcsin\left(1-\frac{h_C}{r_П}\right)\right)} \quad (4)$$

3-суретте осы тәуелділіктің графигі келтірілген (сырғаның сыртқы бөлігінің ені 0,05 м болған жағдай үшін).

1-кестеде біз алынған нәтижелерді жүйелеп көрсеттік. Кестеден көрініп тұрғандай, жерді жырту бұрышы дискінің радиусы мен егіс тереңдігі артқан сайын кішірейеді. Біздің конструкцияда қабылданған параметрлер: диск радиусы – 0,20 м, себу тереңдігі – 0,07 м. Осы мәндер кезінде әсер ету бұрышы 5,7°-қа тең болды.



3-сурет - Радиус пен тереңдіктің жерді жырту бұрышына әсері (сырғыма ені – 0,05 м)

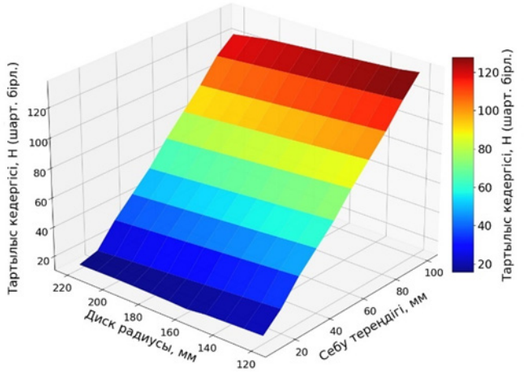
1-кесте - Себу дискісінің радиусы мен тереңдігінің жерді жырту бұрышына әсері

Дискінің радиусы, мм	Себудің тереңдігі, мм									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
160	15,63	11,17	9,25	8,15	7,42	6,90	6,51	6,21	5,98	5,80
170	15,14	10,81	8,95	7,87	7,16	6,65	6,26	5,97	5,74	5,56
180	14,69	10,48	8,67	7,62	6,92	6,42	6,04	5,75	5,52	5,34
190	14,28	10,18	8,42	7,39	6,71	6,21	5,84	5,56	5,33	5,14
200	13,90	9,91	8,19	7,19	6,52	6,04	5,67	5,39	5,15	4,97
210	13,55	9,65	7,97	6,99	6,33	5,86	5,50	5,22	4,99	4,81
220	13,22	9,42	7,77	6,81	6,17	5,70	5,35	5,07	4,85	4,67
230	13,92	9,20	7,59	6,65	6,01	5,56	5,21	4,94	4,72	4,53
240	12,64	9,00	7,42	6,49	5,87	5,42	5,08	4,81	4,59	4,41
250	12,37	8,81	7,26	6,35	5,74	5,30	4,96	4,69	4,48	4,30

1-кестедегі деректерге сүйене отырып, біз бірнеше қорытынды жасадық. Біріншіден, егіс тереңдігі 0,02 м-ден 0,10 м-ге дейін артқанда, әсер ету бұрышы айтарлықтай төмендейді. Орташа есеппен алғанда, ол 2-3 есеге кемиді. Екіншіден, диск радиусының әсері егіс тереңдігі аз болған кезде анағұрлым күшті болады. Мысалға, тереңдік 0,01 м болғанда, радиусты 0,16 м-ден 0,25 м-ге дейін арттырсақ, әсер ету бұрышы 15,63°-тан 12,37°-қа дейін төмендейді. Ал тереңдік 0,10 м болғанда, радиусын дәл солай өзгерген кезде әсер ету бұрышы 5,80°-тан 4,30°-қа дейін ғана төмендейді. Сонымен, егіс тереңдігі неғұрлым үлкен болса, диск радиусының өзгеруі әсер ету бұрышына соғұрлым аз әсер етеді.

Практикалық тұрғыдан қарасақ, егіс тереңдігі 0,04-0,10 м аралығында өзгерген кезде, әсер ету бұрышы 6,5°-тан 5,0°-қа дейін төмендейді. Бұл радиусы 0,20 м диск үшін алынған нәтиже. Мұндай шағын өзгеріс дискінің топырақпен әрекеттесу сипатына көп әсер етпейді. Сонымен қатар борозданың тұрақты қалыптасуы қамтамасыз етіледі. Тағы бір ескеретін маңызды жайт ол, біздің деректеріміз себудің нақты тереңдігіне қарай әсер ету бұрышын дұрыс таңдауға көмектеседі. Бұл себу секциясын теңдестіру кезінде қажет.

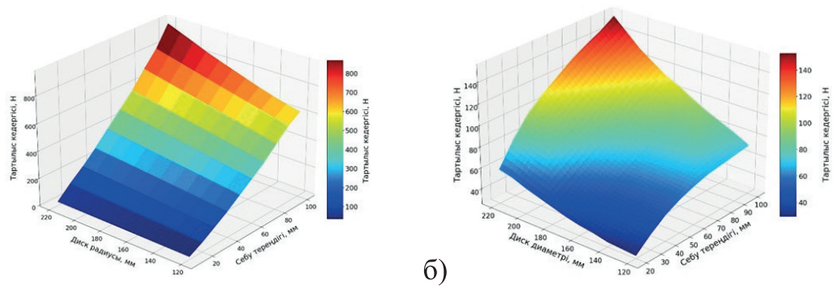
Осыдан кейін (1), (2) және (3) формулалары бойынша есептеулер жүргіздік. Сол жақ себу дискісіне әсер ететін күштерді X, Y, Z осьтері бойынша есептедік. Есептеулер кезінде мынадай параметрлер қабылданды: топырақтың жылжуының меншікті кедергісі K_y=35 кН/м^2, диск радиусы – 0,16-тен 0,25 м-ге дейін, енгізу тереңдігі – 0,04-тен 0,15 м-ге дейін. 4-суретте сол жақ себу дискісінің тартымдық кедергісінің оның радиусы мен енгізу тереңдігіне тәуелділігі көрсетілген (Ox осі бойынша). Тәуелділік сызықтық емес сипатта екені анықталды. Бұл енгізу тереңдігі ұлғайған кезде дискінің топырақпен түйісу ауданының сызықтық емес артуымен түсіндіріледі.



4-сурет – Ох осі бойынша сол себу дискісінің тартымдық кедергісінің оның радиусы мен топыраққа енгізу тереңдігіне тәуелділігі

Сандық талдау енгізу тереңдігі 0,08 м-ден 0,15 м-ге дейін ұлғайған кезде тарту кедергісі 55 Н-ға (радиусы 0,20 м диск үшін 85-тен 140 Н-ға дейін) өсетінін көрсетті. Бұл жайт кедергінің өсу қарқыны тереңдікпен ұлғаяды, яғни енгізудің бастапқы кезеңінде (0,04-0,08 м) өсім тереңдігінің ұлғаюы әрбір миллиметрге шамамен 1,0-1,2 Н құрайды. Ал тереңдік 0,10-0,15 м болғанда, тартым кедергісі 1,5-1,8 Н/мм-ге дейін артады. Диск радиусы да үлкен әсер етеді. Мысал келтірейік. Тереңдік 0,07 м болған кезде, радиусты 0,16 м-ден 0,25 м-ге дейін арттырдық. Нәтижесінде кедергі 70 Н-нан 110 Н-ға дейін өсті. Радиус үлкен болған сайын, дискінің топырақпен жанасу алаңы да үлкейеді. Сонымен қатар, күш қолдану иіні де артады. Осы екі себептен кедергі көбейеді. Бірақ үлкен радиустың оң жақтары да бар. Мысалы: үлкен диаметрлі дискілер тұрақты жүреді, олар кедергілерді жақсы еңсереді, олардың жұмыс ресурсы ұзағырақ болады. Сондықтан диск радиусын таңдау бірнеше факторды бірдей ескеруді қажет ететін маңызды міндет.

5-суретте сол жақ себу дискісіне әсер ететін кедергі күшінің тәуелділігі көрсетілген (Оу және Oz осьтері бойынша).



а) б)

5-сурет – Радиус пен ену тереңдігінің қарсылық күшіне әсері:
а) Оу осі бойынша; б) Oz осі бойынша

Ең үлкен күш – Оу осі бойынша (көлденең бағыт). Мысалы, диск радиусы 0,20 м және тереңдік 0,07 м болғанда, бұл көрсеткіш 510 Н-ға жетті. Салыстыру үшін: Ох осі бойынша (тартымдық кедергі) – 85 Н; тік құраушы (Oz) – 116 Н. Оу осі бойынша күш Ох-тан 6 еседен астам, ал тік құраушыдан 4,4 есе артық, яғни, егістік дискілерге көлденең жүктемелер басым түседі. Бұл маңызды конструктивтік нәтиже. Осыны ескере отырып егіс дискілерін бекіту элементтерін көлденең күштерге есептеу керек. Егіс секциясының рамасы көлденең бағытта берік болуы тиіс.

Rply көлденең күшінің енгізу тереңдігіне тәуелділігі іс жүзінде сызықтық. Пропорционалдық коэффициенті шамамен 6,5–7,0 Н/мм. Көлденең күштің негізгі бөлігі дискінің бүйір бетімен топырақтың ығысуынан пайда болады. Ал бүйір бетінің ауданы енгізу тереңдігіне сызықтық тәуелді. Сондықтан күш те сызықтық сипатта өседі. Сол параметрлер кезінде R_{plz} тік құраушысы 116 Н-ды құрады. Бұл тартымдық кедергіден біршама артық, бірақ көлденең жүктемеден әлдеқайда аз. R_{plz}-дің енгізу тереңдігіне тәуелділігі де сызықтыққа жақын. Дегенмен, оның өсу қарқыны (шамамен 1,2–1,5 Н/мм) көлденең құраушыға қарағанда айтарлықтай төмен. Сол жақ егіс дискісіне әсер ететін күштердің арақатынасын көрсету үшін біз 2-кестені дайындадық. Онда жұмыстың өзіне тән режимдері үшін есептік мәндер келтірілген.

2-кесте – Сол жақ себу дискісіне әсер ететін күштердің арақатынасы (параметрлері: r = 0,20 м, K_y = 35 кН/м²)

Себу тереңдігі, м	R_{plx}, Н	R_{ply}, Н	R_{plz}, Н	R_{ply} / R_{plx}	R_{plz} / R_{plx}
0,04	45,0	270,0	62,0	6,00	1,380
0,05	58,0	348,0	80,0	6,00	1,380
0,06	71,0	426,0	98,0	6,00	1,380
0,07	85,0	510,0	116,0	6,00	1,360
0,08	98,0	588,0	134,0	6,00	1,370
0,09	112,0	672,0	152,0	6,00	1,360
0,10	126,0	756,0	170,0	6,00	1,350

2-кестедегі деректерден көрініп тұрғандай, егіс тереңдігі өзгерген кезде де күш құраушыларының арақатынасы тұрақты болып қалады. Атап айтқанда: көлденең күш тарту кедергісінен шамамен 6 есе артық;

тік құраушы тарту кедергісінен 1,35–1,38 есе артық. Бұл арқылы қарапайым есептеулер кезінде де конструкция элементтеріне түсетін жүктемелерді бағалауға болады. Ол үшін пропорционалдық коэффициенттерін пайдалану жеткілікті. Тағы бір маңызды фактор – топырақтың физикалық-механикалық қасиеттері. Дәл осы қасиеттер дискілердің топырақпен әрекеттесуінің күштік сипаттамасын анықтайды. Біздің формулаларда бұл әсер Ку параметрі арқылы ескерілді. Бұл топырақтың жылжуға меншікті кедергісі. Нақты егіс алаңында Ку мәні біршама диапазонда өзгеруі мүмкін. Ол мына факторларға байланысты: топырақтың түрі, ылғалдылығы, тығыздығы, топырақ құрамында өсімдік қалдықтарының болуы.

3-кестедегі деректерге сүйенсек, әзірленген себу секциясының тартымдық кедергісі әр түрлі фонда әркелкі. Түйіршікті фонда бұл көрсеткіш –12,5 кН. Ал булы фонда –11,9 кН. Айырмашылық шамамен 5 % (яғни, булы фонда кедергі

төмендеу). Себебі өсімдік қалдықтары көп жерде жұмыс істегенде, оларды кесуге және еңсеруге тура келеді. Сондықтан жылжуға тиімді үлестік қарсылық артады. Осыған ұқсас нәтижені біз Crucianelli Pionera 2717 сериялық сепкішінде де байқадық.

3-кесте – Меншікті тартымдық кедергінің салыстырмалы мәндері

Көрсеткіш	Түптелген фон		Буланған фон	
	Эксперименттік секция	Crucianelli Pionera 2717	Эксперименттік секция	Crucianelli Pionera 2717
Машинаның тарту кедергісі, кН	12,50	13,90	11,90	13,10
Меншікті тарту кедергісі, кН/м	3,44	3,96	3,19	3,64

Осылайша, топырақтың физикалық-механикалық қасиеттерін және оның бетіндегі өсімдік қалдықтарын ескеру - міндетті шарт. Бұл әсіресе егіс секцияларын жобалағанда және олардың энергетикалық көрсеткіштерін болжағанда маңызды. Әзірленген себу секциясының басты ерекшелігі - алдыңғы дискіні асимметриялық түрде орнату. Яғни, оны раманың бойлық осіне қатысты ығыстырып бекітуге болады. Мұның артықшылығы: конструкция жеңілдейді және металл сыйымдылығы төмендейді. Бірақ бір ескерту бар: мұндай шешім тік сызықты қозғалыстың тұрақтылығын қосымша тексеруді талап етеді.

Орнықтылықты бағалау үшін біз күштер моментінің теңдеуін құрдық. Бұл теңдеу буындалған раманың бұрылу осіне қатысты жасалды. Есептеу схемасында мына күштер ескерілді: R_{zdx} – алдыңғы дискіге әсер ететін курстық кедергі; сол және оң себу дискілерінің орын ауыстыруына кедергі күштері (R_{plx}, R_{ply}); F_k – домалатқыш катоктың топырақпен көлденең ілінісу күші.

Сәттердің теңдеуі мына түрде жазылады:

$$F_k L_k + R_{\text{ply}} L_{pl} + R_{ppx}(B - Y) = R_{zdx} l_z + R_{plx} Y + R_{ppy} L_{pp} \quad (5)$$

Көлденең жазықтықтағы сәттердің қосымша теңдеуі:

$$R_{plz} Y = R_{ppz}(B - Y) + R_{zdz} L \quad (6)$$

Біз алынған тәуелділіктерді талдап көрдік. Нәтижесінде мынаны байқадық: оң жақ себу дискісінің әсер ету бұрышын 5–20° аралығында өзгерткеннің өзінде, кедергінің көлденең күштері өте аз өзгереді (29 Н-нан аспайды). Бұл – бағамдық тұрақтылыққа әсер ететін негізгі фактор.

Мұны келесі жайт растайды. Тұрақтылықты қамтамасыз ететін негізгі күш – домалатқыш катоктың топырақпен ілінісу күші (Fk). Ол мына формуламен анықталады:

$$F_k = P_k \cdot \mu \quad (7)$$

(6) теңдеуден Y координатын табуға болады. Бұл - раманың бойлық осінен сол жақ дискіге әсер ететін тең әсерлі күштің түсу нүктесіне дейінгі қашықтық:

$$Y = \frac{R_{\text{ppz}} B + R_{\text{zdz}} L}{R_{\text{plz}} + R_{\text{ppz}}} \quad (8)$$

Осы (8) өрнекті (5) теңдеуге қойсақ, тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін қажетті ілінісу күшін анықтайтын формула шығады:

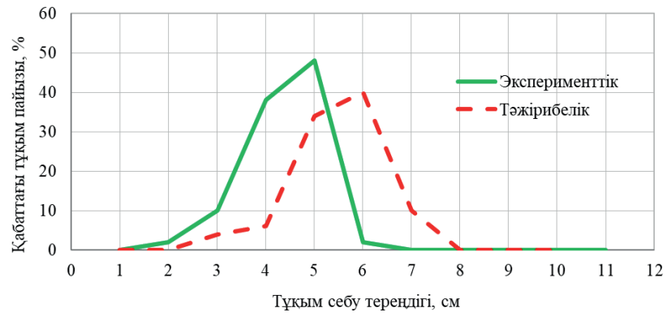
$$F_k L_k + R_{ply} L_{pl} + R_{ppx} B - \left(R_{ppx} + R_{plx}\right) \cdot \frac{R_{ppz} B + R_{zdz} L}{R_{plz} + R_{ppz}} - R_{pdx} l_z - R_{ppy} L_{pp} = 0 \quad (9)$$

(9) өрнектен көрініп тұрғандай, қажетті ілінісу күші көптеген факторларға байланысты. Атап айтқанда: секцияның жұмыс органдарына әсер ететін барлық күштер, олардың геометриялық орналасуы. Біз сондай-ақ егіс тереңдігінің катокты жерге қысу күшіне әсерін бағаладық. Ол үшін μ ілінісу коэффициентінің әртүрлі мәндерінде есептеулер жүргіздік.

Нәтижесінде, егіс тереңдігі ұлғайған сайын, қажетті қысу күші сызықтық түрде өседі. Мысалы: құрғақ топырақ үшін (μ = 0,5) – қысу күші 0,04–0,10 м тереңдік аралығында 140-430 Н аралығында болуы керек. Ылғалды топырақ сияқты қолайлы жағдайда (μ = 0,7) – бұл көрсеткіш 100–300 Н-ға дейін төмендейді.

Біздің теориялық модельдеріміздің дұрыстығын тексеру үшін біз «ОХМК» ЖШС алқабында далалық эксперименттер жүргіздік. Тәжірибе 20 га егіс алқабында өтті. Топырақтың ылғалдылығы 5–10 см тереңдікте 20,3 %, ал қаттылығы 0,52 мПа болды. Егіс агротехникалық мерзімде орындалды. Нәтижелер: егіс дискілерін 6–10° бұрышқа орнатқан кезде, тұқымдарды бітеу тереңдігі 70±1 мм болды. Бұл агротехникалық талаптарға толық сәйкес келеді.

6-суретте эксперимент кезінде алынған нәтижелер көрсетілген. Деректерді талдағанда мынаны байқадық: тұқымдардың 82,5–83,3 %-ы берілген тереңдікке (70 мм) сәйкес келеді. Ауытқулар ұ1 см-ден аспайды. Тереңдіктің орташа квадраттық ауытқуы – 11,3 мм-ден кем. Бұл көрсеткіш егіс секциясының жұмыс процесі өте тұрақты екенін және оны дәл реттеуге болатынын көрсетеді.



6-сурет – Тұқымдарды бітеу тереңдігі (эксперимент нәтижелері)

3-кестеде әзірленген себу секциясы мен Crucianelli Pionera 2717 сериялық сепкішінің нәтижелері салыстырылған. Түйіршікті фонда: әзірленген секцияның меншікті тартымдық кедергісі –3,44 кН/м; сериялық сепкіште –3,96 кН/м; айырмашылық –13,1 % (біздікі төмен).

Бу аясында: әзірленген секция –3,19 кН/м; сериялық сепкіш –3,64 кН/м; бұл жолы айырмашылық 12,4 % болды.

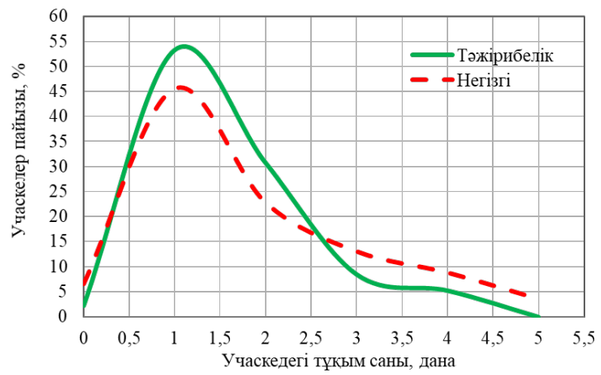
Қорыта келе, біздің ұсынған конструкциялық шешімдеріміз тиімді деп санаймыз. Олар себу процесінің энергия сыйымдылығын төмендетуге мүмкіндік береді. Негізгі екі себеп бар: себу дискілерінің әсер ету бұрышы оңтайландырылды және алдыңғы диск топырақты алдын ала қопсытады (құрама қосқыштар схемасы). Далалық сынақтар барысында алдыңғы дискінің асимметриялық жинақталуы катокты қысудың есептік параметрлерін сақтау кезінде қозғалыс тұрақтылығының бұзылуына әкелмейтіндігі расталды. Секцияның бұрылмай тұрақты жүруін қамтамасыз ететін домалатқыш катокты мәжбүрлі қысу күші эксперименттік жағдайларда 70–428 Н диапазонында болды. Тік сызықты қозғалыстан ауытқу 100 м ұзындыққа 5 см аспады, ол далалық жағдайлар үшін қолайлы болып табылады.

Тұқымдарды егіс алаңы бойынша біркелкі бөлу себу секциясының жұмыс сапасының қосымша көрсеткіші болып табылады. 4-кестеде тұқымдардың біркелкі бөлінуін анықтау нәтижелері берілген. Деректерді талдау эксперименттік секциядағы егілмеген учаскелердің саны 2,25 % құрайтынын көрсетеді, яғни сериялық сепкіштен 2,9 есе аз (6,5 %). Эксперименттік секцияда тұқымның оңтайлы мөлшері (1–2 дана) бар учаскелердің үлесі 84 % құрайды, ол базалық нұсқаға қарағанда 15,75 % жоғары. Тұқымдардың біркелкі бөлінбеуін бағалайтын вариация коэффициенті эксперименттік секция үшін 58,95 % құрады, ал сериялық сепкіш үшін 84,4 %.

4-кесте – Тұқымдардың біркелкі бөлінуін анықтау нәтижелері

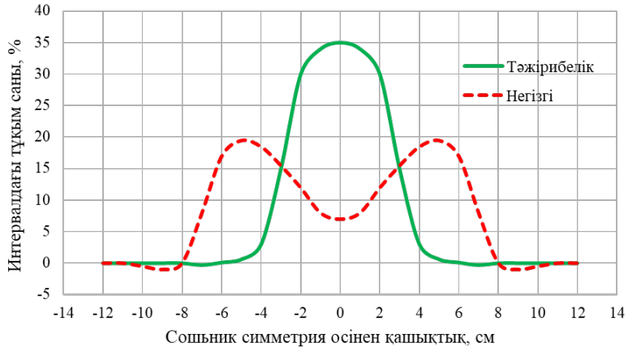
Учаскедегі тұқым саны, шт.	Учаскелер пайызы, %	
	Эксперименттік егіс секциясы	Crucianelli Pionera 2717 егіс секциясы
0	2,25	6,50
1	53,25	45,50
2	30,75	22,75
3	8,50	13,00
4	5,25	8,75
5	0	3,50

7-сурет – Тұқымдарды бөлу полигоны (әзірленген конструкция мен сериялық сепкішті салыстыру). Бұл суретте біздің жаңа конструкциямыздың артықшылықтары анық көрінеді. Әзірленген секцияда тұқымдардың бөлінуі бірқалыпты. Көп жағдайда 1-2 тұқым артық түсетін учаскелер басым. Ал сериялық сепкіште жағдай басқа. Онда екі түрлі мәселе бар, біріншісі мүлдем тұқым түспеген учаскелер көп, екіншісі 3–5 тұқым түскен учаскелердің үлесі де жоғары. Сонымен, біздің құраған конструкция тұқымдарды біркелкі таратады.



7-сурет – Тұқымдардың егіс алаңы бойынша таралуы
(екі нұсқаны салыстыру)

8-сурет - Тұқымдардың егіс жолағының ені бойынша таралуы. Біз екі нұсқаны салыстырдық: эксперименталдық секция мен сериялық сепкіш. Нәтижесінде мынаны байқадық: біздің секцияның себу тетігі тұқымдарды біркелкі таратады. Ал сериялық сепкіште бұл көрсеткіш нашар. Бұл өсімдіктердің кейінгі өсуіне оң әсер етеді. Себебі тұқымдар біркелкі таралған сайын, әр өсімдікке көбірек қоректік заттар мен ылғал жетеді.



8-сурет – Тұқымдардың себу жолағының ені бойынша таралуы
(екі нұсқаны салыстыру)

Біз өнімділікті бағалаудың белгілі әдістемелерін қолдандық. Содан кейін Crucianelli Pionera 2717 сериялық сепкіші мен біздің эксперименттік секциямызды салыстырдық. Нәтижелеріміз 5-кестеде келтірілген. Кестеден көрініп тұрғандай, біздің секцияның көрсеткіштері жоғары: 1000 өсімдік тұқымының орташа

шоғырлануы, олардың орташа салмағы. Екі көрсеткіш бойынша да эксперименттік секция сериялық сепкіштен асып түсті.

5-кесте – Өнімділікті құрылымдық талдау нәтижелері

Көрсеткіштің атауы	Crucianelli Pionera 2717	Эксперименттік себу секциясы
1 метр жердегі өсімдіктер саны, шт.	329,0	372,0
Өнімді өсімдіктердің саны, шт.	302,0	347,0
Өсімдіктердің биіктігі, см	40,30	43,90
Масақтың ұзындығы, см	4,40	5,10
Масақтағы дәндер саны, шт.	14,10	15,50
1000 дәннің массасы, г	42,20	44,10
100 өсімдіктегі дәндер массасы, г	59,80	64,80
Биологиялық өнім, ц/га	39,60	43,80

Эксперименттік секцияның биологиялық өнімділігі –43,8 ц/га болды. Бұл базалық нұсқамен салыстырғанда (39,6 ц/га) 4,2 ц/га жоғары. Процентпен алғанда – 10,6 % артық. Неге өнімділік өсті, себебі тұқымдар біркелкі таралды және тұқымды бітеу тереңдігі тұрақты болды. Осы екі фактор өсімдіктердің жақсы дамуына жағдай жасады.

Қорытынды

Эксперимент нәтижелері бойынша біз мынадай қорытындыларға келдік.

1. Тұқым бітеу тереңдігі. Жаңа егіс секциясы тұқымдарды тұрақты тереңдікке (70±1 мм) себуді қамтамасыз етеді. Тексеру кезінде тұқымдардың 82,5–83,3 % дәл осы тереңдікке салынған. Ауытқу ±1 см-ден аспады.

2. Энергия тиімділігі. Біздің секцияның меншікті тарту кедергісі Crucianelli Pionera 2717 сериялық сепкішімен салыстырғанда 12–13 % төмен болды. Бұл – ұсынылып отырған жаңа конструкциялық шешімдердің энергия тиімділігін растайды.

3. Тұқымдардың біркелкі таралуы. Эксперименттік секция тұқымдарды егіс алаңына біркелкі таратады. Нақтырақ айтсақ: себілмеген жерлердің үлесі 2,9 есеге азайды, сапалы себілген тұқымдардың үлесі базалық нұсқамен салыстырғанда 15,75 % артты.

Біз егіс кешенінің құрамындағы аралас егіс секциясының параметрлерін теориялық және эксперименттік тұрғыдан зерттедік. Нәтижесінде мынадай қорытындыларға келдік.

1 Конструкциялық схема. Біз себу секциясының жаңа конструкциясын әзірледік. Ол мына элементтерден тұрады: біріктірілген көтергіш рама, алдыңғы және екі бүйірлік себу дискісі, қосарланған ұшы бар жебелі табан. Басты ерекшелігі, алдыңғы дискіні раманың бойлық осіне қатысты асимметриялық түрде орнатуға болады. Осының арқасында секцияның жалпы ұзындығы 15–20 % қысқарды. Сонымен қатар, металл сыйымдылығы төмендеді.

2 Күштік сипаттамалар. Біз себу дискілерінің топырақпен әрекеттесуін зерттеп, аналитикалық тәуелділіктер шығардық. Нәтижелеріміз: көлденең құраушы (R_{ply}) тартым кедергісінен (R_{plx}) 6 есе артық; тік құраушы (R_{plz}) тартым кедергісінен

1,35–1,38 есе артық. Бұл қарапайым есептеулер кезінде пропорционалдық коэффициенттерін пайдалануға мүмкіндік береді.

3 Әсер ету бұрышы. Теория бойынша біз 6–10° диапазонын ұсындық. Эксперименттер бұл диапазонның дұрыстығын растады. Біздің конструкцияда қабылданған параметрлер: диск радиусы – 0,20 м; себу тереңдігі – 0,07 м. Осы мәндер кезінде әсер ету бұрышы 5,7° тең. Бұл бороздың тұрақты қалыптасуын және аз тартым кедергісін қамтамасыз етеді.

4 Алдыңғы дискіні асимметриялық құрастыру кезінде себу секциясының түзу сызықтық қозғалысының орнықтылық шарттары айқындалды. Курстық орнықтылықты қамтамасыз ететін негізгі фактор домалатқыш катоктың топырақпен ілінісу күші болып табылады. Катокты мәжбүрлі қысу күші егіс тереңдігіне және ілінісу коэффициентіне тікелей байланысты екендігі, яғни шамасы 70–428 Н диапазонында болуы тәжірибелік түрде расталды.

5 Әзірленген теориялық тәуелділіктер мен эксперименттік негізделген параметрлер Қазақстанның жағдайлары үшін қолданыстағы егіс кешендерін жаңғырту және жаңаларын құру кезінде пайдаланылуы мүмкін. Бұл өсімдік шаруашылығы өнімдері өндірісінің тиімділігін арттыруға және энергия шығындарын 10–13 % азайтуға мүмкіндік береді.

REFERENCES

1 **Spasin, I. A.** Agricultural machinery and technologies. Moscow : Kolos; 2006.

2 **Pimenov, A. V.** Choosing a no-till seeder. Agricultural Consultant, 2013. – 1(6): P. 14–16.

3 **Aduov, M. A., Kapov, S. N., Nukusheva, S. A.** Structural Analysis of Seeding Process and Mineral Fertilizers Introduction in the Soil // Biomedical & Pharmacology Journal. – 2015. – Vol. 8. – № 2. – P. 675–682.

4 **Petrovts, V. R.** Innovative developments of disc coulter units for seed drills. Gorki: BGSHA; 2019.

5 **Bulavintsev, R. A.** Analysis of designs of coulters of modern no-till seeders for direct sowing of agricultural crops. Agrotechnics and Energy Supply, 2018; 2(19): 85-91.

6 **Vavilov A, Kim A, Guryanov G, Likunov A, et al.** New technology of the steel fiber manufacturing from technogenic waste. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2020. – 10(3): P. 611–622. – https://doi.org/10.24247/ijmperdjun202056.

7 **Pokrovsky, G. I.** Study of soil compression at different deformation speeds. Tractors and Agricultural Machines, 2013. – 6: P. 34–36.

8 **Stanevsky, V. P.** On the physical essence of the influence of speed on soil cutting force. In: Mining, Construction and Road Machines Minsk: Technika. – 2016.

9 **Moldakhanov B., Doudkin M., Kim A., Rogovsky V., Andryukhov N.** Experimental study of the snow removal process by helical blade of the milling feeder. Journal of Applied Engineering Science, 2023. – 21(1), P. 157–166. – https://doi.org/10.5937/jaes 0-39760

10 CN210406119U. Alfalfa grass seeder. – 2020-04-28. 01B 49/06.

11 AU 2009217232. Disk planter for applying fertilisers and seeds to soil. – 2012.07.12. A01B 49/06.

12 CA 2528468C. Method and Apparatus of Agricultural Field Seeding. – 2010.05.18. A01B 49/06.

13 **Yousif, R., Bachy, B.** On the Laser Spot Welding:Experimentation and Multi-Criteria Optimization Based on TOPSIS-Quality Loss Function Approach, (2025) International Review of Mechanical Engineering (IREME), 19 (4). – P. 203–213. – https://doi.org/10.15866/ireme.v19i4.26657

14 **Beylergil, B.** Hoop Strength Optimization of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Rings Using Taguchi Method, (2024) International Review of Mechanical Engineering (IREME), 18 (5). – P. 256–265. – https://doi.org/10.15866/ireme.v18i5.24978

15 **Vyalov, S. S.** Rheological foundations of soil mechanics. Moscow: Higher School; 2018.

28.03.26 ж. баспаға түсті.
01.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
12.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Д. С. Елеманов[1], В. В. Роговский[2], Ж. С. Калибек[3]
[1,2,3]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 28.03.26.
Поступило с исправлениями 01.04.26.
Принято в печать 12.05.26.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОСЕВНОЙ СЕКЦИИ

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию конструктивных параметров комбинированной посевной секции для посевного комплекса. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности и ресурсосбережения при возделывании зерновых культур в условиях Восточно-Казахстанской области. Предложена модернизированная конструкция посевной секции, включающая сочлененную несущую раму, передний режущий диск, два боковых посевных диска, плоскорежущую стрельчатую лапу с раздвоенным острием и прикатывающий каток. Ключевой особенностью является возможность асимметричного монтажа переднего диска относительно продольной оси рамы, что позволяет сократить общую длину секции и снизить ее металлоемкость. Теоретически определены зависимости для расчета сил, действующих на рабочие органы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, с учетом радиуса дисков, глубины хода и угла атаки. Получены аналитические выражения для определения составляющих тягового сопротивления левого и правого посевных дисков. Экспериментально установлено, что применение

разработанной конструкции обеспечивает стабильную глубину заделки семян (70±1 мм) при варьировании угла атаки посевных дисков в диапазоне 6–10°. Определено, что усилие принудительного прижатия прикатывающего катка, необходимое для обеспечения курсовой устойчивости секции, составляет 70–428 Н. Результаты исследований могут быть использованы при модернизации существующих и создании новых посевных комплексов для условий Казахстана.

Ключевые слова: посевная секция, комбинированный сошник, плоскорежущая лапа, тяговое сопротивление, угол атаки, устойчивость хода.

D. S. Yelemanov[1], V. Rogowski[2], Zh. S. Kalibek[3]
[1,2,3]East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 28.03.26.
Received in revised form 01.04.26.
Accepted for publication 12.05.26.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS AND OPERATING MODES COMBINED SEED SECTION

The article presents the results of theoretical and experimental studies to substantiate the structural parameters of the combined inoculum section for the inoculum complex. The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency and resource saving in the cultivation of grain crops in the conditions of the East Kazakhstan region. The modernized design of the sowing section is proposed, which includes an articulated bearing frame, a front cutting disk, two side sowing disks, a flat lancet hoe with a bifurcated point and a rolling roller. The key feature is the possibility of asymmetric mounting of the front disk relative to the longitudinal axis of the frame, which makes it possible to reduce the total length of the section and reduce its metal consumption. Theoretically, dependencies are determined to calculate forces acting on working elements in horizontal and vertical planes, taking into account the radius of the disks, depth of travel and angle of attack. Analytical expressions are obtained to determine components of traction resistance of left and right seed disks. It was experimentally established that the use of the developed design provides a stable depth of seed embedding (70 ± 1 mm) with varying the angle of attack of the seeding disks in the range of 6–10°. It was determined that the forced pressing force of the rolling roller, necessary to ensure the directional stability of the section, is 70–428 N. The research results can be used to modernize existing and create new sowing complexes for the conditions of Kazakhstan.

Keywords: feed extruder, two-way screw shaft, screw sections, inter-turn distance, counterflow of the mixture, spinnerets.

ҒТАМР 55.39.39

https://doi.org/10.48081/BGQF2218

Қ. К. Елемесов[1], М. К. Мырзақұлов[2], *Д. Ж. Басқанбаева[3], Ж. К. Татаева[4], Н. Е. Көлдеев[5]

[1,2,3,4,5]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3262-6249

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2874-1090

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5906-1040

*e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university

КІРІС ҚЫСЫМЫНЫҢ АУЫТҚУЫ БАР БҰРАНДАЛЫ КОМПРЕССОРДАҒЫ КӨП КОМПОНЕНТТІ ГАЗДЫ СЫҒУ ПРОЦЕСТЕРІН CFD МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада синтетикалық маймен толтырылған бұрандалы компрессорда көпкомпонентті табиғи газды сығу кезіндегі процестер кіріс қысымының тұрақсыз тербелістері жағдайында сандық тәсілмен зерделенген. Зерттеудің өзектілігіне келсек газ тасымалдау жүйелеріндегі жұмыс атқаратын компрессорлардың кезеңді және кездейсоқ сипаттағы кіріс параметрлері ауытқуы кезіндегі жұмыс күйін нақтырақ болжау мәселесімен байланысты.

Сандық модельдеу есептеуіш гидродинамика (CFD) негізінде жүргізілді: бұрандалы жұптың нақты геометриясы, саңылаулардағы ағып кетулер, турбуленттік әсерлер және көпкомпонентті қоспаның термодинамикалық қасиеттері жылжымалы есептік торлар арқылы ескерілді. Кіріс қысымының уақытша өзгерісі мерзімді және шартты кездейсоқ өзгеріс үлгілері арқылы берілді.

Батыс Қазақстан кен орындарына тән газ қоспасы (CH_4 78%, C_2H_6 8%, C_3H_8 4%, C_4H_{10} 2%, N_2 5%, CO_2 3%) үшін стационарлық, гармоникалық (f=12 Гц, Δp=±12%) және стохастикалық кіріс режимдерінде есептеулер жүргізіле отырып, тұрақсыз сору режиміндегі пульсациялық күшею коэффициенті K_p = 1,95–2,30 деңгейіне жеткені, көлемдік өнімділіктің 8–10%-ға кемігені, политроптық ПӘК-тің 7–9%-ға төмендегені және меншікті жұмыстың 6,3–8,9%-ға артқаны анықталды. Газ компоненттік құрамының энергетикалық сипаттамаларға ықпалы сандық бағаланып, нәтижелер компрессорлық жабдықтың жұмыс режимдерін оңтайландыруға арналған инженерлік шешімдер үшін қолданылуы мүмкін екені анықталды.

Кілтті сөздер: бұрандалы компрессор, көпкомпонентті табиғи газ, бейстационар сығу, кіріс қысымының тербелістері, CFD-модельдеу, энергетикалық тиімділік, пульсация күшею коэффициенті.

Кіріспе

Газды сығу процестерінің тиімділігі мен үздіксіз жұмысын қамтамасыз ету қазіргі өнеркәсіптің маңызды міндеттерінің бірі болып қала береді. Компрессорлық жабдық мұнай-газ саласында, химия және энергетика өнеркәсібінде, сондай-ақ табиғи газды тасымалдау желілерінде кеңінен пайдаланылады. Технологиялық процестердің күрделенуі, қиын игерілетін көмірсутек кенорындары санының өсуі және газ тасымалдау жүйелерінің кеңеюі компрессорлық қондырғылардың жұмыс принциптерін терең және жүйелі зерделеуді қажет етеді [1, 197–210-бб.; 2, 85–96-бб.].

Кіріс газ параметрлері – қысым, температура және компоненттік құрам – тербеліске ұшырайтын тұрақсыз жұмыс күйіндегі компрессор жұмысы ерекше зерттеу қызығушылығын тудырады. Мұндай жағдайларда орташаланған немесе тұрақты жорамалдарға сүйенетін дәстүрлі есептеу тәсілдері жеткілікті дәлдік бере алмайды және ішкі процестердің нақты динамикасын толық сипаттамайды [3, 659–671-бб.; 4, 1058–1068-бб.; 5, 608–615-бб.].

Күрделі құрамды қоспалардағы газ сығылуын модельдеуде үш негізгі тәсіл қолданылды: цифрлық, нумерикалық, компьютерлік. Тәжірибе әдісінде нәтижелер жоғары дәлдікпен ерекшеленгенімен, материалдық шығындар, масштабтаудың қиындығы және жұмыс камераларындағы ағын сипаттамаларын тікелей бақылаудың шектеулілігі оны барынша қолдануға кедергі келтірді [6, 401–426-бб.].

Аналитикалық тәсілдер есептеуді жеделдеткенімен газдың мінсіздігі, ағынның салыстырмалы тұрақтылығы және турбуленттік әсерлердің елеусіздігі туралы жеңілдетілген тұжырымдар талап етеді. Бұл олардың күрделі құрамдағы қоспалар мен айнымалы жұмыс күйлеріне қолдануды шектейтінін көрсетеді. Осыған байланысты негізгі басым бағыт ретінде есептеуіш гидродинамикасын (CFD – Computational Fluid Dynamics) сандық модельдеу таңдалып алынды. Жоғарыда айтылған тәсілдің басты ерекшелігі - жұмыс элементтерінің геометриясын, ілінісу кинематикасын, жылу-масса алмасу процестерін, турбуленттік факторларды және қоспа термодинамикасының уақыттық эволюциясын үйлестіре отырып, модельдеу мүмкіндігінде болды [7, 2073–2082-бб.; 8, 124–141-бб.; 9, 633–647-бб.; 10, 470–482-бб.].

Алайда CFD-әдісін іс жүзінде қолдану бірнеше маңызды шектеулермен байланысты екенін атап өту қажет, үлкен есептеу қуатының талап етілуі, қозғалмалы торларды құрудың техникалық күрделілігі, өтпелі жұмыс режимдерінде шекаралық шарттарды дәл қоюдың қиындығы, сондай-ақ әртүрлі сығылғыштық қасиеттері бар көпкомпонентті газ қоспаларына арналған модельдердің жеткілікті деңгейде сәйкестігінің дәлелденбеуі - осы факторлардың ауқымды таралуын тежейді. Сонымен қатар, ғылыми басылымдардағы зерттеулердің басым бөлігі қарапайым бір немесе екі компонентті қоспаларды және стационарлық жұмыс режимдерін ғана қамтитынын ескеретін болсақ, бұл магистральдық компрессорлық станциялардың нақты пайдалану жағдайларын толық көрсетуге жеткіліксіз екенін байқауға болады [11, 84–96-бб.; 12, 95–105-бб.; 13, 1163–1179-бб.; 14, 766–783-бб.].

Біздің еліміз үшін бұл мәселенің маңыздылығын есепке алатын болсақ, мемлекетіміздің экономикасы көмірсутек шикізатын өндіруге, өңдеуге және тасымалдаумен етене байланысты екенін ескеруіміз қажет. Батыс Қазақстандағы кен орындарындағы ішкі және экспорттық бағыттармен жалғастыратын магистральдық желілердегі айнымалы жүктемелер, маусымдық тұтыну ауытқулары және қабат қысымының тербелістері жағдайында жұмыс атқаратынын атап өткен жөн. Қазақстандық табиғи газдың метанмен қатар этан, пропан, бутандар, азот және көмірқышқыл газын қамтитын күрделі құрамдар сығу үдерісіне, жылу бөлінуіне және энергия шығынына елеулі ықпал етуде [17; 18, 189–200-бб.; 19, 405–412-бб.; 20, 1529–1542-бб.].

Осы жағдайларда бұрандалы компрессорлардың жұмыс сипаттамаларын дәл болжау пайдалану күйлерін жетілдіруге, меншікті энергия тұтынуды азайтуға және жабдықтың сенімділігін арттыруға мүмкіндік беретінін ескерген жөн. Бұл мәселелер еліміздің энергетикалық қауіпсіздігі мен технологиялық дербестігімен тікелей байланысты [17; 18, 189–200-бб.; 19, 405–412-бб.; 20, 1529–1542-бб.].

Зерттеудің ғылыми жаңалығын ғылыми түрде тұжырымдайтын болсақ:

1. Батыс Қазақстан кен орындарына тән алты компонентті газ қоспасы (CH_4–C_2H_6–C_3H_8–C_4H_{10}–N_2–CO_2) үшін жылжымалы торлы CFD-моделі алғаш рет мерзімді және стохастикалық кіріс режимдерінде бейстационар шекаралық шарттармен бірге қолданылды.

2. Жұмыс камераларындағы пульсацияның күшею коэффициентінің Kp = 1,95–2,30 мәнімен сандық сипаттамасы алынып, оның туындауының физикалық механизмі (фазалық кешігу, газодинамикалық резонанс, нақты газ сығылғыштығы) бірінші рет кешенді түрде талданды.

3. Политроптық ПӘК-нің кіріс амплитудасының бейсызықты сезімталдығы анықтала отырып, Δp > 0,045 МПа болған кездегі деградация қарқыны жеделдейтін шекті мән тіркелді.

4. Газдың ауыр компоненттер концентрациясы мен бейстационар сығымдау жағдайларының энергетикалық сипаттамаларға бірлескен ықпалы сандық бағаланып, ηp-ке қосымша 0,03 бірлікке төмендеуі дәлелденді.

Материалдар мен әдістері

Қойылған зерттеу мақсатына сәйкес айнымалы кіріс шарттары жағдайында бұрандалы компрессорда көпкомпонентті газды бейстационар сығу ерекшеліктерін зерделеуге бағытталған есептік-эксперименттік жұмыстар кешені жүзеге асырылды. Орындалған зерттеулердің жалпы жоспары компрессордың геометриялық және есептік модельдерін құруды, кірістегі қысымның өзгеруінің айнымалы заңын беруді, жұмыс процестерін сандық модельдеуді және алынған термогазодинамикалық параметрлердің таралуын талдауды, сондай-ақ нәтижелерді жеңілдетілген инженерлік әдістемелер бойынша есептеулермен салыстыруды қамтыды.

Жүргізілген жұмыс қолданбалы сипатқа ие бола отырып агрегаттың базалық кинематикалық сұлбасын өзгертпей әрі конструкциясын толық ауқымды оңтайландырусыз, кіріс қысымының тербелістеріндегі сығу процесінің

интегралдық және жергілікті сипаттамаларына әсерін бағалаудың локалдық міндетін шешуге бағытталды.

Модельдеу объектісі ретінде Atlas Copco GHS VSD+ және GEA Grasso RXF 85 агрегаттарымен конструктивтік тұрғыдан салыстырмалы маймен толтырылған бұрандалы компрессор таңдалды: жетекші ротор диаметрі 315 мм, жетектелетін ротор диаметрі 255 мм, бұрандалы жұп ұзындығы 420 мм, беріліс қатынасы 1,6-ға тең. Жетекші ротордың айналу жиілігі 2950 айн/мин (400 кВт электрқозғалтқыш).

Жұмыс органдарының геометриясы параметрленген 3D-модель негізінде қалыптастырыла отырып, шеткі және радиалдық саңылаулар 80–120 мкм, көшіру терезесінің ауданы 0,018 м², айдау терезесі 0,012 м²; бұрандалы аралық көлемі $6,4\times10^{-4}$-тен $1,9\times10^{-4}$ м³-ке дейінгі аралықта өзгерді.

Роторлардағы айналу қозғалысының есептеу моделін көрсету үшін уақыт қадамдары бойынша ұяшықтардың пішінін өзгертетін динамикалық есептік тор әдісі пайдаланылады. Бұл тәсіл тұйық жұмыс қуыстарындағы газ қозғалысының кинематикалық ерекшеліктерін және қуыстар арасындағы кері ағындардың уақыттық фазасын нақты модельдеуге мүмкіндік беретінін байқадық. Жылжымалы тор алдын ала буферленген «тор профилі» (pre-computed mesh sequence) тәсілімен жүзеге асырылды: 720 конфигурация ротордың 0,5° қадамына сәйкес алдын ала есептеліп, ANSYS Fluent ортасына UDF арқылы импортталды. Тор сипаттамаларына келетін болсақ: жалпы бақылау көлемдері саны - 3,2 млн; ортогоналдық сапа мин. 0,26 (норма > 0,20); асимметрия макс. 0,72 (< 0,85); аспект қатынасы макс. 18. Бірінші тор қабатының биіктігі 0,05 мм ($y^+ < 5$). Тор сезімталдығы зерттеулері 3 млн ұяшықтан астам болғанда негізгі параметрлердің ауытқуы 1,3%-дан аспайтынын растады.

Көпкомпонентті газ Батыс Қазақстан кен орындарына, атап айтқанда Қарашығанақ және Теңіз тораптарына тән нақты қоспа ретінде модельденді. Құрамы молярлық үлестермен берілді: метан – 78 %, этан – 8 %, пропан – 4 %, бутандар – 2 %, азот – 5 %, CO_2 – 3 %. Қоспаның термодинамикалық қасиеттерін есептеуде келесі модельдер жүйесі қолданылды:

Тығыздық - Пенг–Робинсон күй теңдеуі (Z = 0,82–0,91):

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b) + b(V - b)} \quad (1)$$

Параметрлер ван-дер-Ваальс аралас ережесімен: $a_{mix} = \Sigma\Sigma(x_i \cdot x_j \cdot a_ij)$, $b_{mix} = \Sigma(x_i \cdot b_i)$. Динамикалық тұтқырлық – Вилке ережесі бойынша: $\mu_{mix} = (1{,}1–1{,}4)\times10^{-5}$ Па · с.

Жылу өткізгіштік - Mason–Saxena өрнегі бойынша: λmix = 0,033–0,041 Вт/(м · К).

Изобаралық жылу сыйымдылығы бойынша – NASA DB аддитивті жуықтауы: $c_{p,mix}$ = 2,12–2,38 кДж/(кг·К); $k = c_p/c_v$ = 1,27–1,31.

Жоғарыда айтылған термодинамикалық қасиеттерді есептеу температура мен қысымның жергілікті мәндеріне сәйкес қосылған UDF арқылы нақты уақытта жүзеге асырылды.

Реттеуші теңдеулер бейстационар Навье–Стокс теңдеулер жүйесі арқылы көлемдер әдісімен шешілді:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0(\quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \tau \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot \big(v(\rho E + p)\big) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Phi \quad (4)$$

Турбулентті модель үшін C_{μ}=0,0845; $C_{1\varepsilon}$=1,42; $C_{2\varepsilon}$=1,68 тұрақты және $\sigma_k=\sigma_\varepsilon$=0,7194 Прандтль сандары бар k–ε RNG моделі қолданылды. Қабырғаға жақын аймақ $y^+ < 5$ шартында жақсартылған қабырғаны өңдеу әдісі арқылы өңделді.

Көрсетілген сұлбада және де шешуші параметрлерінде ағын мен жылдамдық арасындағы байланыс PISO әдісімен (қысым мен жылдамдық операторларын тәуелсіз бөлу әдісі), яғни түзетудің 2 итерациясы алгоритмімен орындалды. Бұл алгоритм бейстационарлық есептерде тепе-теңдік итерацияларын қамтамасыз етті.

Кеңістіктік дискретизация импульс теңдеуі үшін - 2-ші ретті кері ағын (second-order upwind); энергия теңдеуі үшін - 2-ші ретті кері ағын; қысым үшін – PRESTO (Pressure Staggering Option, айналмалы ағын мен ірі қысым градиенттеріне ұсынылған); турбуленттік шамалар (k, ε) үшін - бірінші ретті кері ағын сұлбаларын ұсынды.

Уақыт бойынша интегралдау - 2-ші ретті толық импликті схема (second-order implicit), уақыт қадамы: $\Delta t = 2{,}3\times10^{-5}$ с (ротордың 0,5° бұрылуы), куранта саны ≤ 0,7 – ні құрады.

Релаксация коэффициенттері келесі көрсеткіштермен белгіленді: қысым – 0,3; импульс – 0,7; энергия – 0,8; турбуленттік шамалар – 0,7. Жинақтылық критерийлері: масса < 10^{-4}; импульс, энергия, k, ε – < 10^{-5}; цикларалық массалық шығын тұрақтануы ұ0,3%.

Шекаралық шарттар және сынақ режимдері бойынша кірістегі бейстационар қысым:

$$p_{in}(t) = p_0 + \Delta p \cdot sin(2\pi f t) \quad (5)$$

Мұнда,

p_0 = 0,32 МПа, Δp = 0,038 МПа, f = 12 Гц.

Қосымша әсер ретінде кіріс қысымының стохастикалық тербелістері pin ∈ [0,28; 0,36] МПа диапазонында қарастырылды. Бұл ретте күту режимінің кіріс температуры T = 285 К, ал тұрақты режимдегі шығын 2,4 кг/с - ты құрады. Бір факторлы тәжірибе принципине сәйкес n_0, T, н және газ құрамы параметрлері үшін барлығында да өзгеріссіз қалды. Тек кіріс қысымы берілісінің сипаты

ғана өзгертілді. Зерттеу жұмыстары қысымның өзгеру амплитудасының үш мәнінде жүргізілді, яғни Δp = 0,019; 0,038 және 0,057 МПа, бұдан стохастикалық бұзылыстың төмен, орташа және жоғары деңгейлеріне сәйкес келетінін көрдік.

Алынған нәтижелер тәуелділіктің сызықты емес сипатын көрсетті, нақтырақ айтқанда: Δp > 0,045 МПа шекті мәнінен асқан жағдайда ηп-нің төмендеуі үдемелі түрде жалғаса отырып, 3,1 %-дан 8,7 %-ға, одан әрі 14,2 %-ға дейінгі көрсеткішті айқындады.

Қосымша – стохастикалық тербелістер: p_in ∈ [0,28; 0,36] МПа, кіріс температурасы T = 285 К, стационарлық шығын 2,4 кг/с – ны көрсетті.

Бір факторлы тәжірибе принципине сәйкес n_0, T, н және газ құрамы параметрлері үшін барлығында өзгеріссіз қалды. Тек кіріс қысымы берілісінің сипаты ғана өзгертілді. Зерттеу ауқымды түрде үш деңгейінде жүргізілді:яғни, Δp = 0,019; 0,038 және 0,057 МПа, бұлар стохастикалық қозудың төмен, орта және жоғары деңгейлеріне сәйкес келеді. Алынған нәтижелер тәуелділіктің сызықты емес сипатын көрсете отырып, – Δp > 0,045 МПа шекті мәнінен асқан жағдайда ηп-нің төмендеуі 3,1 %-дан 8,7 %-ға, одан әрі 14,2 %-ға дейін үдемелі түрде жалғасқанын байқадық.

Верификация бойынша бірінші деңгейге келетін болсақ - операциялық деректер қарастырылды. Атырау облысының КС деректерімен салыстыру бойынша: массалық шығын – 4,6 %, меншікті қуат – 5,2 % (инженерлік қолайлы шек <6 %), екінші деңгей бойынша жарияланған CFD жұмыстарына келетін болсақ, Stosic et al. жұмысымен салыстыруда сығу дәрежесінің айырмашылығы 2,8 %, ал Kovacevic нәтижелерімен ағып кету деңгейі: 0,161 кг/с (есептелген) vs 0,155 кг/с – 3,9 % – ды көрсетті.

Жиналған сандық мәліметтер негізінде бейстационар жұмыс жағдайларының Қазақстан аумағында газ саласында жиі қолданылатын бұрандалы компрессорлардың өнімділік және энергетикалық көрсеткіштеріне әсері бойынша өңірлік инженерлік мәселе аясында талданып, оң шешім қабылдануда.

Нәтижелер және талқылау

1. Қысым өрісі мен пульсация күшеюіне тоқталып өтейік. Мында тұрақты жұмыс күйіндегі газ 0,32 МПа / 285 К параметрлерімен кіріп, айдауда 1,12 МПа-ға дейін жетеді; T_айдау = 398 К, жергілікті максимум 412 К, ал гармоникалық тербелістер (±12%) жағдайында камерадағы амплитуда 0,074 МПа-ға жетіп, кіріс ауытқуынан екі есеге артады және де бұдан төмендегі өрнекті аламыз:

$$K_p = \frac{\Delta p_{cell}}{\Delta p_{in}} = \frac{1{,}95_{(\text{гарм.})}}{2{,}30_{(\text{стох.})}} \quad (6)$$

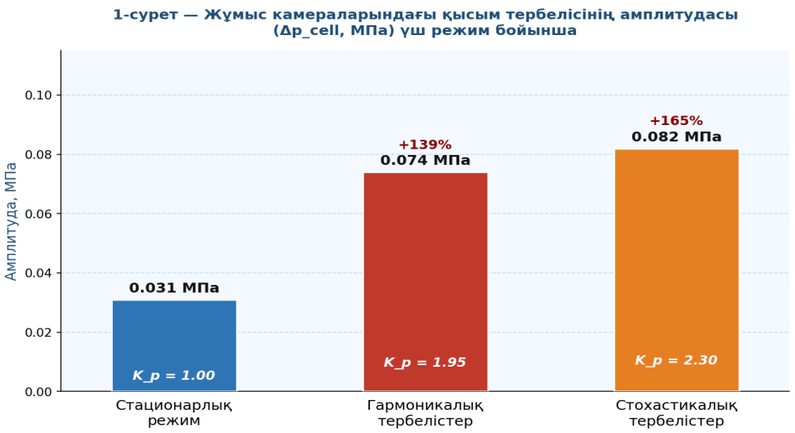
K_p > 1 болуының физикалық механизмі: Фазалық кешігу $\tau_lag = 3{,}6\times10^{-3}$ с – тұйықталған камера сыртқы тербеліске лезде жауап бере алмайды; Газодинамикалық резонанс – f = 12 Гц, f_res ≈ 11,4–13,2 Гц; Нақты газ: $\delta p \approx c^2 \cdot \delta\rho$ – 14% тығыздық тербелісі қысым амплитудасын туындатады.

Шығын және энергетикалық сипаттамаларына тоқталсақ, тұрақты жұмыс күйіндегі массалық шығын 2,40 кг/с-тен гармоникалық режимде 2,21 кг/с-ке

(−7,9 %), стохастикалық режимде 2,17 кг/с-ке (−9,6 %) дейін кемді. Сәйкесінше η_v 0,91-ден 0,82–0,83-ке дейін төмендеді.

$$\eta_p = \frac{\frac{k-1}{k} \cdot \left(\left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{\frac{T_{out}}{T_{in}} - 1} \quad (7)$$

η_p 0,78-ден 0,71 (гарм.) және 0,69 (стох.)-ге дейін азайды. Меншікті жұмыс 135-тен 144–147 кДж/кг-ға артты. Жиынтық шығындар ΔN 38-ден 61–64 кВт-қа (>60%) ұлғайды.



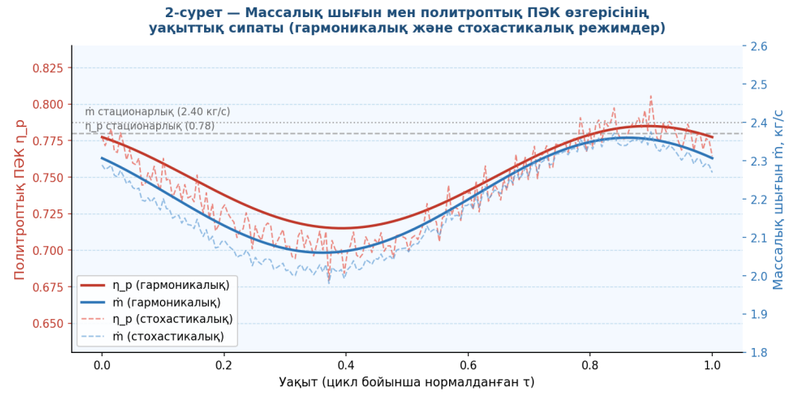
1-сурет – Жұмыс камераларындағы қысым тербелісінің амплитудасы (Δp_cell, МПа) үш режим бойынша

1-кесте – Қысым-температура параметрлерінің салыстырмалы талдауы

Параметр	Стационарлық	Гармоникалық	Стохастикалық	Ауытқу, %
Кіріс қысымы, Мпа	0,32	0,282–0,358	0,28–0,36	±12,0
Қуыстардағы амплитуда, Мпа	0,031	0,074	0,082	+138 / +165
K_p	1,00	1,95	2,30	+95 / +130
Айдау температурасы, К	398	406	409	+2,0 / +2,8
Макс. жергілікті T, К	412	428	431	+3,9 / +4,6
Сығу дәрежесі π	3,50	3,46	3,42	−1,1 / −2,3

Турбуленттік k 32-ден 51 м²/с²-ға өсуінің энергетикалық механизмі: тұтқыр диссипация Ф = 2μ_t·S_ij·S_ij - μ_t артуы (2,4→3,8×10□□ Па·с) арқылы 9–11%-ға өсті, T_айдауды 8 К жоғарылатты; Айналмалы ағын (v_{max} 48→63 м/с)

гидравликалық шығындарды 4,3 %-ға арттырды; Нәтижесінде ΔN = 38→61 кВт (+60,5%) - номиналды қуаттың 7,1%-ын көрсетті.



2-сурет – Массалық шығын мен политроптық ПӘК өзгерісінің уақыттық сипаты (гармоникалық және стохастикалық режимдер)

2-кесте – Шығын және энергетикалық сипаттамалар

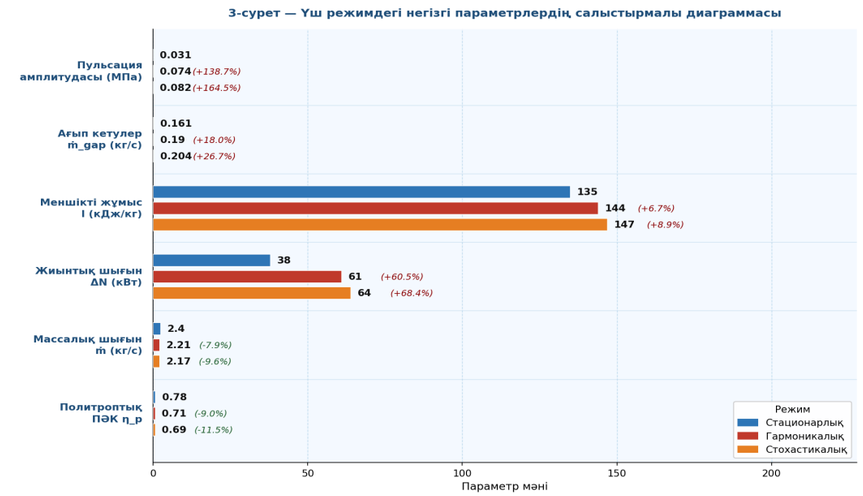
Көрсеткіш	Стационарлық	Гармоникалық	Стохастикалық	Өзгеріс, %
Массалық шығын, кг/с	2,40	2,21	2,17	−7,9 / −9,6
Көлемдік коэффициент η_v	0,91	0,83	0,82	−8,8 / −9,9
Политроптық ПӘК η_p	0,78	0,71	0,69	−9,0 / −11,5
Меншікті жұмыс, кДж/кг	135	144	147	+6,7 / +8,9
Индикаторлық қуат, кВт	326	301	296	−7,7 / −9,2
Жиынтық шығындар ΔN, кВт	38	61	64	+60,5 / +68,4

Газды динамикалық үдерістер мен ағып кетулерге тоқталсақ, тербелістер кезінде ағып кетулер Δp = 0,21 МПа болғанда 18 %-ға артып, 0,19 кг/с-ке жетті. Тістескен аймақтағы байланыс қысымдары 142-ден 167 МПа-ға дейін өсті. Бұл құбылысты 3- ші кестеден көре аласыздар.

3-кесте – Газодинамикалық үдерістер параметрлері

Параметр	Стационарлық	Гармоникалық	Стохастикалық	Өзгеріс, %
Макс. жылдамдық, м/с	48	63	66	+31 / +37
Турбуленттік k, м²/с²	32	51	55	+59 / +72
Турбуленттік μ_t, Па·с	$2{,}4\times10^{-4}$	$3{,}8\times10^{-4}$	$4{,}1\times10^{-4}$	+58 / +71
Саңылаулардағы ағып кетулер, кг/с	0,161	0,190	0,204	+18 / +27

Байланыс қысымдары, МПа	142	167	171	+17,6 / +20,4



3-сурет – Үш режимдегі негізгі параметрлердің салыстырмалы диаграммасы

Газ компоненттік құрамының әсеріне тоқталатын болсақ, ауыр көмірсутектердің үлесін 25 %-ға дейін ұлғайту айдау температурасын 9 К-ға өсіріп, η_p-ны 0,68-ге дейін төмендетті және k мәнінің 1,27-ден 1,31-ге өзгеруі сығымдау жұмысына тікелей ықпал етті. Бұл нақты термодинамикалық қасиеттердің инженерлік есептеулерде міндетті түрде ескеру қажеттілігін растайды.

Практикалық ұсынымдармен тұжырымдайтын болсақ:

1. Кіріс тербелісін тежеу, ол пульсациялық демпфер немесе буферлік ыдыс Δp-ні 0,038→0,019 МПа-ға азайтады, ал η_p деградациясын 8,7 %-дан 3,1 %-ға дейін қысқартады.

2. Резонанстық жиіліктен аулақтануы, VSD жүйесі арқылы ротор жиілігін fres ≈ 11–13 Гц аймағынан алшақтауы Kp мәнін 1,95-тен 1,2–1,4-ке дейін азайуына әкеп соқты.

3. Ауыр газ фракцияларын ескерсек, ауыр компоненттер үлесі >20 % болғанда REFPROP / Peng–Robinson моделін пайдалану міндетті.

4. Жылулық мониторинг. ΔTdischarge > 8 К болғанда бейстационар режимге өтуі туралы дабыл беру алгоритмін іске қосу ұсынылады.

5. Майлау жүйесін жетілдіру бойынша байланыс қысымдарының 17,6 %-ға өсуі тербелістер кезінде майлы қабат қалыңдығы мен тұтқырлықты арттыруды негіздейді.

Алынған сандық деректер жиынтығы күрделі құрамды табиғи газмен жұмыс істейтін бұрандалы компрессорлардың жұмыс сипаттамаларына тұрақсыз сору

жұмыс күйлерінің әсер ауқымын сипаттап, мұндай бұзылыстардың нақты қондырғылардағы энергетикалық салдарын бағалауға мүмкіндік береді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен № BR24992956 «Газды сығымдау үшін инновациялық жабдықтар мен технологияларды әзірлеу және құру» тақырыбы аясында жүзеге асырылды.

Қорытынды

Орындалған зерттеу тұрақсыз кіріс қысымы жағдайындағы көпкомпонентті газды сығымдаудың CFD-модельдеуін жүзеге асырып, тұрақсыз режимдердің бұрандалы компрессор сипаттамаларына кешенді сандық бағалауға мүмкіндік берді. Яғни:

Термодинамикалық тұрғыдан: кіріс амплитудасы ±12% болса да, K_p = 1,95–2,30 деңгейіндегі пульсация күшеюі байқалады - фазалық кешігу, резонанс және нақты газ эффектілерінің жиынтығы.

Энергетикалық тұрғыдан: η_v 8,8–9,9%, η_p 9,0–11,5%-ға кеміп, жиынтық шығындар ΔN > 60%-ға артады. Бұл жабдыққа қосымша жылу жүктемесін туындатады.

Газ құрамы тұрғысынан: Қазақстандық байытылған газды өңдеуде маңызды фактор болып табылатын ауыр компоненттердің (>20%) η_p-ні 0,03 бірлікке қосымша төмендеуі.

Практикалық тұрғыдан: пульсациялық демпферлер, VSD-реттеу және айдау температурасы бойынша мониторинг - ηp деградациясын 8,7%-дан 3,1%-ға дейін төмендегені дәлелденген шаралар.

Мақаланы қорытындылай келе, алынған нәтижелер бойынша кіріс қысымының тұрақсыз тербелістері бұрандалы компрессорлардың жұмыс үдерісіне көпжақты әсер ететінін дәлелдейді. Бұл әсер шығындық, энергетикалық, жылулық және күштік сипаттамаларды бір мезгілде қамти отырып, зерттеудің практикалық құндылығын арттырады. Мақаланың құндылығы алынған сандық тәуелділіктерді үш бағытта қолдануға болатындығында, яғни пайдалану есептерін нақтылауда, жұмыс режимдерін болжау дәлдігін арттыруда және газ айдау қондырғыларындағы энергия шығындарын азайтуға бағытталған нженерлік шешімдер әзірлеуде болып табылады. Жобада орындалған CFD-модельдеу нәтижелері айнымалы жұмыс жағдайларында компрессорлық агрегаттардың құрылымдық параметрлері мен автоматтандырылған басқару жүйелерін жетілдіруге бағытталған, маңызды ғылыми зерттеулер үшін берік теориялық іргетас болып табылатынына сеніміміз мол.

REFERENCES

1 **Stosic, N., Smith, I. K., Kovacevic, A.** Computational fluid dynamics analysis of screw compressor performance // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C : Journal of Mechanical Engineering Science. – 2002. – Vol. 216. – № 2. – С. 197–210.

2 **Kovacevic, A., Stosic, N., Smith, I. K.** Numerical simulation of fluid flow and solid deformation in screw compressors // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2007. – Vol. 221. – № 2. – P. 85–96.

3 **Rane, S., Kovacevic, A., Stosic, N.** CFD analysis of leakage flows in screw compressors // International Journal of Refrigeration. – 2013. – Vol. 36. – № 2. – P. 659–671.

4 **Mujic, E., Kovacevic, A., Stosic, N.** Influence of rotor profile on screw compressor performance // International Journal of Mechanical Sciences. – 2011. – Vol. 53. – № 12. – P. 1058–1068.

5 **Vande Voorde, J., Vierendeels, J., Dick, E.** Numerical simulation of flow in twin screw compressors // Journal of Fluids Engineering. – 2004. – Vol. 126. – № 4. – P. 608–615.

6 **Kovacevic, A.** Boundary adaptation in grid generation for CFD analysis of screw compressors // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2005. –Vol. 64. – № 3. – P. 401–426.

7 **Stosic, N., Kovacevic, A., Smith, I. K.** Thermodynamic analysis of oil-injected screw compressors // Applied Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 30. – № 14–15. – P. 2073–2082.

8 **Rane S., Kovacevic, A.** Grid deformation strategies for CFD analysis of screw machines // Computers & Fluids. – 2014. – Vol. 99. – P. 124–141.

9 **Wu, H., Xing, Z., He, Z.** Numerical investigation of unsteady flow in screw compressors // Applied Energy. – 2014. – Vol. 130. – P. 633–647.

10 **Wang, J., Feng, J., Zhang, Y.** Numerical simulation of oil-gas two-phase flow in screw compressors // International Journal of Refrigeration. – 2016. – Vol. 67. – P. 470–482.

11 **Li,Y., Wu, H., Xing, Z.** CFD study on pressure pulsation in screw compressors // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 136. – P. 84–96.

12 **Fleming, J. S., Tang, Y., Cook, G.** Numerical modelling of leakage in positive displacement compressors // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy. – 1998. – Vol. 212. – № 2. – P. 95–105.

13 **Bell, I. H., Groll, E. A., Braun, J. E.** A review of numerical models for screw compressor performance // International Journal of Refrigeration. – 2012. – Vol. 35. – № 4. – P. 1163–1179.

14 **Ziviani, D., Bell, I. H., Groll, E. A.** Review of computational approaches for rotary positive displacement compressors // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 142. – P. 766–783.

15 **Yang, M., Zhang, H., Tian, C.** Numerical investigation of thermodynamic performance of natural gas screw compressors // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – Vol. 27. – P. 190–200.

16 **Zhang, Y., Wu, Y., Li, J.** Effect of gas composition on compression characteristics of screw compressors // Energy. – 2019. – Vol. 172. – P. 1212–1223.

17 **Sun, S., Wang, W., Feng, X.** Unsteady CFD simulation of pressure fluctuation in twin-screw compressors // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 178. – Article 115554.

18 **Kovacevic, A., Rane, S., Stosic, N.** Advances in CFD simulation of screw machines // International Journal of Fluid Machinery and Systems. – 2018. – Vol. 11. – № 3. – P. 189–200.

19 **Tang,Y., Fleming, J. S.** Simulation of flow and heat transfer in oil-injected screw compressors // International Journal of Refrigeration. – 2005. – Vol. 28. – № 3. – P. 405–412.

20 **He, Z., Xing, Z., Wu, H.** Three-dimensional numerical analysis of screw compressor working process // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2013. – Vol. 227. – № 7. – P. 1529–1542.

28.03.26 ж. баспаға түсті.
01.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
12.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. К. Елемесов[1], М. К. Мырзакулов[2], *Д. Д. Басканбаева[3], Ж. К. Татаева[4], Н. Е. Кульдеев[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 28.03.26.
Поступило с исправлениями 01.04.26.
Принято в печать 12.05.26.

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖАТИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ГАЗА В ВИНТОВОМ КОМПРЕССОРЕ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ДАВЛЕНИЯ НА ВХОДЕ

В данной статье количественным способом изучены процессы при сжатии многокомпонентного природного газа на винтовом компрессоре, заполненном синтетическим маслом, в условиях нестабильных колебаний входного давления. Что касается актуальности исследования, то периодические и случайные входные параметры компрессоров, работающих в газотранспортных системах, связаны с вопросом более точного прогноза рабочего состояния при отклонениях.

Количественное моделирование проводилось на основе вычислительной гидродинамики (CFD): фактическая геометрия винтовой пары, утечки в отверстиях, турбулентные эффекты и термодинамические свойства многокомпонентной смеси учитывались с помощью переносных расчетных сеток. Временное изменение входного давления представлено образцами периодических и условных случайных изменений.

Для газовой смеси, характерной для Западно-Казахстанских месторождений (CH_4 78 %, C_2H_6 8 %, C_3H_8 4 %, C_4H_{10} 2 %, N_2 5 %, CO_2 3%), производятся расчеты в стационарном, гармоническом (f = 12 Гц, Δ

p = ± 12 %) и стохастическом режимах поступления Установлено, что коэффициент пульсационного усиления в режиме нестабильного всасывания достиг уровня K _ p = 1,95–2,30, снизилась объемная производительность на 8–10 %, политропный КПД снизился на 7–9 % и увеличился удельный объем работ на 6,3–8,9 %. Количественно оценено влияние компонентов газа на энергетические характеристики и установлено, что результаты могут быть использованы для инженерных решений для оптимизации режимов работы компрессорного оборудования.

Ключевые слова: винтовой компрессор, многокомпонентный природный газ, нестационарное сжатие, колебания входного давления, CFD-моделирование, энергоэффективность, коэффициент усиления пульсации.

K. K. Yelemessov[1], M. K. Myrzakulov[2], *D. Zh. Baskanbayeva[3], Z. K. Tatayeva[4], N. Y. Kuldeyev[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 28.03.26.
Received in revised form 01.04.26.
Accepted for publication 12.05.26.

CFD-SIMULATION OF MULTICOMPONENT GAS COMPRESSION PROCESSES IN A SCREW COMPRESSOR WITH INLET PRESSURE VARIATIONS

This article quantitatively studied the processes of compressing multicomponent natural gas on a screw compressor filled with synthetic oil under conditions of unstable fluctuations in inlet pressure. As for the relevance of the study, the periodic and random input parameters of compressors operating in gas transmission systems are associated with the question of a more accurate forecast of the operating state during deviations.

Quantitative modeling was carried out based on computational hydrodynamics (CFD): the actual geometry of the screw pair, leaks in the holes, turbulent effects and thermodynamic properties of the multicomponent mixture were taken into account using portable calculation meshes. Temporary change of inlet pressure is represented by samples of periodic and conditional random changes.

For gas mixture typical for West Kazakhstan fields (CH_4 78 %, C_2H_6 8 %, C_3H_8 4 %, C_4H_{10} 2 %, N_2 5 %, CO_2 3 %), calculations in stationary, harmonic (f = 12 Hz, Δ p = ± 12 %) It was found that the pulsation gain in the unstable suction mode reached the level of K _ p = 1.95–2.30, the volume productivity decreased by 8-10%, the polytropic efficiency decreased by 7–9 % and the specific scope of work increased by 6.3–8.9 %. The effect of gas components on energy characteristics was quantified, and it was found that the results can be used for engineering solutions to optimize the operating modes of compressor equipment.

Keywords: screw compressor, multicomponent natural gas, transient compression, input pressure fluctuations, CFD modeling, energy efficiency, pulsation gain.

МРНТИ 55.35.99
https://doi.org/10.48081/BGQF2219

Н. А. Жаксыбаев[1], Е. С. Абдрахманов[2], *А. Ж. Таскарина[3], Н. К. Кулумбаев[4]
[1,2,3,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8341-0063
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9726-1642
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2613-8799
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4104-037X
*e-mail: Aya_Taskarina@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РОТОРНОГО СЕПАРАТОРА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ШЛАКОВ

Статья посвящена исследованию процесса механической переработки алюминиевых шлаков в роторном сепараторе DIDION RT-60 MK5 и оценке влияния режимов его работы. Рассмотрены конструктивные особенности роторного сепаратора и технологическая схема переработки алюминиевого шлака в условиях действующего литейного производства.

Исследовано влияние частоты вращения барабана и массы загрузки на эффективность переработки алюминиевого шлака. Установлено, что рациональный режим работы сепаратора достигается при частоте вращения 12 об/мин и массе загрузки 4,3–5,5 т, при которых обеспечивается наиболее стабильное концентрирование металлической фазы и минимальные потери алюминия в пылевой фракции. При снижении частоты вращения наблюдается недостаточное перемешивание материала и ухудшение раскрытия металлических включений, тогда как повышение скорости вращения приводит к переизмельчению шлака и росту выхода мелкодисперсной фракции.

На основе анализа недостатков существующей технологии (низкая производительность, высокое энергопотребление, громоздкость оборудования) предложена новая компактная технологическая схема переработки алюминиевого шлака, включающая вертикальный элеватор, двухвалковую зубчатую дробилку, виброгрохот и молотковую дробилку. Расчеты показали возможность повышения часовой производительности по сравнению с базовым вариантом.

Ключевые слова: алюминиевый шлак, роторный сепаратор, режимы работы, частота вращения, масса загрузки, эффективность.

Введение

Проблема переработки отвальных металлургических шлаков и извлечения из них металлических компонентов является одной из актуальных задач современной металлургии, поскольку алюминиевые и другие металлургические шлаки содержат

значительное количество металлической фазы, пригодной для повторного использования [1; 2].

Представленная технологическая схема (рисунок 1) обеспечивает циркуляционную переработку алюминиевого шлака, снижение потерь металлического алюминия и повышение эффективности использования вторичных алюминиевых материалов.

В миксер загружаются алюминий-сырец и флюс. В процессе термической обработки и рафинирования расплава происходит отделение неметаллических включений и образование алюминиевого шлака. После отстаивания расплава алюминий разливается в изложницы и направляется на дальнейшую реализацию, а образовавшийся шлак снимается с поверхности расплава и направляется на последующую переработку.

Шлак поступает на пресс Altek, где осуществляется извлечение остаточного металлического алюминия. Выделенный алюминий в виде металлического лома возвращается в миксер для повторной переплавки и вовлечения в производственный цикл.

Обезалюминенный шлак далее подаётся на дробление гидромолотом Brock, где осуществляется разрушение крупных агломератов до фракции не более 200 мм. После дробления материал направляется в сепаратор Didion, в котором происходит разделение шлака по крупности.

Мелкая и средняя фракции размером менее 6 мм направляются на реализацию как вторичный продукт переработки. Крупная фракция размером более 6 мм, содержащая остаточные металлические включения, возвращается в миксер для повторного извлечения алюминия.

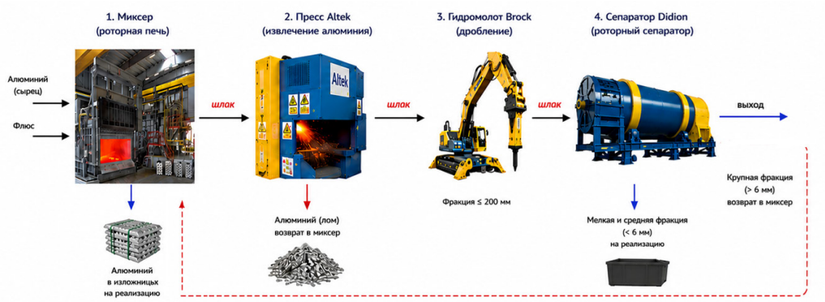


Рисунок 1 – Технологическая линия переработки алюминиевого шлака

Современные исследования показывают, что эффективность переработки алюминиевых шлаков во многом определяется конструктивными особенностями оборудования и режимами его работы [3–6].

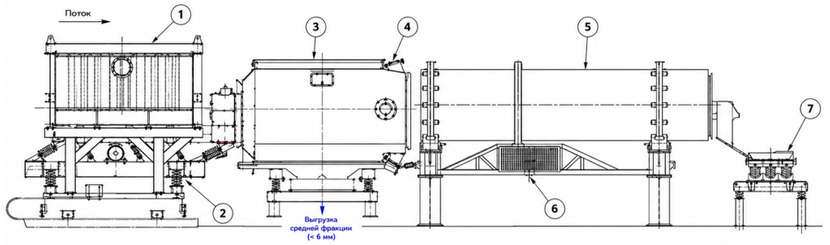
В условиях развития обрабатывающей промышленности и машиностроения особое значение приобретает разработка и совершенствование технологического оборудования для переработки вторичных материалов. Повышение эффективности

использования техногенного сырья напрямую связано с конструктивными и эксплуатационными характеристиками применяемых агрегатов, их надежностью, энергоэффективностью и способностью обеспечивать селективное разделение многокомпонентных систем. В этой связи задачи переработки алюминиевых шлаков выходят за рамки исключительно металлургической проблематики и становятся частью инженерных решений в области машиностроения, направленных на создание и оптимизацию оборудования для механической обработки и сепарации материалов.

Одним из таких типов оборудования являются барабанные сепараторы, которые представляют собой комбинированные агрегаты, в которых реализуются процессы дробления, самоизмельчения, классификации и очистки материала.

В частности, в конструкции сепаратора DIDION применяется система, обеспечивающая разрушение агломератов и отделение оксидной фазы от металлической. Дополнительно реализуется режим автогенного измельчения, при котором частицы материала взаимодействуют между собой, способствуя более эффективному раскрытию металлических включений.

Конструктивные элементы установки (рисунок 2) функционируют во взаимосвязанной технологической последовательности. Исходный алюминиевый шлак подаётся в загрузочный бункер (1), откуда посредством вибрационного питателя (2) равномерно поступает в рабочую камеру механической обработки (3). В процессе вращения барабана происходит разрушение агломератов, перемешивание материала и разделение фаз по физико-механическим свойствам.



1 – загрузочный бункер; 2 – вибрационный питатель;
3 – рабочая камера механической обработки; 4 – патрубок аспирационной системы; 5 – барабан сепаратора; 6 – привод вращения барабана;
7 – узел выгрузки металлической фазы (алюминия)
Рисунок 2 – Конструктивная схема установки переработки алюминиевого шлака

В процессе переработки образующаяся мелкодисперсная оксидная фракция отводится через узел аспирации и пылеулавливания (4). Вращение барабана сепаратора (5) осуществляется приводом (6), расположенным под барабаном под защитной решёткой и включающим электродвигатель и редукторный механизм, обеспечивающие необходимый технологический режим обработки материала.

Металлическая фаза, представленная более крупными и плотными алюминиевыми включениями, выводится через узел (7) в виде алюминиевого концентрата.

Исходный материал перемещается вдоль барабана под действием силы тяжести и вращательного движения, что обеспечивает эффективное разделение алюминиевой и оксидной составляющих шлака. Мелкие частицы проходят через отверстия ситового экрана, тогда как более крупные частицы выводятся через разгрузочную часть установки.

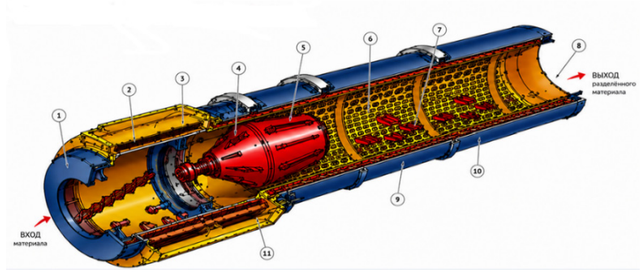
Такая схема разделения широко применяется в промышленности благодаря простоте и высокой производительности оборудования [7].

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований использовался барабанный сепаратор DIDION RT-60 MK5 (рисунок 3), предназначенный для механической переработки алюминиевых шлаков и отделения металлических включений, установленный в литейном участке цеха действующего предприятия.

Рисунок 3 – Барабанный сепаратор DIDION RT-60 MK5

Конструкция барабанного сепаратора (рисунок 4) предназначена для механической переработки и разделения алюминиевого шлака на металлическую и оксидную фракции. Исходный материал поступает через входной патрубок (1), после чего при помощи шнека (2) равномерно распределяется внутри загрузочной камеры (3) [8].



1 – входной патрубок подачи материала; 2 – шнек (спираль) подачи и распределения материала; 3 – камера загрузки и первичного дробления; 4 – ротор (коническая дробильная часть); 5 – приводной венец передачи вращения; 6 – перфорированная поверхность барабана; 7 – лифтеры (подъёмные планки) для перемещения материала; 8 – выходной патрубок разгрузки крупной фракции; 9 – корпус барабана; 10 – сборный лоток для мелкодисперсной фракции; 11 – износостойкая футеровка камеры загрузки

Рисунок 4 – Барабанный сепаратор в разрезе

В зоне первичной обработки материал подвергается механическому воздействию ротора (4), обеспечивающего разрушение агломератов и интенсивное перемешивание шлаковой массы. Вращение барабана осуществляется через приводной венец (5), задающий необходимый технологический режим переработки.

В процессе движения материала вдоль барабана мелкодисперсная оксидная фракция проходит через перфорированную поверхность (6) и собирается в лотке (10). Более крупные металлические включения транспортируются лифтерами (7) к выходному патрубку (8), через который выводится алюминиевый концентрат. Корпус барабана (9) обеспечивает жёсткость конструкции, а футеровка (11) снижает износ внутренних поверхностей в условиях абразивного воздействия шлака.

В ходе экспериментальных исследований проводилась оценка влияния массы загрузки и частоты вращения барабана на эффективность разделения алюминиевого шлака. Испытания выполнялись при частоте вращения 8, 10, 12 и 14 об/мин, а также при различной массе загрузки материала в диапазоне от 4,3 до 12,7 т.

Основные технологические параметры процесса представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры оборудования

Параметр	Значение
Частота вращения барабана	12 об/мин
Масса загрузки	4,3–4,6 т
Мощность привода	22 кВт

Диаметр барабана	1,5 м
Размер отверстий ситового экрана	6,5 мм
Продолжительность цикла	3,5 ч

В качестве основных режимных параметров процесса рассматривались масса загрузки шлака, частота вращения барабана и размер отверстий ситового экрана (таблица 2). Исследуемыми параметрами являлись выход фракций и содержание металлического алюминия в них.

Таблица 2 – Режимные параметры процесса

Частота вращения барабана, об/мин	Масса загрузки, т	Наблюдаемый режим работы	Характер изменения процесса
8	4,3–5,5	Недостаточное перемешивание материала	Неполное раскрытие металлических включений
10	4,3–5,5	Устойчивое движение материала	Стабильное разделение фракций
12	4,3–5,5	Рациональный режим обработки	Эффективное разрушение агломератов и концентрирование металлической фазы
14	4,3–5,5	Интенсивное перемешивание	Рост переизмельчения шлаковой фазы и выхода пыли
12	10–12,7	Перегрузка барабана	Ухудшение селективности разделения и перемещения материала

Результаты и обсуждение

Разделение алюминиевого шлака осуществлялось методом механического грохочения в барабанном сепараторе, при этом классификация продуктов проводилась в соответствии с ГОСТ 8269 с использованием стандартного набора сит. Технологический цикл обеспечивал разделение на три фракции:

– крупная фракция (+6,5 мм) – концентрат металлического алюминия;

– средняя фракция (–6,5 мм) – шлаковый материал с остаточным содержанием металла;

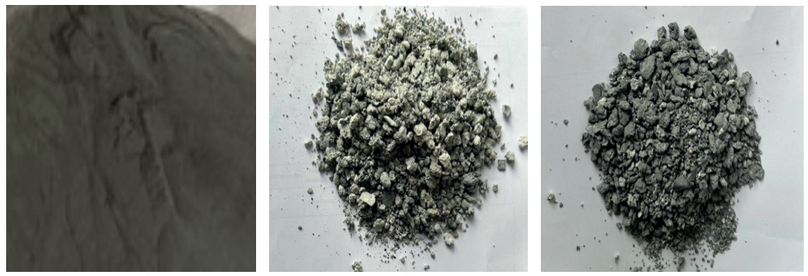
– пылевая фракция (–0,5 мм) – мелкодисперсный материал, улавливаемый системой пылеулавливания.

Таблица 3 – Технологический цикл переработки шлака

Этапы работ	Длительность	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00
Загрузка материала	2,0 ч							
Переработка шлака	1,0 ч							
Пылеулавливание	1,0 ч							
Выгрузка продуктов	0,5 ч							

Продолжительность одного технологического цикла составила 3,5 часа (таблица 3).

Полученные фракции анализировались для определения содержания металлического алюминия и оценки эффективности процесса сепарации (рисунок 5).



а) б) в)

а – пылевая фракция; б – средняя фракция; в – крупная фракция

Рисунок 5 – Продукты разделения алюминиевого шлака

В ходе экспериментальных исследований установлено распределение алюминиевого шлака по фракциям и определено содержание металлической фазы в продуктах переработки (таблица 4).

Таблица 4 – Распределение материала при испытании

Поток материала	Размер фракции	Масса, кг	Доля, %
Выходной материал барабана	+6,5 мм	1260	29,4
Передний желоб	–6,5 мм	2050	47,8
Пылеулавливающая система	–0,5 мм	980	22,8

Установлено, что изменение режимных параметров оказывает существенное влияние на характер движения материала внутри барабана, интенсивность автогенного измельчения и распределение металлической фазы по продуктам переработки.

При снижении частоты вращения до 8–10 об/мин наблюдалось ухудшение перемешивания шлаковой массы и снижение интенсивности разрушения оксидных агломератов. В результате уменьшалась эффективность раскрытия металлических включений и возрастало содержание остаточного металла в средней фракции.

Повышение частоты вращения до 14 об/мин сопровождалось увеличением ударного взаимодействия частиц и переизмельчением оксидной составляющей шлака. Это приводило к увеличению выхода мелкодисперсной пылевой фракции и частичному уносу металлических включений в систему пылеулавливания.

Рациональным режимом эксплуатации барабанного сепаратора является работа при массе загрузки 4,3–5,5 т и частоте вращения 12 об/мин, обеспечивающая

наиболее стабильное концентрирование металлической фазы и минимальные потери алюминия в мелкодисперсных продуктах.

Каждое экспериментальное значение получено как среднее по результатам трёх повторных испытаний. Отклонение результатов не превышало 3–5 %, что свидетельствует о высокой воспроизводимости процесса.

По результатам анализа работы существующего барабанного сепаратора, эксплуатируемого в АО «КЭЗ» расчетно-аналитическим способом определены следующие недостатки:

– оборудование громоздкое, сложной конструкции, что приводит к снижению надежности агрегата;

– часовая производительность – 2 т/ч, что ограничивает эффективность промышленной переработки;

– затрачиваемая электроэнергия составляет 75 кВт/ч, а затрачиваемое время на загрузку 3,5 ч (таблица 4); таким образом, суммарная затрачиваемая энергия составляет 263 кВт/ч;

– загрузка подготавливаемого материала в приемный бункер осуществляется автотрактором с мехлопатой.

На основании вышесказанного, предлагается новая конструктивная схема установки переработки алюминиевого шлака (рисунок 6), которая состоит из таких основных узлов:

– вертикального элеватора, нижняя загрузочная часть установлена в приямке 1, куда подается исходный материал, который элеватором транспортируется в приемный бункер 3;

– двухвальная зубчатая валковая дробилка 4, установленная под бункером 3, дробит исходный материал до величины 60–80 мм;

– первично-дробленный материал поступает в виброгрохот 5 с двумя сеточными рамками 6, с размером ячеек 12 и 6 мм, которые транспортируются раздельными ленточными конвейерами 7 (7’ не показан);

– виброгрохот оснащён наклонным склизом 8, по которому крупные частицы размером 60–80 мм подаются в молотковую дробилку 9, снабжённую колосниковой решёткой с шириною 7 мм. Материал, прошедший через колосниковую решётку, попадает на вибросита 10, где частицы крупнее 3 мм совместно с теми полученными (12 и 6 мм) частицами отправляются в плавильный агрегат, где разделяются металлический алюминий и шлак различной крупностью, которые будут использоваться при набивке футеровки печи.

Тогда при объёме одного ковша V_k=0,125 м^3 и количестве ковшей n=20 общий объём транспортируемого материала составляет:

$$\Sigma V = V_k \cdot n = 0{,}125 \cdot 20 = 2{,}5 \text{ м}^3 \quad (1)$$

При скорости движения цепи элеватора υ=0,25 м/с и длине контура цепи L=16 м время одного оборота элеватора составляет:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{16}{0.25} = 64 \text{ с} \quad (2)$$

Тогда количество оборотов элеватора за один час определяется выражением (3):

$$n_э = \frac{3600}{t} = \frac{3600}{64} = 56 \text{ об/ч} \quad (3)$$

Часовая объёмная производительность элеватора:

$$q_ч = \Sigma V \cdot n_э = 2{,}5 \cdot 56 = 140 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4)$$

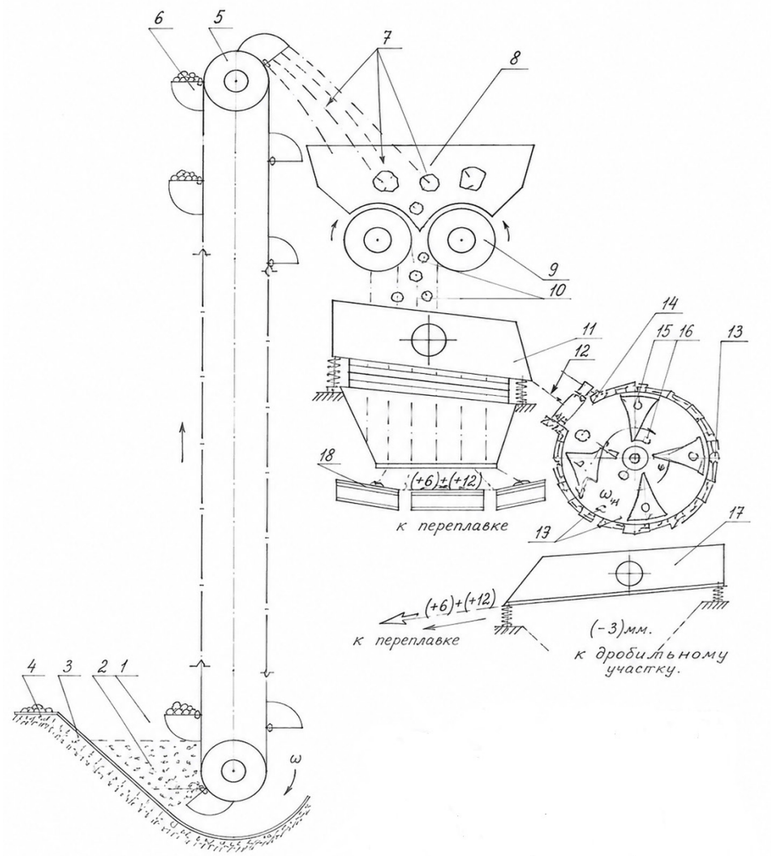
Массовая производительность определяется с учетом коэффициента рыхлости материала μ=0,38 и плотности алюминиевого шлака ρ=1,12 т/м^3 [9]:

$$Q_ч = q_ч \cdot \mu \cdot \rho = 140 \cdot 0.38 \cdot 1.12 = 60 \text{ т/ч} \quad (5)$$

Соотношения (1)–(5) позволяют определить основные параметры работы элеватора и оценить производительность предлагаемой технологической схемы [10]. Обоснование массовой производительности элеватора заключается в том, что он является первичным подающим материал оборудованием и всё оборудование агрегата (рисунок 6) подобрано под эту производительность.

Дополнительным преимуществом предлагаемой схемы является использование широко распространённого и ремонтопригодного оборудования.

Предлагаемая технологическая схема отличается от конструкции сепаратора DIDION RT-60 MK5 принципом организации процесса переработки и составом технологических узлов, что позволяет повысить производительность и снизить энергозатраты.



1 – приямок; 2 – исходный материал; 3 – металлическая футеровка приямка; 4 – железобетонный фундамент; 5 – вертикальный двухцепной ковшовый элеватор; 6 – ковш с материалом; 7 – подача материала в приёмный бункер; 8 – зубчатая валковая дробилка; 9, 10 – дроблёный материал различных фракций; 11 – трёхполотный виброгрохот; 12 – наклонный склиз; 13 – молотковая дробилка; 14 – загрузочная горловина; 15 – молотки ротора; 16 – броневая плита; 17 – колосниковая решётка; 18 – вибросито

Рисунок 6 – Предлагаемая технологическая схема переработки алюминиевого шлака

Процесс переработки материала в молотковой дробилке осуществляется в три стадии. На первой стадии материал подвергается ударному воздействию

молотков, шарнирно закреплённых на роторе с частотой вращения n = 1250 об/мин. Образующиеся фрагменты направляются на зубчатую броневую плиту, где происходит дополнительное дробление материала. Далее частицы поступают на колосниковую решётку с шириной щелей 4 мм. Частицы, не прошедшие через колосниковую решётку, повторно подвергаются дроблению вследствие малого зазора между траекторией движения молотков и колосником (Δ = 2,5 мм).

Под колосниковой решёткой установлено вибросито, предназначенное для отделения частиц размером менее 3 мм. Полученная мелкодисперсная фракция направляется на участок приготовления футеровочной массы плавильной печи, поскольку содержание металлического алюминия в данной фракции незначительно. Надрешётный материал вибросита совместно с подрешётным продуктом виброгрохота направляется на последующую переплавку как окончательно подготовленный материал.

Надрешетный продукт подается совместно с подрешетным продуктом от зубчатой валковой дробилки и отправляется транспортным средством в бункера с последующей выдачей их в плавильный агрегат. Все пылеулавливающие установки соответствуют существующим установкам, эксплуатируемым на базовом предприятии.

Предлагаемая конструкция установки имеет следующие преимущества по сравнению с базовым вариантом:

– компактность конструкции;

– повышение расчётной производительности узла подачи материала до 60 т/ч;

– повышение ремонтопригодности за счёт применения унифицированных узлов и агрегатов.

Полученные расчётные параметры подтверждают возможность повышения производительности при использовании предложенной конструктивной схемы переработки алюминиевого шлака.

Выводы

В результате проведённых исследований установлено влияние режимных параметров барабанного сепаратора DIDION RT-60 MK5 на эффективность переработки алюминиевых шлаков и характер разделения металлической и оксидной фаз.

Определено, что эффективность процесса в значительной степени зависит от частоты вращения барабана и массы загрузки материала. Рациональный режим работы достигается при частоте вращения 12 об/мин и массе загрузки 4,3–5,5 т, при которых обеспечиваются устойчивое перемешивание материала, эффективное разрушение шлаковых агломератов и стабильное концентрирование металлической фазы.

Установлено, что снижение частоты вращения приводит к ухудшению раскрытия металлических включений вследствие недостаточной интенсивности перемешивания материала. Повышение скорости вращения до 14 об/мин вызывает переизмельчение оксидной составляющей шлака, увеличение выхода пылевой фракции и рост потерь металлического алюминия.

Выявленные недостатки действующей технологической линии (низкая производительность 2 т/ч, высокое удельное энергопотребление, сложность конструкции) обусловили разработку новой технологической схемы переработки алюминиевого шлака.

Предложенная технологическая схема обеспечивает повышение производительности переработки алюминиевого шлака, что подтверждает её эффективность для промышленного применения.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при выборе рациональных режимов эксплуатации барабанных сепараторов и разработке более производительных и энергоэффективных установок переработки алюминиевых шлаков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Modalavalasa, K., Ayyagari, K. P. R.** Aluminum dross: aluminum metal recovery and emerging applications // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2024. – Vol. 26. – № 4. – P. 1874–1894. – https://doi.org/10.1007/s10163-024-01948-0.

2 **Tsakiridis, P. E.** Aluminium salt slag characterization and utilization – A review // Journal of Hazardous Materials. – 2012. – Vol. 217–218. – P. 1–10.

3 **Kudyba, A., Akhtar, S., Johansen, I. et al.** Aluminum recovery from white aluminum dross by a mechanically activated phase separation and remelting process. JOM. – 2021. – Vol. 73. – P. 2625–2634.

4 **Hwang, J. Y., Huang, X., Xu, Z.** Recovery of Metals from Aluminum Dross and Saltcake // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2006. – Vol. 5. – № 1. – P. 47–62. – https://doi.org/10.4236/jmmce.2006.51003.

5 **Lv, H., Xie, M., Wu, Z., Li, L., Yang, R., Han, J., Liu, F., Zhao, H.** Effective Extraction of the Al Element from Secondary Aluminum Dross Using a Combined Dry Pressing and Alkaline Roasting Process // Materials. – 2022. – Vol. 15. – № 16. – Article 5686.

6 **Молдаханов, Б. А., Дудкин, М. В., Лешневский, Т., Яковлев, В. С., Байгунусов, А. Ж.** Оптимизация технологических параметров тонкости измельчения материалов на основе математического моделирования второго порядка // Научный журнал «Наука и техника Казахстана». – 2026. – № 1. – С. 143–161. – https://doi.org/10.48081/BGQF1914

7 **Неменёнок, Б. М., Рафальский, И. В., Лущик, П. Е. и др.** Процессы переработки солевых шлаков алюминиевого производства для получения порошкового материала с высоким содержанием оксидных фаз алюминия // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 65–72.

8 **Жаксыбаев, Н. А., Абдрахманов, Е. С., Таскарина, А. Ж., Кулумбаев, Н. К.** Эволюция технологий и оборудования переработки алюминиевого шлака // Международная научная конференциия «XXVI САТПАЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ» (10 апреля 2026 г.). – Павлодар : НАО «Торайгыров университет», 2026.

9 **Аккерман, Ю. Э.** Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. – М. : Недра, 1982. – 367 с.

10 **Аксёнов, П. Н.** Оборудование литейных цехов. – М. : Машиностроение, 1977. – 510 с.

REFERENCES

1 **Modalavalasa, K., Ayyagari, K. P. R.** Aluminum dross: aluminum metal recovery and emerging applications // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2024. – Vol. 26. – № 4. – P. 1874–1894. – https://doi.org/10.1007/s10163-024-01948-0.

2 **Tsakiridis, P. E.** Aluminium salt slag characterization and utilization – A review // Journal of Hazardous Materials. – 2012. – Vol. 217–218. – P. 1–10.

3 **Kudyba, A., Akhtar, S., Johansen, I. et al.** Aluminum recovery from white aluminum dross by a mechanically activated phase separation and remelting process. JOM. – 2021. – Vol. 73. – P. 2625–2634.

4 **Hwang, J. Y., Huang, X., Xu, Z.** Recovery of Metals from Aluminum Dross and Saltcake // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2006. – Vol. 5. – № 1. – P. 47–62. – https://doi.org/10.4236/jmmce.2006.51003.

5 **Lv, H., Xie, M., Wu, Z., Li, L., Yang, R., Han, J., Liu, F., Zhao, H.** Effective Extraction of the Al Element from Secondary Aluminum Dross Using a Combined Dry Pressing and Alkaline Roasting Process // Materials. – 2022. – Vol. 15. – № 16. – Article 5686.

6 **Moldaxanov, B. A., Dudkin, M. V., Leshnevskij, T., Yakovlev, V. S., Bajgunusov, A. Zh.** Optimizaciya texnologicheskix parametrov tonkosti izmel`cheniya materialov na osnove matematicheskogo modelirovaniya vtorogo poryadka // Nauchny`j zhurnal «Nauka i texnika Kazaxstana». – 2026. – № 1. – P. 143–161.

7 **Nemenyonok, B. M., Rafal`skij, I. V., Lushhik, P. E. i dr.** Processy` pererabotki solevy`x shlakov alyuminievogo proizvodstva dlya polucheniya poroshkovogo materiala s vy`sokim soderzhaniem oksidny`x faz alyuminiya // Lit`e i metallurgiya. – 2023. – № 1. – P. 65–72.

8 **Zhaksy`baev, N. A., Abdraxmanov, E. S., Taskarina, A. Zh., Kulumbaev, N. K.** E`volyuciya texnologij i oborudovaniya pererabotki alyuminievogo shlaka // Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciiya «XXVI SATPAEVSKIE ChTENIYa» (10 aprelya 2026 g.). – Pavlodar: NAO «Torajgy`rov universitet», 2026.

9 **Akkerman, Yu. E`.** Spravochnik po obogashheniyu rud. Podgotovitel`ny`e processy`. – M. : Nedra, 1982. – 367 p.

10 **Aksyonov, P. N.** Oborudovanie litejny`x cexov. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 510 p.

Поступило в редакцию 09.04.26.
Поступило с исправлениями 15.04.26.
Принято в печать 01.06.26.

Н. А. Жақсыбаев[1], Е.С. Абдрахманов[2],
****А. Ж. Таскарина[3], Н. К. Құлымбаев[4]***
[1,2,3,4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
09.04.26 ж. баспаға түсті.
15.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
01.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АЛЮМИНИЙ ҚОЖДАРЫН ҚАЙТА ӨҢДЕУ КЕЗІНДЕ РОТОРЛЫҚ СЕПАРАТОРДЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМДЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада DIDION RT-60 MK5 роторлық сепараторында алюминий қожын механикалық қайта өңдеу процесін зерттеу және оның жұмыс режимдерінің әсерін бағалау нәтижелері қарастырылған. Роторлық сепаратордың конструкциялық ерекшеліктері мен қолданыстағы құю өндірісі жағдайындағы алюминий қожын қайта өңдеудің технологиялық сұлбасы сипатталған.

Барабанның айналу жиілігі мен жүктеме массасының алюминий қожын қайта өңдеу тиімділігіне әсері зерттелді. Сепаратордың тиімді жұмыс режимі барабанның айналу жиілігі 12 айн/мин және жүктеме массасы 4,3–5,5 т болған кезде қамтамасыз етілетіні анықталды. Осы режимде металл фазасының тұрақты шоғырлануы және алюминийдің шаң фракциясындағы шығындарының минималды деңгейі байқалды. Айналу жиілігі төмендеген кезде материалдың жеткіліксіз араласуы мен металл қосындыларының нашар ашылуы орын алады, ал айналу жылдамдығының артуы қождың шамадан тыс ұсақталуына және майда дисперсті фракция шығымының өсуіне алып келеді.

Қолданыстағы технологияның кемшіліктерін (төмен өнімділік, жоғары энергия шығыны, жабдықтың көлемділігі) талдау негізінде алюминий қожын қайта өңдеудің жаңа ықшам технологиялық сұлбасы ұсынылды. Ұсынылған сұлба құрамына тік элеватор, екі білікті тісті ұсатқыш, виброгрохот және балғалы ұсатқыш кіреді. Жүргізілген есептеулер базалық нұсқамен салыстырғанда сағаттық өнімділікті арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Кілтті сөздер: алюминий қожы, роторлық сепаратор, жұмыс режимдері, айналу жиілігі, жүктеме массасы, тиімділік.

N. A. Zhaxybayev[1], E. S. Abdrakhmanov[2],
****A. Zh. Taskarina[3], N. K. Kulumbayev[4]***
[1,2,3,4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 09.04.26.
Received in revised form 15.04.26.
Accepted for publication 01.06.26.

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF A ROTARY SEPARATOR IN ALUMINUM SLAG PROCESSING

The article is devoted to the study of the mechanical processing of aluminum slag in the DIDION RT-60 MK5 rotary separator and the assessment of the influence of its operating parameters. The design features of the rotary separator and the technological scheme of aluminum slag processing under operating foundry production conditions are considered.

The influence of drum rotational speed and feed mass on the efficiency of aluminum slag processing was investigated. It was established that the optimal operating mode of the separator is achieved at a rotational speed of 12 rpm and a feed mass of 4.3–5.5 t, providing the most stable concentration of the metallic phase and minimal aluminum losses in the dust fraction. A decrease in rotational speed leads to insufficient material mixing and poorer liberation of metallic inclusions, whereas an increase in rotational speed causes excessive slag grinding and a higher yield of fine dispersed fractions.

Based on the analysis of the disadvantages of the existing technology, including low productivity, high energy consumption, and bulky equipment design, a new compact technological scheme for aluminum slag processing was proposed. The developed scheme includes a vertical elevator, a double-roll toothed crusher, a vibrating screen, and a hammer crusher. Calculations demonstrated the possibility of increasing hourly productivity compared to the conventional process.

Keywords: aluminum slag, rotary separator, operating modes, rotational speed, feed mass, efficiency.

МРНТИ 55.19.03

https://doi.org/10.48081/BGQF2220

А. Ж. Касенов[1], *Т. Л. Луб[2], Ж. К. Мусина[3], Г. Т. Итыбаева[4], А. Д. Сулейменов[5]

[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[3]Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, Республика Казахстан, г. Тараз.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1439
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9861-7321
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2233-4947
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6385-8627
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9319-0285
*e-mail: lub_tou_mis@mail.ru

АНАЛИЗ ИЗНОСА И НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОТАЦИОННОГО БЕЗВЕРШИННОГО ТОКАРНОГО РЕЗЦА

В статье рассмотрен процесс ротационной токарной обработки наружных поверхностей с применением ротационного безвершинного поворотного токарного резца со стружколомом. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения стойкости режущего инструмента, снижения локальных перегрузок в зоне резания, а также обеспечение более равномерного использования режущей кромки. Выполнен анализ существующих схем токарной обработки, включая традиционную, косоугольную, ротационную, вибрационно-ассистированную и прецизионную обработку. Более подробно описана ротационная схема с самовращающейся режущей пластиной, позволяющая перераспределять силовую и тепловую нагрузку по окружности кромки.

Представлена конструкция ротационного безвершинного резца, который включает вращающуюся ось, режущую пластину, подшипниковый узел, державку и механизм поворота угла наклона режущей кромки. Для оценки работоспособности инструмента разработана модель износа, учитывающая динамику самовращения, компоненты сил резания, нормальное давление и вероятностный характер контакта со срезаемым слоем.

Выполнен конечно-элементный анализ напряжённо-деформированного состояния режущей пластины при различных диаметрах, углах наклона и схемах закрепления. Установлено, что увеличение диаметра пластины снижает максимальные напряжения, а применение ротационной схемы с поворотным подшипниковым узлом уменьшает уровень напряжений в 9–12 раз по сравнению с жёстким закреплением.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной конструкции для повышения долговечности инструмента и устойчивости процесса резания.

Ключевые слова: ротационное точение, безвершинный резец, самовращающаяся пластина, стружколом, износ, напряжённо-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование.

Введение

Токарная обработка остаётся базовым процессом формирования наружных поверхностей деталей вращения и занимает ключевое место в технологических схемах механической обработки. Развитие отрасли характеризуется тенденцией к повышению точности, производительности и стойкости инструмента при одновременном снижении энергетических затрат и термомеханических нагрузок на систему «станок – инструмент – заготовка».

Традиционная токарная обработка является базовым методом получения деталей типа тел вращения и основан на относительном движении заготовки и инструмента: главное движение – вращение заготовки и вспомогательное – поступательное перемещение резца вдоль или поперёк оси заготовки, за счёт чего классификации кинематических схем резания Г.И. Грановского [1] данный процесс относится к IV группе.

Повышение требований к точности и чистоте поверхности, а также увеличение жёсткости производственных циклов обусловили необходимость совершенствования кинематики процесса резания и разработки новых типов инструментов. Результаты современных исследований свидетельствуют о том, что повышение эффективности точения возможно за счёт изменения механики взаимодействия режущей кромки с заготовкой – распределения нагрузки вдоль режущей кромки, уменьшения неравномерности износа и стабилизации сил резания.

Переход от традиционных схем резания к кинематически усложнённым методам обусловлен стремлением снизить концентрацию тепловых и силовых нагрузок в зоне резания и обеспечить равномерное использование режущей кромки. В современном машиностроении применяются различные методы токарной обработки наружных поверхностей, среди которых: традиционная (ТТО), косоугольная (бреющая) (КТО), ротационная токарная обработка (РТО) вибрационно-ассистированная (ВТО) и прецизионная (ультраточная) (ПТО), ротационная обработка поверхностей с принудительно вращающейся пластиной (ПВРО).

В работах A. Hosokawa [2; 3; 4] и др. исследовано влияние диапазона частот вращения инструмента на нормальную составляющую силы резания, температуру в зоне контакта, тем самым предотвращать катастрофические виды износа и повышать стойкость инструмента при точении жаропрочных и труднообрабатываемых материалов.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что ПВРО является технологически гибким и эффективным методом, обеспечивающим снижение сил и температур резания, равномерное распределение износа по

периферии режущей кромки, улучшение параметров поверхностного слоя и возможность формирования функциональных текстур.

Эволюция токарной обработки направлена на повышение эффективности формообразования за счёт совершенствования кинематики процесса и управления параметрами зоны резания.

Материалы и методы

В качестве одного из альтернативных методов токарной обработки был разработан метод косоугольной (бреющей) токарной обработки наружных поверхностей. Данный метод основан на ТТО, при котором угол между вектором скорости резания и главной режущей кромкой не равен 90˚, то есть угол наклона главной режущей кромки λ не равен нулю. Группа по классификации Г.И. Грановского [1] сохраняется аналогично предыдущей, однако процесс резания переходит из двумерной в трехмерную систему.

Ротационная токарная обработка (РТО) заключается в том, что режущий инструмент помимо основного относительного движения с заготовкой, получает дополнительное вращательное движение вокруг собственной оси. В результате формируется новая кинематическая схема, относящаяся к VII группе в классификации Г. И. Грановского [1], что более подробно раскрывает в своей работе Ящерицын П. И. Это вращение может возникать за счет контактных сил трения при наличии угла наклона режущей кромки λ (самовращение, СВРО) либо посредством внешнего привода ПВРО.

Метод вибрационно-ассистированной токарной обработки (ВТО) основан на наложении дополнительного вибрационного движения инструмента на обычное движение резания (рисунок 1) относительно заготовки.

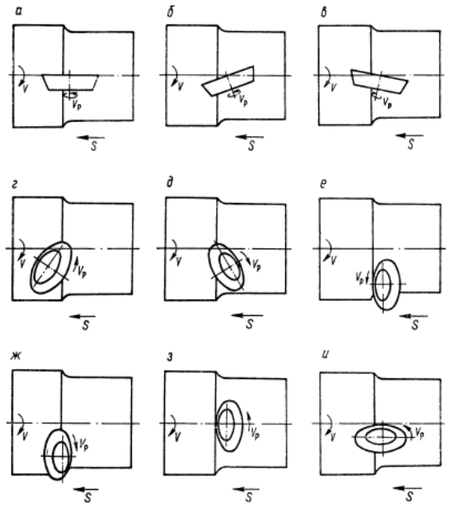


Рисунок 1 – Схемы ротационного резания при различных углах поворота пластины [5]

Прецизионная токарная обработка (ПТО) представляет собой разновидность ТТО, которая ориентирована на получение высоких показателей точности формы, размеров и низких параметров шероховатости обычно. При этом ПТО не предполагает изменения кинематической схемы резания, однако требует более жестких требований к системе «СИЗ», точности установки инструмента, стабильности температурного режима и геометрии режущей кромки.

Основной фактор, который позволяет ТТО перейти в ПТО это регуляция режимов резания. Для этого используется малые значения подачи (0,005-0,12 мм/об) и глубины резания (0,05-0,3 мм), при этом скорость резания может оставаться высокой или умеренной, в зависимости от свойств материала (карбид, керамика, ПКБН, алмаз) и типа инструмента. В источнике [6] рекомендовано 100-1000 м/мин и более. Применение таких режимов приводит к уменьшению толщины срезаемого слоя до микроуровня, что позволяет минимизировать пластическую деформацию и обеспечить формирование мелкопрофильного микрорельефа поверхности без изменения базовой кинематики резания.

Исследованием классического варианта РТО и основных представлений о преимуществах круглолезвийных или чашечных ротационных резцов были заложены в работах В. А. Землянского, Е. Г. Коновалова и Л. А. Гика, В. Д. Боброва, Д. Е. Иерусалимского, П. И. Ящерицына и др. [7;8].

При этом классические основы кинематики резания как в зарубежных [9], так и в русскоязычных источниках [7] основываются, прежде всего, на угле поворота режущей пластины. При наклоне оси резца формируются варианты б (прямая) и в (обратная), в которых возникает самовращение за счёт составляющей силы резания. Схема используется при точении наружных поверхностей, строгании и фрезеровании плоскостей.

Метод ротационной обработки поверхностей с принудительно вращающейся пластиной (ПВРО) относится к классу ротационных процессов, в которых дополнительное вращательное движение режущего элемента формируется внешним приводом. В качестве привода применяются вспомогательные шпиндели, мотор-шпиндели, а также механические передачи от ходового винта станка, позволяющие независимо регулировать частоту вращения режущей пластины, направление её вращения и угол наклона оси инструмента относительно оси заготовки [9; 10].

Метод особенно эффективен при обработке труднообрабатываемых материалов, длинномерных и маложёстких деталей, а также при высокоскоростных режимах резания. Вместе с тем сложность конструкции приводных узлов, высокая чувствительность к настройке и повышенные требования к жёсткости системы ограничивают широкое внедрение ПВРО на универсальном оборудовании, что определяет актуальность дальнейшего развития ротационных инструментов с самовращающейся режущей кромкой

Результаты и обсуждение

Новая конструкция ротационного безвершинного поворотного токарного резца со стружколомом [11] соответствует современным тенденциям развития самовращающихся инструментов (рисунок 2). В ней совмещены безвершинная форма режущей пластины и стружколом для эффективного управления формированием стружки, а также принцип равномерного распределения износа по окружности режущей кромки.

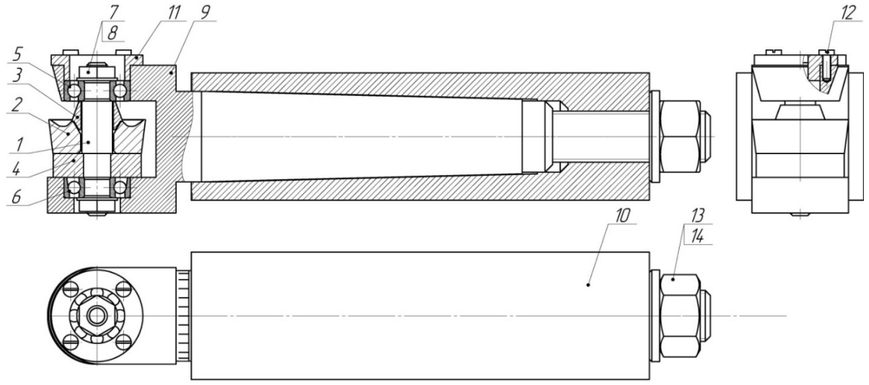


Рисунок 2 – Ротационный безвершинный поворотный токарный резец со стружколомом

Ротационный безвершинный поворотный токарный резец со стружколомом представляет собой комбинированную конструкцию, в которой объединены узел вращающейся оси и державка с механизмом поворота. Вращающаяся ось (1) служит носителем режущей пластины (2), а опорная пластина (4) передаёт силовую нагрузку на подшипниковый узел. Подшипники различного типа выполняют специализированные функции: верхний шариковый подшипник (5) стабилизирует положение оси и исключает биения, тогда как нижний радиально-упорный подшипник (6) воспринимает основную часть радиальных и осевых сил резания. Комплект гаек и шайб (7, 8), расположенный с двух сторон оси, обеспечивает регулировку осевого зазора, натяг опор и компенсацию температурных деформаций.

Корпус с конусом Морзе (9) выполняет функцию силового базирования и обеспечивает надёжную установку инструмента в державке (10). Державка формирует требуемую пространственную ориентацию оси вращения режущего узла и позволяет задавать угол наклона λ посредством поворотного механизма со шкалой, нанесённой на корпус. Защитная крышка верхних подшипников (11) с крепёжными винтами (12) предотвращает загрязнение узла и исключает вертикальный подъём вращающегося подузла под нагрузкой.

Визуализация результатов моделирования (рисунок 3–5) выполнена при формировании полярных диаграмм распределения износа по угловой координате,

графиков изменения угловой скорости инструмента, а также временные зависимости износа для выбранных сегментов кромки.

Представленная модель описывает процесс ротационного точения как совокупность взаимосвязанных явлений: динамики самовращения круглой режущей пластины, эмпирически определяемых компонентов силового взаимодействия и вероятностного распределения зон фактического контакта со срезаемым слоем.

Комплексный характер модели позволяет одновременно учитывать детерминированные закономерности резания и стохастические факторы, обусловленные флуктуациями сил, переменной толщиной срезаемого слоя и неустойчивостью микро-контакта.

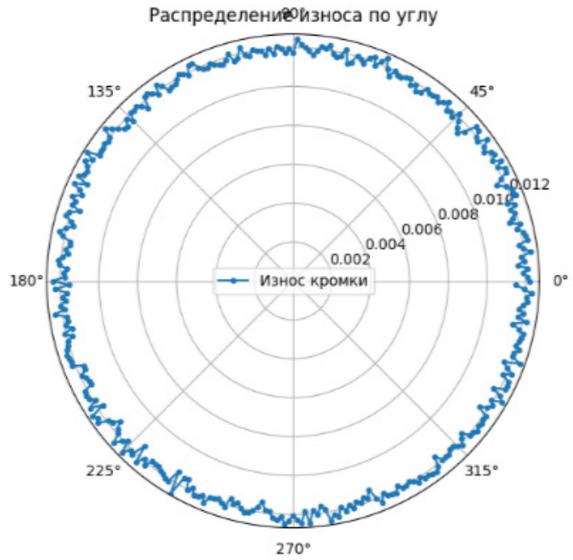


Рисунок 3 – Визуализация распределения износа по углу твердосплавной пластинки резца

В структуру модели включены следующие ключевые механизмы: уравнение динамики самовращения с учётом действующих сил резания, момента инерции пластины и сопротивления в опорно-подшипниковом узле; локальная модель износа, зависящая от сочетания силовых и нормального давления в зоне контакта, стохастическое описание контактного взаимодействия, реализуемое методом Монте-Карло и позволяющее учесть вероятностный характер нагрузки по окружности режущей кромки.

Рисунок 4 – Эволюции угловой скорости инструмента

Разработанный вычислительный алгоритм, реализованный на языке Python, обеспечивает численное прогнозирование распределения износа, анализ влияния технологических параметров и оценку устойчивости самовращения при различных режимах резания.

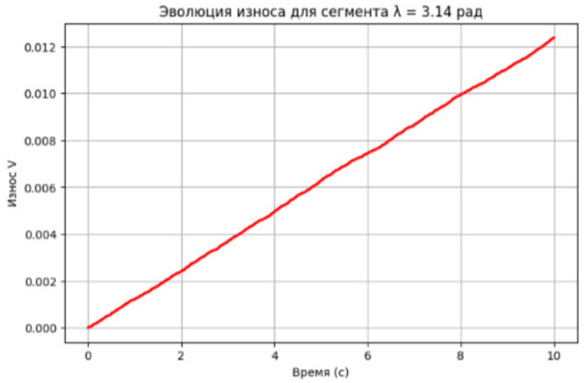


Рисунок 5 – Эволюции износа для сегмента

Полученные результаты демонстрируют, что самовращение способствует более равномерному распределению нагрузки вдоль режущей кромки, снижению локальных перегрузок и, как следствие, увеличению стойкости инструмента и улучшению качества обработанной поверхности.

Сформулированные выводы подтверждают, что интеграция детерминированных и стохастических подходов в рамках единой модели является эффективным инструментом анализа и оптимизации процессов резания ротационными инструментами.

Моделирование и анализ напряжённо-деформированного состояния режущей части ротационного безвершинного резца [12] является важным элементом

исследования, поскольку позволяет оценить влияние геометрических параметров, режимов обработки и схем закрепления на работоспособность режущей пластины.

В отличие от большинства физических задач, моделирование процесса резания требует ручного задания всех силовых и кинематических условий, что существенно повышает трудоёмкость вычислений. Ротационная обработка [12; 13; 14; 15] является сложным многопараметрическим процессом, включающим нестационарное взаимодействие режущей кромки и заготовки.

Для снижения ресурсоёмкости моделирования использован стационарный прочностной анализ, позволяющий оценить напряжения в характерные моменты процесса и для проектирования ротационного резца [16; 17]: глубина резания a_p; геометрические параметры диаметра режущей пластины $d_{рп}$ и угла наклона режущей кромки λ; схемы закрепления при жёстком закреплении и через подшипниковый узел.

Расчёты выполнены методом конечных элементов (МКЭ) в модуле Solid Mechanics программы COMSOL Multiphysics. При моделировании использованы (таблица 1 и 2): эмпирические зависимости теории и режимов резания, свойства материала пластины Т15К6, геометрические модели пластин по ГОСТ 19072–80 с диаметрами 15,875 мм; 19,050 мм; 25,4 мм.

Таблица 1 – Свойства твердого сплава для моделирования [18]

	Модуль Юнга, $E{\cdot}10^3$МПа	Коэффициент	Плотность, ρ кг/м^3
Сплав Т15К6	Пуансона	Плотность,	11 500
	ρ кг/м3		

Таблица 2 – Параметры сил резания при моделировании

t, мм	P_z, Н	P_y, Н	P_x, Н
0.5	200	60	20
1.0	400	120	40
2.0	800	240	80

Моделирование напряжённо-деформированного состояния режущей пластины выполнялось поэтапно, с последовательным усложнением граничных условий и схемы нагружения.

Разработана базовая 3D модель, в которой пластина закреплялась жёстко по опорной поверхности, что позволяло исключить влияние подшипникового узла и оценить собственные напряжения в материале твердого сплава при действии внешних сил.

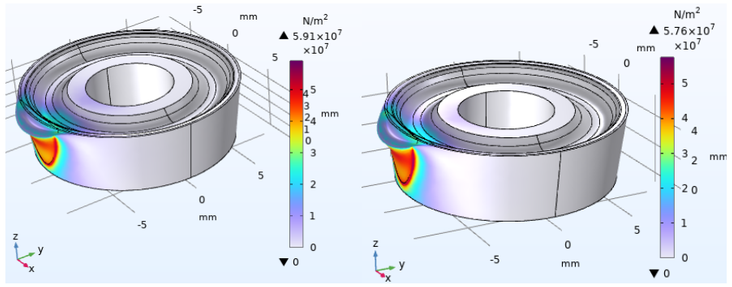
Для имитации процесса резания зона контакта была предварительно выделена геометрически: участок режущей части моделировался с учётом рабочей глубины резания и установленного угла наклона λ. Силовое воздействие задавалось в виде компонента сил резания, приложенных к поверхности контакта между режущей кромкой и заготовкой. Нагрузки прикладывались к заранее выделенной рабочей области пластины, что обеспечивало корректное распределение напряжений вдоль дуги режущей кромки и позволяло проследить влияние параметров резания на локальную концентрацию напряжений (рисунок 6).

Результаты моделирования, представленные на графиках рисунка 7, показывают, что увеличение диаметра пластины приводит к постепенному снижению концентрации максимальных напряжений во всех исследованных режимах глубины резания.

При малых диаметрах (d = 15,875 мм) напряжения достигают наибольших значений, что обусловлено меньшей площадью восприятия нагрузки и выраженной локализацией силового воздействия.

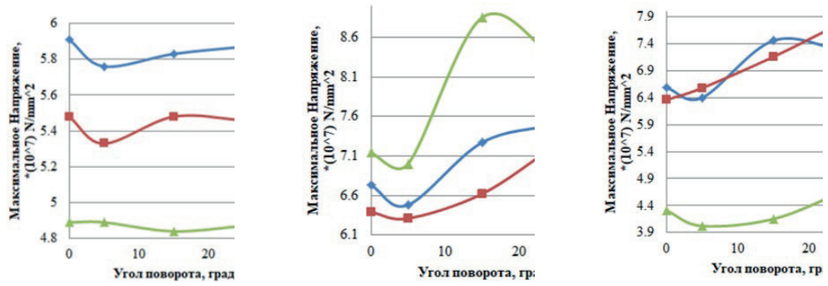
Для пластин большего диаметра (19,05 и 25,4 мм) интенсивность напряжений уменьшается, что подтверждает повышение жёсткости и распределение нагрузки по большей площади режущего элемента.

Влияние угла поворота λ характеризуется нестабильной реакцией для всех диаметров. На большинстве кривых наблюдается локальное снижение напряжений в диапазоне λ = 5–10° после чего значения начинают возрастать. Угол наклона требует дополнительной проверки во второй части исследования.



а) б)

Рисунок 6 – Результат исследования пластины (d=15.875 мм) поворот режущей кромки 00(а) и 50(б) при глубине резания 0.5 мм



а) б) в)

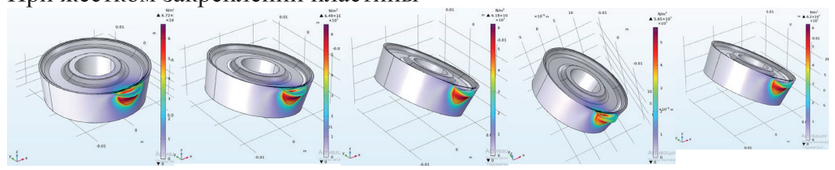
Рисунок 7 – Зависимость максимального напряжения от угла поворота при глубине резания 0,5 мм (а), 1 мм (б), 2 мм (в) для пластин различных диаметров

Затем моделирование напряжённо-деформированного состояния при иной схеме закрепления режущей пластины. Рассматривались два варианта: жёсткое закрепление пластины по основанию и по центровому отверстию; комбинированное закрепление, включающее жёсткую фиксацию основания и применение условия типа Roller к центровому отверстию. Второй вариант воспроизводит условия установки режущей пластины в подшипниковом узле в вертикальной ориентации и позволяет учесть перемещения, возникающие при реальной работе ротационного резца.

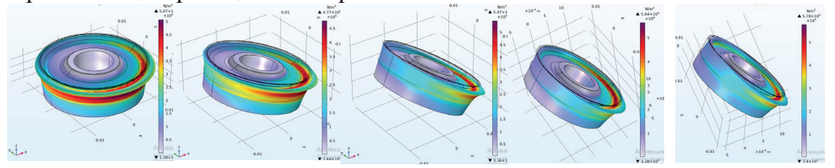
Силовое воздействие задавалось аналогично: компоненты сил резания прикладывались к локальной рабочей зоне режущей части при жёстком закреплении пластины. При имитации ротационного резания нагружение реализовывалось по кольцевой схеме, учитывающей фактическую глубину резания и положение активной дуги режущей кромки.

Результаты исследования пластины диаметром 25,4 мм под различными углами при двух схемах закрепления представлены на рисунке 8.

При жестком закреплении пластины



При имитации ротационного резания



а) б) в) г) д)

Рисунок 8 – Результат исследования пластины при повороте режущей кромки на 0˚(а),15˚(б), 30˚(в), 45˚(г), 60˚(д)

В ходе анализа результатов были получен график, изображённый на рисунке 9, показывающий следующие результаты:

– для жёсткого закрепления максимальные напряжения находятся в диапазоне Н/м², что соответствует достаточно высокому уровню нагрузки на режущую пластину. Характер изменения напряжений по углу наклона следующий: при λ = 0° наблюдается наибольшее значение 67.2×10⁶ Н/м²; по мере увеличения угла до 30° напряжения снижаются до минимума – примерно 56.5×10⁶ Н/мм²; при углах 45–60° напряжения снова возрастают до 62×10⁶ Н/мм². Такое поведение связано с перераспределением сил по дуге режущей кромки: при малых углах действует более концентрированная нагрузка, при средних – зона контакта смещается в область с более благоприятной геометрией, а при дальнейших увеличениях

угла возникает дополнительная локальная концентрация вследствие изменения ориентации силового воздействия.

– для ротационной схемы напряжения значительно ниже – 4.77–5.78×10⁶ Н/м², что на порядок меньше, чем при жёстком закреплении. Изменение напряжений по углу наклона более плавное: при λ = 0°– 5,07×10⁶ Н/м²; при λ = 15–45° наблюдается небольшое повышение, до 5.47–5.64×10⁶ Н/м²; при ψ = 60° – лёгкий рост до 5.78×10⁶ Н/м². Кривая имеет гладкий, почти линейный характер, что отражает более равномерное распределение сил при вращении пластины и частичное снятие жесткости за счёт степеней свободы, характерных для подшипникового узла.

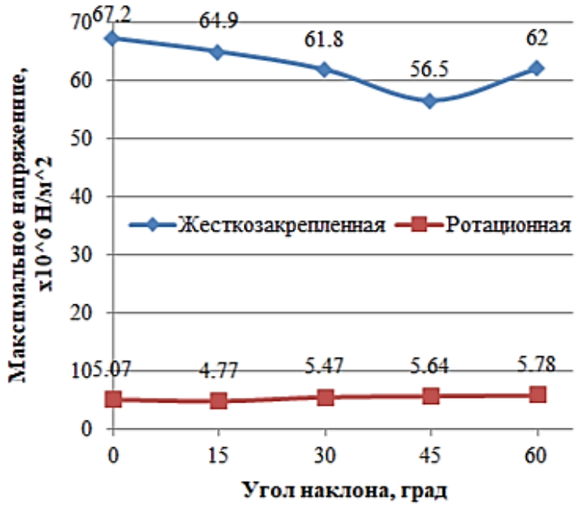


Рисунок 9 – Результаты моделирования по двум схемам установки

Сравнение графиков показывает жёсткое закрепление приводит к почти десятикратному увеличению максимальных напряжений, поскольку пластина вынуждена воспринимать полную нагрузку без возможности компенсации перемещениями или микроповоротами.

Ротационная схема обеспечивает существенно более низкий уровень напряжений, за счёт распределения сил по кольцевой зоне, наличия дополнительной степени свободы, снижения концентрации напряжений в области вершины режущей кромки. Форма зависимости от угла λ различается: жёсткое закрепление даёт выраженный минимум при λ≈30°, ротационное – показывает слабую зависимость и отсутствие резких скачков. Исследование влияния углов поворота следует уточнить при эмпирических исследованиях. Однако результаты подтверждают, что подшипниковый узел и ротационный режим критически важны для снижения напряжённости конструкции.

Результаты моделирования доказывают, что переход от жёстко закреплённой режущей пластины к ротационной схеме снижает максимальные напряжения в

9–12 раз, обеспечивает более плавное распределение НДС и уменьшает влияние угла наклона на локальные концентрации напряжений. Тем самым ротационный режим повышает долговечность инструмента и устойчивость процесса резания.

Таким образом, разработанная конструкция объединяет самовращение режущего элемента без внешнего привода, регулируемую геометрию установки, контролируемое стружкообразование и повышение стойкости режущей кромки. Такое техническое решение позволяет реализовать преимущества ротационной обработки на универсальном токарном оборудовании, обеспечивает снижение тепловой и вибрационной нагрузки, улучшение качества поверхности, повышение точности формообразования и расширение области применения чистовой обработки на различных конструкционных материалах.

Информация о финансировании

Исследования выполнены в рамках планово-целевого финансирования на 2024–2026 годы по программе ИРН BR24993003 «Разработка комплекса мероприятий инструментального обеспечения обрабатывающих отраслей экономики РК», финансируемой Комитетом Науки МНиВО РК.

Выводы

В результате исследований процесса ротационного точения и разработки конструкции ротационного безвершинного поворотного токарного резца со стружколомом получены следующие выводы:

1. Разработана модель износа самовращающейся кромки, реализованная в Python, с учётом динамики вращения, сил резания и метода Монте-Карло, которая показывает, что вращение снижает пиковые нагрузки, уменьшает глубину износа на 25–30 % и увеличивает ресурс инструмента в 2–3 раза по сравнению с жёсткими резцами.

2. Выполнен конечно-элементный анализ НДС режущей пластины; установлено, что увеличение диаметра уменьшает максимальные напряжения σ_{max}, а применение ротационной схемы с подшипниковым узлом уменьшает в 9–12 раз и стабилизирует зависимость НДС от λ, повышая долговечность резца.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Грановский, Г. И.** Резание металлов : учебник для вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с.

2 Turning of difficult-to-machine materials with actively driven rotary tool / A. Hosokawa, T. Ueda, R. Onishi, T. Furumoto, Y. Tanaka // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59. – № 1. – P. 89–92. – https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.053, 11.09.2025.

3 High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe / H. Sasahara, A. Kato, H. Nakajima, H. Yamamoto, T. Muraki, M. Tsutsumi // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – P. 841–850. – https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.12.002, 11.09.2025.

4 Face rotary turning tools (FRTT) in high productivity process / J. Cieloszyk // Mechanik. – 2019. – T. 92. – https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.100.

5 **Joch, R., Cedzo, M., Czán, A., Šajgalík, M., Holubják, J., Drbúl, M., Markovič, J., Matuš, M.** Impact of Chip Breaker Geometry on the Performance of Actively Rotary Monolithic Turning Tools. Materials. – 2025. – 18. – 1154. – https://doi.org/10.3390/ma18051154, 12.09.2025.

6 **Дальский, А. М.** Справочник технолога-машиностроителя : справочное издание. В 2 т. Т. 1 / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, А. Г. Косилова и др.; под ред. И. Н. Жестковой, П. Е. Клейзера. – М. : Машиностроение, 2001. – 910 с.

7 **Землянский, В. А.** Обработка высокопрочных материалов инструментами с самовращающимися резцами / В. А. Землянский. – Киев : Техника, 1980. – 115 с.

8 **Землянский, В. А.** Конструирование и эксплуатация инструментов с самовращающимися резцами : конспект лекций / В. А. Землянский ; под ред. к. т. н. доц. Аврамова В. И. – Ростов-на-Дону : ИПК Минсельхозмаша, 1984. – 67 с.

9 Modeling of tool wear during hard turning with self-propelled rotary tools / H. A. Kishawy, L. Pang, M. Balazinski – https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.08.009 // International Journal of Mechanical Sciences. – 2011. – Vol. 53. – № 11. – P. 1015–1021.

10 **Попок, Н. Н.** Теория резания металлов : учеб. метод. комплекс для студ. Машиностроительных спец. – Новополоцк : Полоцкий гос. ун-т, 2005. – 240 с.

11 Патент № KZ 36087 Республика Казахстан. Ротационный безвершинный поворотный токарный резец со стружколомом: № 2021/0794.1: заявл. 27.12.2021: опубл. 10.02.2023 / Касенов А. Ж., Евтушенко Т. Л., Мусина Ж. К., Итыбаева Г. Т., Абишев К. К., Искакова Д. А., Янюшкин А. С.

12 **Луб, Т. Л.** Обоснование геометрических параметров режущей пластины ротационного безвершинного поворотного токарного резца / Т. Л. Луб, А. Ж. Касенов, Ж. К. Мусина, Л. Р. Мусина, А. С. Янюшкин // Наука и техника Казахстана. – 2024. – № 2. – С. 106–111. – https://doi.org/10.48081/XCYF9793.

13 Влияние режима резания при ротационном точении многогранными резцами на температурно-силовые характеристики формообразования / А. С. Бинчуров, Ю. И. Гордеев, В. Б. Ясинский [и др.] // Вестник машиностроения. – 2022. – № 2. – С. 74–79. – https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-2-74-79.

14 **Hadzhiyski, P.** Knives for rotary dies with variable geometry / P. Hadzhiyski // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – № 4. – P. 131–135.

15 **Индаков, Н. С.** Особенности ротационного точения многогранными резцами / Н. С. Индаков, А. С. Бинчуров // Вестник машиностроения. – 2013. – № 10. – С. 56–58.

16 **Евтушенко, Т. Л.** Проблемы конструкций ротационных резцов при эксплуатации / Т. Л. Евтушенко, А. С. Янюшкин, А. Ж. Касенов // Инновационные технологии в машиностроении : Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции, Юрга, 26–28 мая 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 17–19.

17 Анализ конструкций ротационных резцов / Т. Л. Евтушенко, А. Ж. Касенов, Ж. К. Мусина [и др.] // СТИН. – 2022. – № 11. – с. 12-15.

18 **Грубый, С. В.** Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов / С. В. Грубый // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2017. – № 1. – С. 25–37. – https://doi.org/10.24108/aplts.0117.0000058.

REFERENCES

1 **Granovskij, G. I., Granovskij, V. G.** Rezanie metallov : uchebnik dlya vuzov [Metal cutting : textbook for universities] [Text]. – Moscow : Vyssh. shk., 1985. – 304 p.

2 Turning of difficult-to-machine materials with actively driven rotary tool / A. Hosokawa, T. Ueda, R. Onishi, T. Furumoto, Y. Tanaka // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59. – № 1. – P. 89–92. – https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.053, 11.09.2025.

3 High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe / H. Sasahara, A. Kato, H. Nakajima, H. Yamamoto, T. Muraki, M. Tsutsumi // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – P. 841–850. – https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.12.002, 11.09.2025.

4 Face rotary turning tools (FRTT) in high productivity process / J. Cieloszyk // Mechanik. – 2019. – T. 92. – https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.100.

5 **Joch, R., Cedzo, M., Czán, A., Šajgalík, M., Holubják, J., Drbúl, M., Markovič, J., Matuš, M.** Impact of Chip Breaker Geometry on the Performance of Actively Rotary Monolithic Turning Tools. Materials. – 2025. – 18. – 1154. – https://doi.org/10.3390/ma18051154, 12.09.2025.

6 **Dal'skij, A. M., Suslov, A. G., Kosilova, A. G. et al.** Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya : spravochnoe izdanie. V 2 t. T. 1 [Handbook of a mechanical engineer : reference edition. In 2 vol. Vol. 1] [Text]. Ed. by Zhestkova, I. N., Klejzer, P. E. – Moscow : Mashinostroenie, 2001. – 910 p.

7 **Zemlyanskij, V. A.** Obrabotka vysokoprochnyh materialov instrumentami s samovrashhayushhimisya rezcami [Processing of high-strength materials with self-rotating cutter tools] [Text]. – Kiev : Tehnika, 1980. – 115 p.

8 **Zemlyanskij, V. A.** Konstruirovanie i ekspluataciya instrumentov s samovrashhayushhimisya rezcami : konspekt lekcij [Design and operation of tools with self-rotating cutters : lecture notes] [Text]. Ed. by Avramov, V. I. – Rostov-on-Don : IPK Minsel'hozmasha, 1984. – 67 p.

9 Modeling of tool wear during hard turning with self-propelled rotary tools / H. A. Kishawy, L. Pang, M. Balazinski – https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.08.009 // International Journal of Mechanical Sciences. – 2011. – Vol. 53. – № 11. – P. 1015–1021.

10 **Popok, N. N.** Teoriya rezaniya metallov : ucheb. metod. kompleks dlya stud. Mashinostroitel'nyh spec. [Theory of metal cutting : educational and methodical complex for students of mechanical engineering specialties] [Text]. – Novopolotsk : Polotsk State University, 2005. – 240 p.

11 **Kasenov, A. Zh., Evtushenko, T. L., Musina, Zh. K., Itybaeva, G. T., Abishev, K. K., Iskakova, D. A., Yanyushkin, A. S.** Patent № KZ 36087 Respublika Kazahstan. Rotacionnyj bezvershinnyj povorotnyj tokarnyj rezec so struzhkolomom: No. 2021/0794.1: zayavl. 27.12.2021: opubl. 10.02.2023 [Patent № KZ 36087 Republic of Kazakhstan. Rotary apexless indexable turning tool with a chipbreaker: № 2021/0794.1: appl. 27.12.2021: publ. 10.02.2023] [Text].

12 **Lub, T. L., Kasenov, A. Zh., Musina, Zh. K., Musina, L. R., Yanyushkin, A. S.** Obosnovanie geometricheskih parametrov rezhushhej plastiny rotacionnogo bezvershinnogo povorotnogo tokarnogo rezca [Justification of geometrical parameters of the cutting insert of a rotary apexless indexable turning tool] [Text]. In Nauka i tehnika Kazahstana [Science and Technology of Kazakhstan]. – 2024. – № 2. – P. 106–111. – https://doi.org/10.48081/XCYF9793.

13 **Binchurov, A. S., Gordeev, Yu. I., Yasinskij, V. B. et al.** Vliyanie rezhima rezaniya pri rotacionnom tochenii mnogogrannymi rezcami na temperaturno-silovye harakteristiki formoobrazovaniya [Influence of cutting mode during rotary turning with polyhedral tools on temperature and force characteristics of shaping] [Text]. In Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]. – 2022. – № 2. – P. 74–79. – https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-2-74-79.

14 Hadzhiyski, P. Knives for rotary dies with variable geometry / P. Hadzhiyski // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii [Problems of Mechanical Engineering and Automation]. – 2011. – № 4. – P. 131–135.

15 **Indakov, N. S., Binchurov, A. S.** Osobennosti rotacionnogo tocheniya mnogogrannymi rezcami [Features of rotary turning with polyhedral cutters] [Text]. In Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]. – 2013. – № 10. – P. 56–58.

16 **Evtushenko, T. L., Yanyushkin, A. S., Kasenov, A. Zh.** Problemy konstrukcij rotacionnyh rezcov pri ekspluatacii [Problems of rotary cutters structures during operation] [Text]. Innovacionnye tehnologii v mashinostroenii : Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Yurga, 26–28 maya 2022 goda [Innovative Technologies in Mechanical Engineering : Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference]. – Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2022. – P. 17–19.

17 **Evtushenko, T. L., Kasenov, A. Zh., Musina, Zh. K. et al.** Analiz konstrukcij rotacionnyh rezcov [Analysis of designs of rotary cutters] [Text]. In STIN. – 2022. – № 11. – P. 12–15.

18 **Grubyj, S. V.** Raschet parametrov struzhkoobrazovaniya i sil rezaniya plastichnyh materialov [Calculation of chip formation parameters and cutting forces of plastic materials] [Text]. In Mashiny i ustanovki : proektirovanie, razrabotka i ekspluataciya [Machines and Plants: Design, Development and Operation]. – 2017. – № 1. – P. 25–37. – https://doi.org/10.24108/aplts.0117.0000058.

Поступило в редакцию 06.06.26.
Поступило с исправлениями 06.06.26.
Принято в печать 08.06.26.

А. Ж. Касенов[1], *Т. Л. Луб[2], Ж. К. Мусина[3], Г. Т. Итыбаева[4], А. Д. Сулейменов[5]
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[3]Қазақ Ұлттық Су Шаруашылығы Және Ирригация Университеті, Қазақстан Республикасы, Тараз қ.
06.06.26 ж. баспаға түсті.
06.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
08.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

РОТАЦИЯЛЫҚ ҰШСЫЗ ЖОҢУ КЕСКІШТІҢ ТОЗУЫН ЖӘНЕ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІН ТАЛДАУ

Мақалада жоңқа сындырғышы бар ротациялық ұшсыз бұрылмалы токарлық кескішті қолдану арқылы сыртқы беттерді ротациялық токарлық өңдеу процесі қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі кескіш құралдың төзімділігін арттыру, кесу аймағындағы жергілікті артық жүктемелерді азайту, сондай-ақ кесу жиегін негұрлым біркелкі пайдалануды қамтамасыз ету қажеттілігімен байланысты. Дәстүрлі, қиғаш бұрышты, ротациялық, дірілмен көмекші және прецизиялық токарлық өңдеуді қоса алғанда, токарлық өңдеудің қолданыстағы сұлбаларына талдау жасалды. Күштік және жылулық жүктемелерді кесу жиегінің шеңбері бойынша қайта бөлуге мүмкіндік беретін өздігінен айналатын кескіш пластинасы бар ротациялық сұлба толығырақ сипатталды.

Ротациялық ұшсыз кескіштің конструкциясы ұсынылды. Ол айналмалы осьтен, кескіш пластинадан, подшипникті тораптан, державкадан және кесу жиегінің көлбеу бұрышын бұру механизмінен тұрады. Құралдың жұмысқа қабілеттілігін бағалау үшін өздігінен айналу динамикасын, кесу күштерінің құраушыларын, қалыпты қысымды және кесілетін қабатпен жанасудың ықтималдық сипатын ескеретін тозу моделі әзірленді.

Әртүрлі диаметрлер, көлбеу бұрыштары және бекіту сұлбалары кезінде кескіш пластинаның кернеулі-деформацияланған күйіне соңғы элементтер әдісімен талдау жүргізілді. Пластина диаметрінің ұлғаюы максималды кернеулерді төмендететіні, ал бұрылмалы подшипникті торабы бар ротациялық сұлбаны қолдану жүктемені қатты бекітумен салыстырғанда кернеу деңгейін 9–12 есе азайтатыны анықталды.

Алынған нәтижелер ұсынылған конструкцияның құралдың ұзақ мерзімділігін арттыруға және кесу процесінің тұрақтылығын қамтамасыз етуге тиімді екенін растайды.

Кілтті сөздер: ротациялық жону, ұшсыз кескіш, өздігінен айналатын пластина, жоңқа сындырғыш, тозу, кернеулі-деформацияланған күй, соңғы элементтер әдісі.

A. Zh. Kassenov[1], *T. L. Lub[2], Zh. K. Mussina[3],
G. T. Itybayeva[4], A. D. Suleimenov[5]
[1,2,3,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[3]Kazakh National University of Water Management and Irrigation,
Republic of Kazakhstan, Taraz.
Received 06.06.26.
Received in revised form 06.06.26.
Accepted for publication 08.06.26.

ANALYSIS OF WEAR AND STRESS-STRAIN STATE OF A ROTARY NON-TIP TURNING TOOL

The article considers the process of rotary turning of external surfaces using a rotary non-tip adjustable turning tool with a chip breaker. The relevance of the study is related to the need to increase the durability of the cutting tool, reduce local overloads in the cutting zone, and provide more uniform use of the cutting edge. Existing turning methods are analyzed, including conventional, oblique, rotary, vibration-assisted, and precision turning. The rotary scheme with a self-rotating cutting insert is described in more detail, as it makes it possible to redistribute force and thermal loads along the circumference of the cutting edge.

The design of the rotary non-tip tool is presented. It includes a rotating axis, a cutting insert, a bearing unit, a tool holder, and a mechanism for adjusting the inclination angle of the cutting edge. To evaluate the performance of the tool, a wear model was developed. The model takes into account the dynamics of self-rotation, cutting force components, normal pressure, and the probabilistic nature of contact with the removed layer.

A finite element analysis of the stress-strain state of the cutting insert was carried out for different diameters, inclination angles, and fixing schemes. It was found that increasing the insert diameter reduces maximum stresses, while the use of a rotary scheme with an adjustable bearing unit decreases the stress level by 9–12 times compared with rigid fixing.

The obtained results confirm the effectiveness of the proposed design for increasing tool life and improving the stability of the cutting process.

Keywords: rotary turning, non-tip tool, self-rotating insert, chip breaker, wear, stress-strain state, finite element analysis.

SRSTI 55.22.19
https://doi.org/10.48081/BGQF2221

G. A. Kokayeva[1], *Zh. M. Ramazanova[2], M. M. Mursalykova[3],
A. Sarsenkyzy[4], M. Bembenek[5]
[1,4]S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[2]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana;
[3]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey;
[5]AGH University of Krakow, Poland, Krakow.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9571-5081
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1419-2886
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2764-4098
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8058
*e-mail: zhanat2005@yandex.kz

ANALYSIS AND COMPARATIVE ASSESSMENT OF MACHINE PART RESTORATION METHODS

The restoration of worn machine parts is an important task in modern mechanical engineering. It contributes to increasing the reliability and durability of equipment, as well as reducing operating and repair costs. One of the effective ways to solve this problem is the use of wear-resistant protective coating technologies, which improve the performance characteristics of the working surfaces of machine parts. This paper presents an analytical review of scientific publications from the past 15 years devoted to the study of methods for producing wear-resistant protective coatings designed to withstand conditions of severe abrasive wear. The aim of this study is to systematize and summarize current scientific data on coating formation methods designed to improve the wear resistance and durability of machine parts. The methods under consideration are broadly classified into traditional, modern, and innovative categories. Traditional repair methods include machining, welding, and surfacing, which allow for the restoration of parts' geometric dimensions and a partial improvement in their wear resistance. However, despite their widespread industrial use, these methods are characterized by significant labor and energy costs, and may also lead to changes in the structure and a reduction in the strength properties of the base material. In response to growing demands for the operational reliability and service life of machinery and equipment, modern, innovative surface hardening and restoration technologies are being actively developed, including plasma spraying, electro-spark alloying, ion-plasma methods, gas-thermal spraying, electric arc metallization, and other surface modification techniques. The use of these technologies enables the creation of coatings with improved physical, mechanical, and tribological properties, resulting in a significant increase in the wear resistance, corrosion resistance, and service life of machine parts.

Keywords: wear-resistant coatings, surface modification, plasma spraying, electrical discharge alloying, arc spraying.

Introduction

In today's rapidly evolving field of mechanical engineering for the food industry, improving the reliability and durability of processing equipment is of paramount importance. Intensive use of equipment leads to wear and tear on its working parts, necessitating periodic repair or replacement. This problem is particularly acute for equipment operating under conditions of high mechanical stress, abrasive wear, and exposure to corrosive environments.

One of the key sectors of the Republic of Kazakhstan's agro-industrial complex is vegetable oil production. Kazakhstan possesses significant resources for growing oilseeds such as sunflower, safflower, rapeseed, and soybeans. One of the key stages in oilseed processing is the pressing process, in which screw presses are widely used. During the processing of hard oilseeds, such as safflower, the working parts of the presses are subjected to intense abrasive wear. As a result, the service life of the screws typically does not exceed 1–2 years, necessitating frequent replacement or repair.

In this regard, the development and refinement of component restoration technologies have become particularly important, as they help extend the service life of equipment and reduce operating costs.

This paper analyzes existing and innovative methods for restoring parts for various purposes, based on the literature.

Materials and methods

This study presents a systematic analysis of scientific publications from 2010 to 2025. The literature search was conducted in the scientometric databases Scopus, Web of Science, SpringerLink, CrossRef, and eLIBRARY using the keywords: wear-resistant coatings, surface modification, plasma spraying, electric spark alloying, and arc spraying. The review includes scientific publications containing experimental results on the study of wear-resistant coatings.

Results and discussion

The methods of component restoration and the production of wear-resistant coatings discussed in this paper can be classified based on their effect on the material, the method of forming the restoration layer, and the energy sources used. Depending on their technological characteristics, they can be broadly divided into several groups: traditional restoration methods, modern coating technologies, and innovative surface modification methods. Traditional methods include machining, welding, and various types of surfacing, which are primarily aimed at restoring the geometric parameters of parts. Modern methods include gas-thermal and plasma spraying technologies, electric spark alloying, and electric arc metallization, which allow for the formation of protective coatings with improved physical and mechanical properties. Innovative technologies also include ion-plasma, vacuum, and nanotechnological methods, which enable modification of the surface layer at the micro- and nano-levels. This classification

allows for the systematization of existing approaches to component restoration and a comparative analysis of their effectiveness.

Traditional methods of restoring parts.

Traditional methods for restoring machine parts include machining, welding, and surfacing. Machining is used to eliminate surface defects and restore the geometric parameters of parts. However, this method is limited in its ability to remove significant damage and wear.

The surfacing method is widely used to restore worn surfaces of parts. Studies show that one area for improving surfacing technology is controlling the shaping of the deposited metal to reduce the amount of subsequent machining [1].

The main areas of development in surfacing technologies include:

− plastic deformation of the deposited metal in the solid state;

− forming a layer in the viscoplastic state using shaping devices;

− combining surfacing and machining processes;

− the application of hybrid technologies utilizing various types of energy.

Another approach involves the use of ultrasonic vibrations during the formation of the deposited layer. However, these methods require direct contact between the shaping devices and the molten metal, which leads to significant wear and thermal damage [1].

Research in [2] showed that rolling the deposited metal with a force of 5 kN on the rollers increases the wear resistance of the metal coating by 28 %, with a force of 7.5 kN – by 61 %, and with a force of 10 kN – by nearly 100 %. The coefficient of friction for rolled samples is lower than that for welded samples. During friction testing, unrolled samples heated up to 135–155°C, those rolled with a force of 5 kN to 127-128°C, and those rolled with a force of 7.5 kN – up to 120-123°C, with a force of 10 kN – up to 112–114°C, and with a force of 12.5–15 kN – up to 107–108°C. After 20000 m of friction run at a specific pressure of 7.5 MPa, samples deposited without rolling show signs of metal cavitation on the friction surface in the form of dark spots and deep grooves, while samples deposited with rolling using rollers at a force of 10 kN have a friction surface in good condition.

Technologies for the thermofrictional treatment of component surfaces have also been developed. The study [3] demonstrates that the application of wear-resistant materials (e.g., STOODY M7-G) through cladding can increase a tool's wear resistance by a factor of 1.5 to 2 compared to traditional tools. Additional surface hardening can be achieved using ultrasonic plastic deformation (UPD). This method promotes the formation of a hardened surface layer and improves the performance characteristics of components.

Modern methods for applying wear-resistant coatings.

An analysis of the studies presented shows that traditional repair methods (welding, surfacing) remain the most widely used due to their technological accessibility. However, they are accompanied by significant thermal effects on the base metal and require subsequent machining. In contrast, modern spraying methods and ion-plasma technologies allow for the formation of coatings with higher hardness, wear resistance, and lower porosity.

One such method is plasma spraying [4]. In the plasma spraying process, powdered material is fed into a high-temperature plasma jet, where it melts and is deposited onto the surface of the workpiece. Nickel-based powders, which possess high wear resistance and corrosion resistance, are often used as the cladding material. The particle size range is 45–90 μm. Chemical composition: Ni – base, Cr – 4 %, B – 1 %, Si – 2.8 %, Mo – 3 %. Hardness: 32–37 HRC. The permissible coating thickness can be 1–5 mm.

A promising method is gas-dynamic coating deposition, in which powder particles are accelerated by a supersonic gas flow and deposited onto the surface of the workpiece [4]. This method allows for the formation of dense coatings with good adhesion.

The electric spark alloying method is also widely used for the repair of worn parts [5]. When tungsten carbide-based powders are used, coatings with high hardness (6.4–9.2 GPa) and a significantly lower wear rate compared to the base material are obtained. Studies of mass transfer kinetics during electric spark alloying with a non-localized electrode have shown that the resulting powder is deposited together with steel granules at a rate of 1.9–2.6 mg/(cm² · min). The resulting coatings consist of tungsten-containing and iron-containing phases, the elements of which are uniformly distributed throughout the coating depth.

Another promising area of research involves the production of nanostructured coatings. This method involves forming coatings using a stream of nanoparticles generated by cooling a high-temperature gas flow. The resulting coatings exhibit high corrosion resistance and wear resistance.

Ion-Plasma and vacuum technologies.

Ion-plasma coating technology plays a significant role among modern technologies. In study [6], a technology for applying wear-resistant (TiCr)N coatings to tool steels was developed. A general diagram of the ion-plasma spraying process is shown in Figure 1.

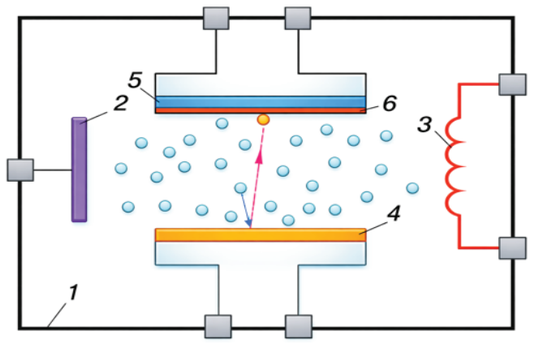


Figure 1 – Schematic diagram of a four-electrode sputtering setup:
1 – vacuum chamber; 2 – anode; 3 – cathode; 4 – target;
5 – substrate; 6 – amorphous material

Under the influence of an arc discharge, the cathode material evaporates, ionizes, and is transferred to the workpiece (substrate), forming a durable coating with high adhesion and strength. Tests have shown a 6- to 10-fold increase in tool life.

Ion implantation is also used for surface modification [7], as it enhances the hardness, wear resistance, and corrosion resistance of metal products. Additional heat treatment improves the adhesion of coatings and their performance characteristics.

Studies of NiAl-Cr_2O_3-Mo-Ag composite coatings have shown that the addition of oxide components (Cr_2O_3) significantly reduces the wear rate of the coating. Upon subsequent heat treatment (at 500 °C), the microstructure of the composite coating becomes more uniform, and the coating achieves maximum adhesive strength, microhardness, and optimal tribological properties [8].

Thermal spray and detonation spraying methods.

Thermal spray methods are widely used to apply wear-resistant coatings to machine parts. For example, tungsten carbide-based coatings have high microhardness (up to 2455 HV) and effectively protect surfaces from abrasive wear [9].

Electroplating methods also enable the production of wear-resistant and corrosion-resistant coatings, including nanostructured composite layers [10]. Electrodeposition from an electrolyte solution can be carried out using either pulsed or direct current. Metals such as chromium, nickel, and sometimes cobalt are most commonly deposited as wear-resistant electroplated coatings, as they form a hard, friction-resistant layer. A schematic diagram of the electrodeposition process is shown in Figure 2.

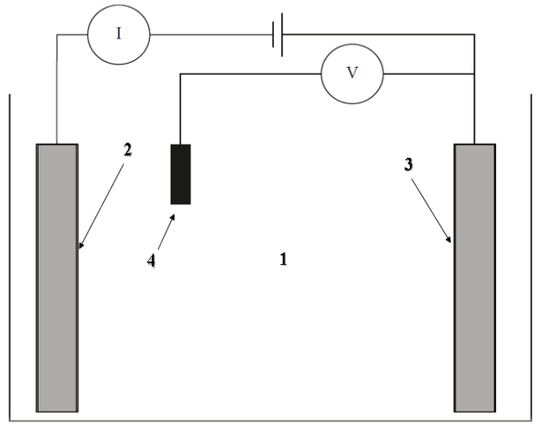


Figure 2 – Schematic diagram of the electroplating process:
1 – electrolyte; 2, 3 – auxiliary electrodes; 4 – workpiece

Recently, the gas-circulation coating method has been developed, enabling the formation of protective layers on complex-shaped parts, including those produced using additive manufacturing technologies [11].

One promising method is high-energy vacuum plasma technology, which enables the formation of multilayer coatings with low friction coefficients and high wear resistance [12].

Electron beam and magnetron sputtering methods are widely used to form ceramic protective coatings [13].

Despite the significant advantages of modern coating technologies, their widespread industrial application is limited by a number of factors. The main ones include the high cost of equipment, the need for thorough surface preparation, and limitations on the thickness of the deposited layers.

Innovative Technologies.

In recent years, metal-ceramic composite coatings have been the subject of active research. For example, NiCrAlY-Al_2O_3-hBN coatings have been produced using detonation spraying, exhibiting high hardness (650–800 HV) and a low coefficient of friction due to the presence of hexagonal boron nitride [14].

Coatings based on nickel alloys reinforced with tungsten carbide particles and produced by plasma arc powder welding are also being investigated [15].

One effective coating method is electric arc metallization [16; 17]. In this process, wire electrodes are melted by an electric arc, and the molten particles are transferred to the surface by a jet of compressed air, forming a dense coating with high adhesion. A diagram of the coating application using this method is shown in Figure 3.

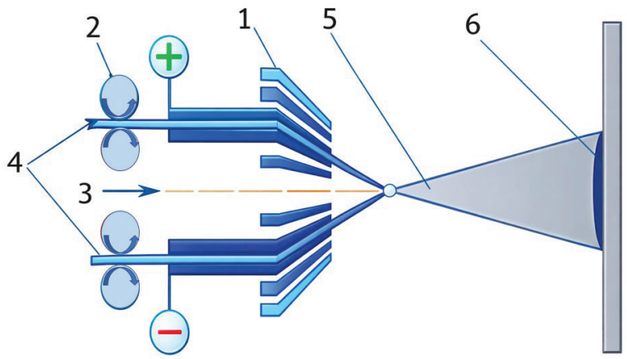


Figure 3 – Coating application diagram: 1 – metallizer housing;
2 – wire feed mechanism; 3 – compressed air supply channel;
4 – electrode wires; 5 – arc zone with atomized particles; 6 – coating

Anti-friction coatings made of hexagonal boron nitride (h-BN) produced by magnetron sputtering (PVD) show great promise [18]. Such coatings exhibit a superlubricity effect at high temperatures.

Thermal spraying methods, including plasma spraying and HVOF, enable the production of dense, wear-resistant coatings made of superalloys and high-entropy alloys that retain their strength at temperatures above 1200°C [19].

Studies have also demonstrated the high effectiveness of FeNiCrAl coatings produced by high-speed arc spraying. Such coatings exhibit a significantly lower coefficient of friction and high wear resistance due to the formation of a protective oxide film [20].

A comparative assessment of the mechanical and tribological characteristics of the coatings, based on a review of the literature, is presented in Table 1.

Table 1 – Comparison of the mechanical and tribological characteristics of coatings

Coating deposition method	Coating type	Microhardness	Coefficient of friction	Increase in wear resistance	Coating thickness
Surfacing	Fe-Cr-C alloys	400–700 HV	0.45–0.60	1.5–3-fold	1–5 mm
Plasma spraying	NiCr, NiAl, WC-Co	600–1200 HV	0.30–0.45	3–5-fold	0.1–5 mm
HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel) spraying	WC-Co, WC-CoCr	900–1500 HV	0.20–0.35	5–10-fold	0.05–2 mm
Detonation spraying	NiCrAlY-Al_2O_3	650–900 HV	0.15–0.30	6–12-fold	0.05–1 mm
Electro-spark alloying	WC, TiC	6–9 GPa	0.25–0.40	2–4-fold	20–100 μm
PVD	TiN, TiAlN, CrN	1500–3000 HV	0.10–0.30	5–8-fold	1–5 μm
Electric arc metallization	FeNiCrAl	400–900 HV	0.35–0.50	3–6-fold	0.3–3 mm

A comparison of the technological parameters of the methods is presented in Table 2.

Table 2 – Comparison of the technological parameters of the methods

Method	Process temperature	Coating porosity	Adhesion	Productivity
Surfacing	1500–3000°C	low	high	high
Plasma spraying	10000–15000°C (jet)	5–15 %	high	medium
HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel) spraying	2500–3200°C	1–3 %	very high	high
Gas-dynamic spraying (cold spray)	< 800°C	< 1 %	high	high
Electro-spark alloying	locally up to 8000°C	very low	high	low
PVD	200–500°C	absent	very high	low
Electric arc metallization	2500–3500°C	5–10 %	medium	very high

A general comparative characterization of the methods in terms of efficiency and application area is presented in Table 3.

Table 3 – Comparative characteristics of wear-resistant coating production methods

Method	Principle of the method	Advantages	Disadvantages applications	Application area
Welding and surfacing	Application of molten metal to a surface followed by post-coating treatment	Capability to repair significant wear, high joint strength	Thermal deformation, subsequent processing	Repair of shafts, screws and working parts of machines
Plasma spraying	Melting of powdered material in a plasma jet and its deposition onto a surface	High coating adhesion, possibility of applying thick layers	High equipment cost	Machine parts operating at high temperatures
Gas-dynamic spraying (cold spray)	Deposition of powder particles onto a surface at supersonic velocities without melting	Minimal thermal effect on the substrate, high	High equipment cost	Repair of precision parts, thin-walled structures
Electro-spark alloying	Transfer of electrode material to the workpiece surface as a result of pulsed discharges	High microhardness of the coating, good adhesion	Thin coating layer	Hardening of friction surfaces
PVD (ion-plasma deposition)	Deposition coating from plasma in a vacuum environment	High hardness, low coefficient of friction	Complexity of vacuum equipment	Cutting tools, friction parts
Ion implantation	Introduction of ions of alloying elements into the surface layer of the material	Environmental friendliness, improved corrosion and wear resistance	Complexity of equipment, shallow penetration depth	High-load components
Electroplating	Electrochemical deposition of metals from an electrolyte solution	The possibility of obtaining uniform and nanostructured coatings	Surface preparation required, need for treatment facilities	Protective, wear-resistant, and decorative coatings
Electric arc metallization	Melting the wire by an electric arc and spraying the molten material by a jet of air	High productivity	Porosity of the coating, need for subsequent processing	Restoration of shafts, screws, and large components
Detonation spraying	Deposition of powder particles using the energy of a detonation wave	Dense coatings, high coating adhesion	Technical complexity of the equipment	Wear-resistant coatings
HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel) spraying	Acceleration of coating particles to supersonic velocities during fuel combustion	Low porosity, high wear resistance	High equipment cost	Parts operating in aggressive and high-temperature environments

Thus, the comparative analysis presented in Tables 1–3 shows that each restoration and coating method has its own advantages and limitations. Traditional technologies are effective for restoring the geometry of parts but only marginally improve their wear resistance. Modern methods provide high hardness and resistance of coatings to abrasive wear, but require complex equipment and financial investment. Innovative technologies demonstrate the potential for long-term improvement in the performance characteristics

of parts. The choice of restoration method must take into account the balance between wear resistance, cost-effectiveness, and manufacturing capabilities.

Financing information

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant №AP26100883 «Development of wear-resistant coating by supersonic arc metallization for equipment parts used in the food industry»).

Conclusions

An analysis of scientific publications has shown that the problem of machine part wear remains one of the key challenges in modern mechanical engineering. Traditional repair methods, such as welding and surfacing, continue to be widely used due to their technological accessibility and ability to repair significant wear on parts. At the same time, modern technologies for surface modification and the application of protective coatings allow for the formation of layers with improved physical and mechanical properties, which contributes to a significant increase in the wear resistance and durability of machine parts. The generalizations obtained in this work allow for the identification of the most promising directions for improving the wear resistance of equipment working parts. In particular, the restoration of press screws used in the processing of oilseeds is considered an effective way to extend the service life of processing equipment and reduce operating costs for food industry enterprises.

REFERENCES

1 **Казинский, А. А., Насад, Т. Г.** Повышение эксплуатационных характеристик деталей машин, восстановленных методом наплавки // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2018. – №2(28). – С. 36–41.

2 **Хачкинаян, А. Е., Фисенко, К. С.** Исследование износостойкости упрочнённого наплавленного металлопокрытия // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 245–248.

3 **Шеров, К. Т., Тусупова, С. О., Ракишев, А. К., Доненбаев, Б. С., Мусаев, М. М., Шеров, А. К., Курмангалиев, Т., Сарымбай, А.** Контроль качества и испытание термофрикционных инструментов наплавленных с износостойкими наплавочными материалами // Новости науки Казахстана. – 2020. – № 3(145). – С. 94–103.

4 **Петров, В. М., Федосов, А. В., Шония, К. Н., Буцанец, А. А.** Исследование износостойких покрытий, нанесенных на образцы из конструкционной стали, применяемой для изготовления валов валопровода судов на подводных крыльях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2023. – № 3. – С. 39–48.

5 **Дворник, М. И., Михайленко, Е. А., Бурков, А. А., Быцура, А. Ю.** Создание износостойких покрытий на стали 35 методом электроискрового легирования порошком, полученным электроэрозионным диспергированием твердого сплава

Т5К10 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. –№ 1. – Т. 21. – С. 91–100.

6 **Лавро, В. Н.** Исследование и разработка технологии нанесения износостойких ионно-плазменных покрытий на режущий инструмент из быстрорежущей стали // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 6(14). – С. 36–41.

7 **Chu, P. K., Wu, G. S.** Surface design of biodegradable magnesium alloys for biomedical applications // Surface Modification of Magnesium and Its Alloys for Biomedical Applications. – 2015. – Vol. 1. – P. 89–119.

8 **Li, B., Jia, J., Gao, Y., Han, M., Wang, W.** Microstructural and tribological characterization of NiAl matrix self-lubricating composite coatings by atmospheric plasma spraying // Tribology International. – 2017. – № 109. – P. 563–570.

9 **Markova, I. Yu., Zakharova, E. S., Maslov, A. L., Polushin, N. I., Laptev, A. I., Ovchinnikova, M. S.** The study of microstructure of wear-resistant coatings applied for protection from abrasive wear of horizontal and tilt drilling drill bits // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 857. – P. 1–5.

10 **Wasekar, N. P., Lavakumar, B.** Strengthening mechanisms and tribological aspects of ceramic particle reinforced electrodeposited metal matrix composites – A review // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1037. – P. 1–8.

11 **Кашин, Д. С., Стехов, П. А., Чесноков, Д. В.** Современные тенденции развития газоциркуляционных покрытий // Труды ВИАМ. –2024. – № 1(131). – С. 52–59.

12 **Горлов, Д. С., Александров, Д. А., Черединов, П. Д.** Возможности применения ионно-плазменной технологии при создании износостойкого покрытия для защиты деталей с низкой температурой отпуска // Труды ВИАМ. – 2025. – № 7(149). – С. 36–44.

13 **Артеменко, Н. И., Бенклян, А. С., Стехов, П. А., Александров, Д. А.** Материалы для нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий // Труды ВИАМ. – 2025. – № 2(144). – С. 75–88.

14 **Zhu, Z., Wei, L., Chen, J., Cheng, J., Chen, W., Zhu, S., Yang, J.** Tribological behavior of NiCrAlY/Al2O3/h-BN metal-ceramic composite coatings at wide temperature range by detonation spraying. // Wear. – 2024. – Vol. 550–551. – P. 1–8.

15 **Czupryński, A.** Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Metal Matrix Composite Coatings Deposited on Steel Grade AISI 4715 by Powder Plasma Transferred Arc Welding Part 2. Mechanical and Structural Properties of a Nickel-Based Alloy Surface Layer Reinforced with Particles of Tungsten Carbide and Synthetic Metal–Diamond Composite // Materials. – 2021. – 14(11). – 2805. – P. 1–20.

16 **Рахадилов, Б. К., Магазов, Н. М., Апсежанова, А., Баяндинова, М. Б.** Сравнительный анализ покрытий на основе литой и порошковой проволоки при электродуговой металлизации // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия физика. Астрономия. – 2025. – № 3(152). – С. 26–40.

17 **Коломейченко, А. В., Горленко, А. О., Логачев, В. Н., Титов, Н. В.** Оборудование и технологические рекомендации для нанесения покрытий электродуговой металлизацией // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 4(4). – С. 44–50.

18 **Grigoriev, S. N.** Technologies of Coatings and Surface Hardening: Industrial Applications // Coatings. – 2023. – 13(3). – 511. – P. 1–8.

19 **Jose, S. A., Lapierre, Z., Williams, T., Hope, C., Jardin, T., Rodriguez, R., Menezes, P. L.** Wear and Corrosion-Resistant Coatings for Extreme Environments: Advances, Challenges, and Future Perspectives. // Coatings. – 2025. – 15(8). – 878. – P. 1–31.

20 **Tian, H., Wang, C., Guo, M., Tang, Z., Wei, S., Xu. B.** Study of the frictional-wear performance and abrasion resistance mechanism of a high-speed arc-sprayed FeNiCrAl coating // Surface and Coatings Technology. – 2019. – V. 370. – P. 320–330.

REFERENCES

1 **Kazinskij, A. A., Nasad, T. G.** Povy`shenie e`kspluatacionny`x xarakteristik detalej mashin, vosstanovlenny`x metodom naplavki [Improving the performance characteristics of machine parts restored by surfacing] // Texnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel`stve. – 2018. – № 2(28). – P. 36–41.

2 **Xachkinayan, A. E., Fisenko, K. S.** Issledovanie iznosostojkosti uprochnyonnogo naplavlennogo metallopokry`tiya [Study of the wear resistance of a hardened welded metal coating] // Izvestiya TulGU. Texnicheskie nauki. – 2023. – № 12. – P. 245–248.

3 **Sherov, K. T., Tusupova, S. O., Rakishev, A. K., Donenbaev, B. S., Musaev, M. M., Sherov, A. K., Kurmangaliev, T., Sary`mbaj, A.** Kontrol` kachestva i ispy`tanie termofrikcionny`x instrumentov naplavlenny`x s iznosostojkimi naplavochny`mi materialami [Quality control and testing of thermofricional tools coated with wear-resistant cladding materials] // Novosti nauki Kazaxstana. – 2020. – № 3(145). – P. 94–103.

4 **Petrov, V. M., Fedosov, A. V., Shoniya, K. N., Buczanecz, A. A.** Issledovanie iznosostojkix pokry`tij, nanesenny`x na obrazcy iz konstrukcionnoj stali, primenyaemoj dlya izgotovleniya valov valoprovoda sudov na podvodny`x kry`l`yax [A study of wear-resistant coatings applied to samples of structural steel used in the manufacture of shafts for hydrofoil vessel propeller shafts] // Vestnik Astraxanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya texnika i texnologiya. – 2023. – № 3. – P. 39–48.

5 **Dvornik, M. I., Mixajlenko, E. A., Burkov, A. A., By`czura, A. Yu.** Sozdanie iznosostojkix pokry`tij na stali 35 metodom e`lektroiskrovogo legirovaniya poroshkom, poluchenny`m e`lektroe`rozionny`m dispergirovaniem tverdogo splava T5K10 [Production of wear-resistant coatings on 35 steel using the electric spark alloying method with powder obtained by electro-erosion dispersion of T5K10 hard alloy] // Fundamental`ny`e problemy` sovremennogo materialovedeniya. – 2024. –№ 1. – T. 21. – P. 91–100.

6 **Lavro, V. N.** Issledovanie i razrabotka texnologii naneseniya iznosostojkix ionno-plazmenny`x pokry`tij na rezhushhij instrument iz by`strorezhushhej stali [Research and development of technology for applying wear-resistant ion-plasma coatings to high-speed steel cutting tools] // Sovremenny`e materialy`, texnika i texnologii. – 2017. – № 6(14). – P. 36–41.

7 **Chu, P. K., Wu, G. S.** Surface design of biodegradable magnesium alloys for biomedical applications // Surface Modification of Magnesium and Its Alloys for Biomedical Applications. – 2015. – Vol. 1. – P. 89–119.

8 **Li, B., Jia, J., Gao, Y., Han, M., Wang, W.** Microstructural and tribological characterization of NiAl matrix self-lubricating composite coatings by atmospheric plasma spraying // Tribology International. – 2017. – № 109. – P. 563–570.

9 **Markova, I. Yu., Zakharova, E. S., Maslov, A. L., Polushin, N. I., Laptev, A. I., Ovchinnikova, M. S.** The study of microstructure of wear-resistant coatings applied for protection from abrasive wear of horizontal and tilt drilling drill bits // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 857. – P. 1–5.

10 **Wasekar, N. P., Lavakumar, B.** Strengthening mechanisms and tribological aspects of ceramic particle reinforced electrodeposited metal matrix composites – A review // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1037. – P. 1–8.

11 **Kashin, D. S., Stexov, P. A., Chesnokov, D. V.** Sovremenny`e tendencii razvitiya gazocirkulyacionny`x pokry`tij [Current trends in the development of gas-circulation coatings] // Trudy` VIAM. – 2024. – № 1(131). – P. 52–59.

12 **Gorlov, D. S., Aleksandrov, D. A., Cheredinov, P. D.** Vozmozhnosti primeneniya ionno-plazmennoj texnologii pri sozdanii iznosostojkogo pokry`tiya dlya zashhity` detalej s nizkoj temperaturoj otpuska [Materials for applying ceramic layers of heat-shielding coatings] // Trudy` VIAM. – 2025. – № 7(149). – P. 36–44.

13 **Artemenko, N. I., Benklyan, A. S., Stexov, P. A., Aleksandrov, D. A.** Materialy` dlya naneseniya keramicheskix sloev teplozashhitny`x pokry`tij [Materials for applying ceramic layers of heat-protective coatings] // Trudy` VIAM. – 2025. – № 2(144). – P. 75–88.

14 **Zhu, Z., Wei, L., Chen, J., Cheng, J., Chen, W., Zhu, S., Yang, J.** Tribological behavior of NiCrAlY/Al2O3/h-BN metal-ceramic composite coatings at wide temperature range by detonation spraying. // Wear. – 2024. – Vol. 550–551. – P. 1–8.

15 **Czupryński, A.** Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Metal Matrix Composite Coatings Deposited on Steel Grade AISI 4715 by Powder Plasma Transferred Arc Welding Part 2. Mechanical and Structural Properties of a Nickel-Based Alloy Surface Layer Reinforced with Particles of Tungsten Carbide and Synthetic Metal–Diamond Composite // Materials. – 2021. – 14(11). – 2805. – P. 1–20.

16 **Raxadilov, B. K., Magazov, N. M., Apsezhanova, A., Bayandinova, M. B.** Sravnitel`ny`j analiz pokry`tij na osnove litoj i poroshkovoj provoloki pri e`lektrodugovoj metallizacii [A comparative analysis of coatings based on cast and powdered wire in electric arc cladding] // Vestnik Evrazijskogo nacional`nogo universiteta imeni L.N.Gumileva. Seriya fizika. Astronomiya. – 2025. – № 3(152). – P. 26–40.

17 **Kolomejchenko, A. V., Gorlenko, A. O., Logachev V. N., Titov, N. V.** Oborudovanie i texnologicheskie rekomendacii dlya naneseniya pokry`tij e`lektrodugovoj metallizaciej [Equipment and technological recommentions for coating with thermal spraying]// Transportnoe mashinostroenie. – 2022. – № 4(4). – P. 44–50.

18 **Grigoriev, S. N.** Technologies of Coatings and Surface Hardening: Industrial Applications // Coatings. – 2023. – 13(3). – 511. – P. 1–8.

19 **Jose, S. A., Lapierre, Z., Williams, T., Hope, C., Jardin, T., Rodriguez, R., Menezes, P. L.** Wear and Corrosion-Resistant Coatings for Extreme Environments: Advances, Challenges, and Future Perspectives. // Coatings. – 2025. – 15(8). – 878. – P. 1–31.

20 **Tian, H., Wang, C., Guo, M., Tang, Z., Wei, S., Xu. B.** Study of the frictional-wear performance and abrasion resistance mechanism of a high-speed arc-sprayed FeNiCrAl coating // Surface and Coatings Technology. – 2019. – V. 370. – P. 320–330.

Received 03.04.26.
Received in revised form 22.04.26.
Accepted for publication 22.05.26.

Г. А. Кокаева[1], *Ж. М. Рамазанова[2], М. Т. Мурсалыкова[3], А. Сәрсенқызы[4], М. Bembenek[5]
[1,4]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3]Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.;
[5]AGH университеті Краковта, Польша, Краков қ.
03.04.26 ж. баспаға түсті.
22.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
22.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МАШИНА БӨЛШЕКТЕРІН ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ ӘДІСТЕРІН ТАЛДАУ ЖӘНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ БАҒАЛАУ

Тозған машина бөлшектерін қалпына келтіру қазіргі машина жасау саласының өзекті міндеттерінің бірі болып табылады. Бұл жабдықтардың сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін арттыруға, сондай-ақ пайдалану және жөндеу шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Аталған мәселені шешудің тиімді бағыттарының бірі – бөлшектердің жұмыс беттерінің пайдалану сипаттамаларын жақсартуды қамтамасыз ететін тозуға төзімді қорғаныш жабындарын қалыптастыру технологияларын қолдану болып табылады. Ұсынылған жұмыста соңғы 15 жылдағы ғылыми жарияланымдарға талдау жасалып, қарқынды абразивті тозу жағдайында жұмыс істейтін тозуға төзімді қорғаныш жабындарын алу әдістері қарастырылды. Зерттеудің мақсаты – машина бөлшектерінің тозуға төзімділігі мен ұзақ мерзімділігін

арттыруға бағытталған жабын қалыптастыру әдістері туралы заманауи ғылыми деректерді жүйелеу және жалпылау. Қарастырылған әдістер шартты түрде дәстүрлі, заманауи және инновациялық болып жіктелді. Дәстүрлі қалпына келтіру әдістеріне механикалық өңдеу, дәнекерлеу және қаптау жатады, олар бөлшектердің геометриялық параметрлерін қалпына келтіруге және ішінара олардың тозуға төзімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Алайда бұл әдістер кеңінен өнеркәсіпте қолданылғанымен, айтарлықтай еңбек және энергия шығындарын талап етеді, сондай-ақ негізгі материалдың құрылымының өзгеруіне және беріктік қасиеттерінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Машиналар мен жабдықтардың пайдалану сенімділігі мен қызмет ету мерзіміне қойылатын талаптардың артуына байланысты бетті беріктендіру мен қалпына келтірудің заманауи және инновациялық технологиялары қарқынды дамуда. Олардың қатарына плазмалық бүрку, электрұшқындық легірлеу, иондық-плазмалық әдістер, газотермиялық бүрку, электрдоғалық металдандыру және бетті модификациялаудың басқа да әдістері жатады. Аталған технологияларды қолдану физикалық-механикалық және трибологиялық қасиеттері жақсартылған жабындарды қалыптастыруға мүмкіндік береді, бұл машина бөлшектерінің тозуға төзімділігін, коррозияға төзімділігін және ұзақ мерзімділігін айтарлықтай арттырады.

Кілтті сөздер: тозуға төзімді жабындар, бетті модификациялау, плазмалық бүрку, электрұшқындық легірлеу, доғалық бүрку.

Г. А. Кокаева[1], *Ж. М. Рамазанова[2], М. Т. Мурсалыкова3,
А. Сәрсенқызы[4], М. Bembenek[5]

[1,4]Казахский аротехнический исследовательский университет
имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[2]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;
[3]Университет Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей;
[5]AGH университет в Кракове, Польша, г. Краков.

Поступило в редакцию 03.04.26.
Поступило с исправлениями 22.04.26.
Принято в печать 22.05.26.

АНАЛИЗ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Восстановление изношенных деталей машин является актуальной задачей современного машиностроения. Это способствует повышению надежности и долговечности оборудования, а также снижению эксплуатационных и ремонтных затрат. Одним из эффективных направлений решения данной задачи является применение технологий формирования износостойких защитных покрытий, обеспечивающих улучшение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей. В представленной работе проведён

аналитический обзор научных публикаций за последние 15 лет, посвящённых исследованию методов получения износостойких защитных покрытий, функционирующих в условиях интенсивного абразивного износа. Целью исследования является систематизация и обобщение современных научных данных о методах формирования покрытий, направленных на повышение износостойкости и долговечности деталей машин. Рассматриваемые методы условно классифицированы на традиционные, современные и инновационные. К традиционным методам восстановления относятся механическая обработка, сварка и наплавка, позволяющие восстанавливать геометрические параметры деталей и частично повышать их износостойкость. Однако эти методы, несмотря на широкое промышленное применение, характеризуются значительными трудо- и энергоёмкими затратами, а также могут приводить к изменению структуры и снижению прочностных характеристик основного материала. В связи с возрастающими требованиями к эксплуатационной надежности и ресурсу машин и оборудования активно развиваются современные, инновационные технологии поверхностного упрочнения и восстановления, включая плазменное напыление, электроискровое легирование, ионно-плазменные методы, газотермическое напыление, электродуговую металлизацию и другие методы модификации поверхности. Применение указанных технологий позволяет формировать покрытия с улучшенными физико-механическими и трибологическими свойствами, обеспечивая существенное повышение износостойкости, коррозионной стойкости и долговечности деталей машин.

Ключевые слова: износостойкие покрытия, модификация поверхности, плазменное напыление, электроэрозионное легирование, дуговое напыление.

МРНТИ 55.13.99

https://doi.org/10.48081/BGQF2222

Қ. Е. Кудиярбек[1], Е. З. Нугман[2], А. Қ. Мустафа[3],
М. Қ. Сағынтай[4], Н. Д. Нургожаев[5]
[1,2,3,4,5]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2,3,4]ТОО «RnD Center», Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2649-8033
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4537-9440
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4751-7141
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7946-1568
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7495-8187
*e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА МИКРОСТРУКТУРУ СТАЛИ 308LSI В WAAM

В работе исследовано влияние технологических параметров и состава защитного газа на формирование микроструктуры из нержавеющей стали 308LSi методом Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Для экспериментов использовалась сварочная проволока диаметром 0,8 мм и газовая смесь 80 %Ar + 20%CO_2. Параметры наплавки I = 110 А, U = 20 В, скорость подачи 400 мм/мин, межслойная выдержка 60 с обеспечили устойчивый процесс формирования цилиндрического образца без выраженных дефектов. Микроструктурный анализ показал, что полученный металл имеет аустенитную матрицу (γ) с равномерно распределённым δ-ферритом. Зафиксированы три характерные морфологии δ-феррита: червеобразная (vermicular), скелетная (skeletal) и сетчатая (lathy), что согласуется с литературными данными по WAAM 308L. Обнаруженные микропоры носили локальный характер и не оказывали существенного влияния на целостность структуры. Измерения микротвёрдости выявили стабильный диапазон 191–213 HV1, подтверждающий однородность сформированной структуры и отсутствие локального упрочнения или перегрева. Установлено, что выбранные режимы наплавки обеспечивают получение образцов с устойчивой двухфазной структурой γ + δ, минимальным количеством дефектов и стабильными механическими характеристиками.

Ключевые слова: GMAW, δ-феррит, аустенит, морфология фаз, микротвёрдость, двухфазная структура.

Введение

В последние годы технологии аддитивного производства металлов активно развиваются, и среди них особое место занимает метод Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)[1]. Эта технология основана на применении дуговой сварки для послойного формирования металлических изделий и отличается доступностью оборудования, высокой производительностью и возможностью изготавливать крупногабаритные детали [2;3;4]. В отличие от методов, основанных

на порошковых материалах (SLM, EBM), WAAM обеспечивает значительно более высокую скорость наплавки, что делает её перспективной для применения в машиностроении, энергетике и авиастроении [5].

Нержавеющая сталь 308LSi широко применяется в WAAM благодаря хорошей свариваемости, коррозионной стойкости и стабильной структуре [6]. Повышенное содержание кремния улучшает текучесть расплава и обеспечивает формирование ровных слоев [7]. Сочетание прочности и устойчивости к агрессивным средам делает данный сплав удобным материалом для исследований влияния технологических параметров на микроструктуру.

Ключевыми факторами, определяющими стабильность процесса WAAM и свойства получаемого металла, являются параметры дуги (сварочный ток, напряжение, скорость подачи проволоки, скорость перемещения горелки), состав защитного газа, а также межслойное охлаждение [8]. Ряд исследований показали, что для нержавеющих сталей серии 308L наиболее часто применяют сварочную проволоку диаметром 1.0–1.2 мм [9;10]. А в качестве защитной среды используют аргон либо смеси Ar с небольшим добавлением активных газов (1–5 % CO_2 или O_2), что обеспечивает устойчивый режим переноса металла и минимизирует разбрызгивание [11]. Использование более тонкой проволоки диаметром 0.8 мм отмечалось лишь в отдельных работах; показано, что это позволяет повысить точность формирования слоёв и снизить тепловложение, но одновременно требует адаптации параметров дуги для предотвращения нестабильности процесса [12]. В то же время влияние защитных газов с повышенным содержанием CO_2 до настоящего времени изучено недостаточно. Известно, что добавка CO_2 выше 5% может изменять состав и морфологию δ-феррита, а также увеличивать глубину провара и окислительные процессы в ванне расплава [13;14]. Однако систематические исследования применения смеси Ar+20 %CO_2 при WAAM 308LSi практически отсутствуют, что и обусловливает актуальность данной работы.

Важную роль также играет межслойная выдержка, влияющая на тепловой цикл и кристаллизацию. Установлено, что пауза между слоями способствует снижению температуры детали, уменьшает перегрев и обеспечивает более равномерное распределение фаз по высоте изделия [15].

Настоящее исследование направлено на выявление влияния выбора параметров наплавки и межслойной выдержки на формирование микроструктуры в наплавленных слоях из нержавеющей стали 308LSi. Особое внимание уделено применению проволоки малого диаметра (0.8 мм) и активной газовой смеси 80 %Ar+20 %CO_2, влияние которых на морфологию δ-феррита и стабильность процесса WAAM ранее не рассматривалось.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовалась нержавеющая сталь ER308LSi в виде сварочной проволоки диаметром 0,8 мм (ER – Electrode / Rod; 308 – аустенитная коррозионностойкая сталь; L – пониженное содержание углерода; Si – добавка кремния). В таблице 1 представлен химический состав проволоки по стандарту AWS A5.18 (American Welding Society) [16].

Таблица 1 – Химический состав провода ER308LSi (массовая доля, %)

Элем ент	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo
% (мас.)	≤0,02	0,65–1,00	1,0–2,5	19,5–21,5	9,0–11,0	≤0,03	≤0,03	≤0,75

Процесс аддитивного изготовления выполнялся на установке MIG Magnetta 220. Для обеспечения воспроизводимости экспериментов было изготовлено 3 цилиндрических образца. Для каждого образца выполнено по 3 металлографических шлифа (верхняя, средняя и нижняя зоны). Система была оснащена вращающимся столом для формирования цилиндрических образцов, а также вертикальной осью Z (рис. 1), что обеспечивало возможность последовательного наращивания слоёв по высоте и равномерное распределение материала при спиральной или кольцевой стратегии наплавки.

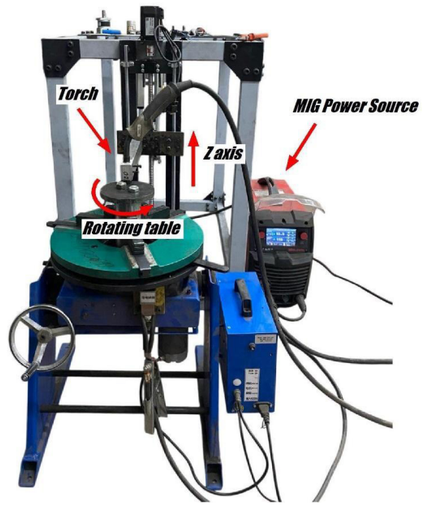


Рисунок 1 – Установка GMAW-WAAM

Основные параметры сварки приведены в Таблице 2. В качестве защитной среды применялась газовая смесь аргона и углекислого газа в соотношении 80/20 при расходе 15 л/мин. Расстояние от контактного наконечника до поверхности детали (CTWD) поддерживалось на уровне 15 мм. После завершения печати образец охлаждался на воздухе при комнатной температуре.

Таблица 2 – Параметры сварки (процесс GMAW-MIG)

Параметр	Значение	Единица
Сварочный ток	110	А
Напряжение дуги	20	В
Скорость печати	400	мм/мин

Расстояние сопла (CTWD)	15	мм
Расход газа	15	л/мин
Межслойная выдержка	60	с
Тепловложение	0,33	кДж/мм

Тепловложение (HI) рассчитывался по следующей формуле:

$$HI = \frac{U \times I \times 60}{\upsilon \times 1000},$$

где U – напряжение дуги (В), I – сварочный ток (А), υ – скорость перемещения (мм/мин).

Рисунок 2 – Печатный цилиндрический компонент:
а) вид сверху б) вид спереди

Перед наплавкой каждого последующего слоя проводилась механическая очистка поверхности от брызг и окалины с использованием металлической щётки. Дополнительная шлифовка не применялась. После печати цилиндрические образцы были разрезаны поперёк слоёв. Для металлографического анализа шлифы прошли стандартную подготовку: шлифование, полирование и травление.

Подготовка включала последовательное шлифование абразивной бумагой SiC зернистостью от P320 до P1200, последующую полировку с использованием алмазных паст 9 өm → 3 өm → 1 өm. Отполированные поверхности протравливались раствором ниталя 3% (3% HNO_3 в этаноле)

Микроструктурное исследование выполнялось на оптическом микроскопе Leica DMi8 при различных увеличениях. Анализировались форма и размеры аустенитных дендритов, распределение δ-феррита, а также однородность структуры по высоте образца.

Для оценки микромеханических свойств изготовленной цилиндрической детали было проведено измерение твёрдости по Виккерсу с нагрузкой HV1. Испытания выполнялись на твердомере Buehler Wilson Hardness Tester с использованием программного обеспечения автоматизированной системы измерений Buehler DiaMet.

Результаты и обсуждение

Сформированная цилиндрическая стенка состояла из 10 слоёв. Толщина одного слоя составляла в среднем 4 мм, высота – около 2 мм. Полученный цилиндры имели диаметр Ø110 мм и общую высоту порядка 20 мм (рис. 2). Все представленные результаты получены на основе анализа трёх независимо изготовленных цилиндрических образцов. Существенных различий в геометрии, микроструктуре и значениях микротвёрдости между образцами не выявлено.

Микроструктурный анализ наплавленных образцов из нержавеющей стали 308LSi выявил формирование устойчивой двухфазной структуры, представленной аустенитной матрицей (γ) с равномерно распределёнными включениями δ-феррита (рис. 3, 4). Количественный анализ показал, что объёмная доля δ-феррита изменяется по высоте образца в пределах 5,9–7,5 % (Таблица 3), что соответствует данным для сталей 308L при WAAM.

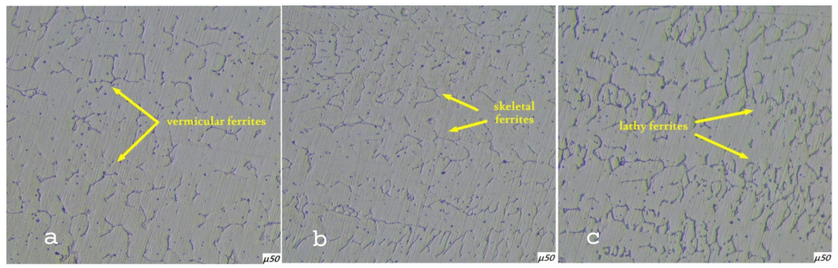


Рисунок 3 – Морфологии δ-феррита в аустенитной матрице стали 308LSi
a) vermicular, b) skeletal, c) lathy

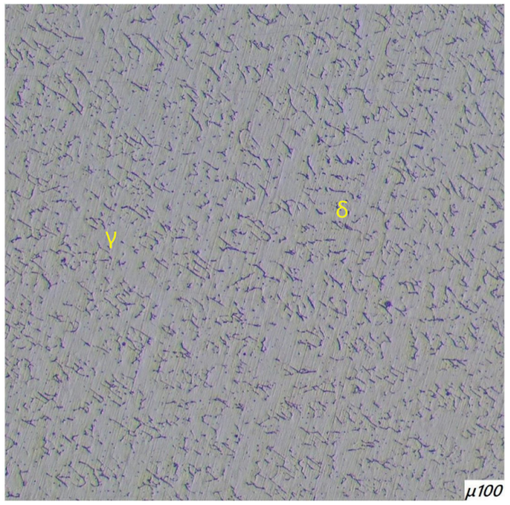


Рисунок 4 – Двухфазная структура стали 308LSi, полученной методом WAAM: светлая аустенитная матрица γ и тёмные включения δ-феррита

Таблица 3 – Объёмная доля δ-феррита, %

Зона	δ-феррит, %
Нижняя	7,5
Средняя	6,8
Верхняя	5,9

На микрофотографиях чётко идентифицируются характерные морфологии δ-феррита — vermicular, skeletal и lathy, что соответствует типичным структурам, описанным для WAAM-наплавок сталей серии 308L в работах Nagasai (2022) [14] и Sanjaya & Ismail (2024) [17]. Наличие указанных морфологий свидетельствует о стабильном тепловом режиме и отсутствии перегрева в процессе наплавления. Применённые параметры WAAM, межслойная выдержка 60 с и использование защитного газа 80 %Ar + 20 %CO_2 обеспечили среднее тепловложение около 0,33 кДж/мм, достаточное для формирования однородной γ + δ структуры без признаков крупнозернистости и нарушений роста дендритов. В отличие от газовых смесей с низким содержанием CO_2 (например, 98 %Ar+2%CO_2) [11], использование смеси 80 %Ar+20 %CO_2 способствует увеличению доли δ-феррита и формированию более выраженной сетчатой морфологии, что связано с повышенным окислительным потенциалом среды.

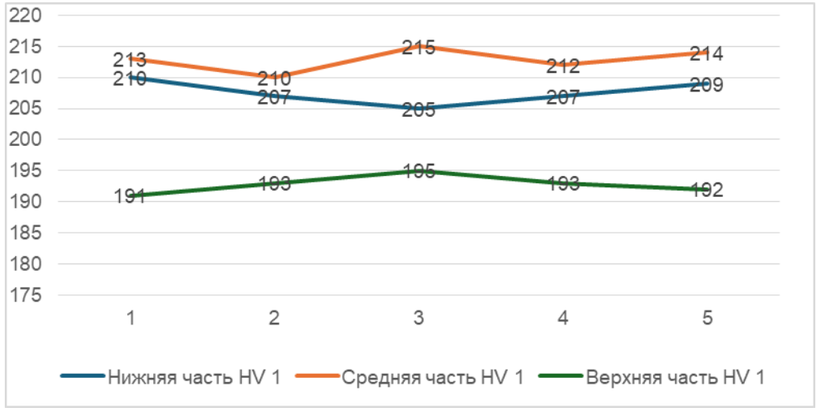


Рисунок 5. Распределение твердости HV1 по высоте наплавленного образца из стали 308Lsi (ось X - замеры с шагом 5 мм)

Распределение микротвёрдости HV1 по высоте наплавленного образца представлено на рис. 5. Полученные значения микротвёрдости находились в диапазоне 191–213 HV1, что хорошо согласуется с литературными данными для WAAM-наплавок из сталей 308L/308LSi. Так, Tonelli и др. [7] сообщают о стабильных значениях порядка 250 HV0.1, тогда как Olshanskaya и др. [6] приводят более широкий диапазон 180–279 HV0.1 в зависимости от применения послойной пластической деформации. Аналогично, по данным Nagasai и др. [14], наблюдается постепенное увеличение твёрдости от верхних к нижним зонам WAAM-цилиндров (199–234 HV0.5).

На этом фоне значения 191–213 HV1, полученные в настоящей работе, располагаются в средней части характерного диапазона для аустенитных наплавок 308L и указывают на отсутствие как локального упрочнения, так и переразупрочнения. Распределение твёрдости по высоте образца носит стабильный характер: несколько более высокие значения отмечены в средней и нижней частях, что связано с более эффективным теплоотводом, тогда как незначительное снижение твёрдости в верхней зоне обусловлено замедленным охлаждением.

Таким образом, результаты микроструктурного и микромеханического анализа подтверждают, что выбранные параметры WAAM обеспечивают стабильный процесс наплавления и формирование однородной двухфазной структуры γ + δ с характерными морфологиями δ-феррита (vermicular, skeletal и lathy). Пространственное распределение фаз и уровни микротвёрдости свидетельствуют о благоприятных условиях кристаллизации и качестве полученных наплавленных образцов, сопоставимом с данными, представленными в литературе по WAAM-процессам для сталей серии 308L.

Информация о финансировании

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23487120 «Разработка технологии изготовления цилиндрических деталей, применяемых в военных целях, с минимальными отходами»).

Выводы

В рамках исследования были изготовлены наплавленные образцы из нержавеющей стали 308LSi методом WAAM с использованием проволоки диаметром 0,8 мм и защитного газа Ar + CO_2 (80/20). Применённые технологические параметры обеспечили стабильный процесс наплавки и формирование цилиндрической заготовки без выраженных дефектов макроструктуры.

Микроструктурный анализ установил, что наплавленный металл формируется как двухфазная γ + δ структура, в которой аустенитная матрица (γ) содержит равномерно распределённые включения δ-феррита. Зафиксированы характерные морфологии δ-феррита – vermicular, skeletal и lathy, что соответствует структурам, типичным для сварочных сталей серии 308L, и подтверждает стабильность условий кристаллизации при выбранном тепловложении.

Измерения твёрдости показали стабильный диапазон 191–213 HV1, характерный для наплавляемых аустенитных сталей. Равномерность распределения твёрдости по высоте образца указывает на отсутствие локального переразупрочнения или перегрева и подтверждает однородность структуры, сформированной в процессе WAAM.

Локально выявленные микропоры имеют незначительный объём (не более 1–2 % площади шлифа) и не нарушают однородности структуры, что свидетельствует о достаточной защите сварочной ванны и корректной газодинамике процесса. В целом результаты демонстрируют, что предложенные параметры WAAM обеспечивают получение качественных наплавленных слоёв из 308LSi с устойчивой двухфазной структурой γ + δ и стабильными механическими свойствами, что делает данный режим перспективным для дальнейших исследований и практического применения. Установлено, что при тепловложении выше 0,4 кДж/мм наблюдается укрупнение структуры и изменение морфологии δ-феррита. Рекомендуемые технологические параметры: I = 100–120 А, U = 18–22 В, скорость подачи 350–450 мм/мин, межслойная выдержка 40–80 с.

REFERENCES

1 **Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P.** Wire + Arc Additive Manufacturing // Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 32, No. 7. – P. 641–647. – https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073

2 **Ron, T., Levy, G. K., Dolev, O., Leon, A., Shirizly, A., Aghion, E.** Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process // Metals. – 2019. – Vol. 9. – Article 888. – https://doi.org/10.3390/met9080888

3 **Navarro, M., Matar, A., Diltemiz, S. F., Eshraghi, M.** Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 6. – Article 3. – https://doi.org/10.3390/jmmp6010003

4 **Knezović, N., Topić, A.** Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – A new advance in manufacturing // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2018. – Vol. 65. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_7

5 **Li, Y., Su, C., Zhu, J.** Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 13. – Article 100330. – https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330

6 **Olshanskaya, T., Trushnikov, D., Dushina, A., Ganeev, A., Polyakov, A., Semenova, I.** Microstructure and properties of the 308LSi austenitic steel produced by plasma-MIG deposition welding with layer-by-layer peening // Metals. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – Article 82. – https://doi.org/10.3390/met12010082

7 **Tonelli, L., Sola, R., Laghi, V., Palermo, M., Trombetti, T., Ceschini, L.** Influence of interlayer forced air cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 304L austenitic stainless steel // Steel Research International. – 2021. – Vol. 92. – https://doi.org/10.1002/srin.202100175

8 **Stützer, J., Totzauer, T., Wittig, B., Zinke, M., Jüttner, S.** GMAW cold wire technology for adjusting the ferrite–austenite ratio of wire and arc additive manufactured duplex stainless steel components // Metals. – 2019. – Vol. 9. – № 5. – Article 564. – https://doi.org/10.3390/met9050564

9 **Jafari, D., Vaneker, T. H. J., Gibson, I.** Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Materials & Design. – 2021. – Vol. 202. – Article 109471. – https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471

10 **Li, Y., Su, C., Zhu, J.** Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. – 2022. – Vol. 13. – Article 100330. – https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330

11 **Teixeira, F. R., Jorge, V. L., Scotti, F. M., Siewert, E., Scotti, A.** A methodology for shielding-gas selection in wire arc additive manufacturing with stainless steel // Materials. – 2024. – Vol. 17. – № 13. – Article 3328. – https://doi.org/10.3390/ma17133328

12 **Gordon, J. V., Haden, C. V., Nied, H. F., Vinci, R. P., Harlow, D. G.** Fatigue crack growth anisotropy, texture and residual stress in austenitic steel made by wire and arc additive manufacturing // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 724. – P. 431–438. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.073

13 **Li, Y., Luo, Y., Li, J., Song, D., Xu, B., Chen, X.** Ferrite formation and its effect on deformation mechanism of wire arc additive manufactured 308L stainless steel // Journal of Nuclear Materials. – 2021. – Vol. 550. – Article 152933. – https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152933

14 **Nagasai, B. P., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V.** Mechanical properties and microstructural characteristics of wire arc additively manufactured 308L stainless steel using gas metal arc and cold metal transfer processes // Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – Vol. 307. – Article 117655. – https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117655

15 **Astafurov, S. V., Astafurova, E. M.** Phase composition of austenitic stainless steels in additive manufacturing: A review // Metals. – 2021. – Vol. 11. – № 7. – Article 1052. – https://doi.org/10.3390/met11071052

16 American Welding Society. Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods (AWS A5.9/A5.9M:2012). – Miami, FL : American Welding Society, 2012.

17 **Sanjaya, J., Ismail, A.** Microstructure and mechanical properties of 308L stainless steel wall fabricated by WAAM using different currents // Materials Letters. – 2024. – Vol. 360. – Article 135059. – https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135059

Поступило в редакцию 25.02.26.
Поступило с исправлениями 02.03.26.
Принято в печать 29.04.26.

Қ. Е. Кудиярбек[1], Е. З. Нұғман[2], А. Қ. Мұстафа[3],
М. Қ. Сағынтай[4], Н. Д. Нургожаев[5]
[1,2,3,4,5]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2,3,4]«RnD Center» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
25.02.26 ж. баспаға түсті.
02.03.26 ж. түзетулерімен түсті.
29.04.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

WAAM ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА 308LSI БОЛАТЫНЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНА ПАРАМЕТРЛЕР МЕН ҚОРҒАНЫС ГАЗЫНЫҢ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) әдісімен 308LSi тот баспайтын болаттан құйылған қабаттардың микроқұрылымының қалыптасуына технологиялық параметрлер мен қорғаушы газ құрамының әсері зерттелді. Эксперименттер үшін диаметрі 0,8 мм дәнекерлеу сымы және 80 %Ar + 20 % CO_2 газ қоспасы қолданылды. Құю параметрлері I = 110 А, U = 20 В, беріліс жылдамдығы 400 мм/мин және қабатаралық үзіліс 60 с цилиндрлік үлгінің айқын ақаусыз тұрақты қалыптасуын қамтамасыз етті. Микроқұрылымды талдау нәтижесінде алынған металлдың аустениттік матрица (γ) және біркелкі таралған δ-ферриттен тұратыны анықталды. δ-ферриттің үш сипаттық морфологиясы тіркелді: құрттәрізді (vermicular), қаңқатәрізді (skeletal) және торлы (lathy), бұл WAAM 308L бойынша әдеби деректерге сәйкес келеді. Анықталған микрокеуектер жергілікті сипатқа ие болып, құрылымның тұтастығына айтарлықтай әсер етпеді.

Микроқаттылықты өлшеу 191–213 HV1 тұрақты диапазонын көрсетті, бұл қалыптасқан құрылымның біртектілігін және жергілікті беріктену немесе қызып кету құбылысының болмауын дәлелдейді. Таңдалған құю режимдері γ + δ екі фазалы тұрақты құрылым, минималды ақаулар және тұрақты механикалық сипаттамалары бар үлгілерді алуға мүмкіндік беретіні анықталды.

Кілтті сөздер: GMAW, δ-феррит, аустенит, фазалар морфологиясы, микроқаттылық, екі фазалы құрылым.

K. E. Kudiyarbek[1], Y. Z. Nugman[2], A. K. Mustafa[3],
M. K. Sagyntai[4], N. D. Nurgozhaev[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2,3,4]LLP «RnD Center», Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 25.02.26.
Received in revised form 02.03.26.
Accepted for publication 29.04.26.

EFFECT OF PARAMETERS AND SHIELDING GAS ON THE MICROSTRUCTURE OF 308LSI STEEL IN WAAM

This study investigates the effect of process parameters and shielding gas composition on the microstructure formation of stainless steel 308LSi by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). The experiments were carried out using a 0.8 mm welding wire and a gas mixture of 80 %Ar + 20 % CO_2. The deposition parameters of I = 110 A, U = 20 V, wire feed speed of 400 mm/min, and interpass dwell time of 60 s ensured a stable formation of a cylindrical specimen without pronounced defects. Microstructural analysis revealed an austenitic (γ) matrix with uniformly distributed δ-ferrite. Three characteristic δ-ferrite morphologies were identified: vermicular, skeletal, and lathy, which is consistent with published data for WAAM 308L deposits. Detected micropores were local and did not significantly affect structural integrity. Microhardness measurements showed a stable range of 191–213 HV1, confirming a homogeneous structure and the absence of localized hardening or overheating. It was established that the selected process parameters provide samples with a stable dual-phase γ + δ structure, a minimal amount of defects, and stable mechanical properties.

Keywords: GMAW, δ-ferrite, austenite, phase morphology, microhardness, dual-phase structure.

FTAMP 55.31.29
https://doi.org/10.48081/BGQF2223

Д. Ж. Меңлен[1], А. К. Шеров[2], Н. Ж. Карсакова[3],
К. И. Имашева[4], Б. О. Жумагалиев[5]
[1,2,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3,4]Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8022-1521
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1433-957X
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2002-1557
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6859-0658
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7688-471X
*e-mail: d.menglen@kazatu.edu.kz

ТЕРМОФРИКЦИЯЛЫҚ КЕСКІШ ҚҰРАЛДАРДЫҢ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Машина жасау өндірісінде қиын өңделетін материалдарды механикалық өңдеу кезінде кесуші құралдардың мерзімінен бұрын істен шығуы мәселесі бар екендігі және оның өндіріс тиімділігіне айтарлықтай әсер ететіндігі мәлім болды. Осы мәселенің шешімі ретінде қолданыстағы механикалық өңдеу әдістерінің орнына импульсті салқындатуға ие термофрикциялық өңдеу әдісін қолдануды өрбіту мақсат етіп қойылған болатын. Қазіргі уақытта бұл бағытта бірқанша жетістіктерге қол жеткізілген. Бірақ-та, жүргізілген зерттеу нәтижелері термофрикциялық құралдардың кесуші жиектерінде жарықтардың пайда болуы және тозу, сынып түсу сияқты мәселелер бар екендігін көрсетті. Сондықтан мақалада импульсті салқындатуға ие термофрикциялық құралдардың тозуға төзімділігін арттыру мәселесі қарастырылған. Импульсті салқындатуға ие термофрикциялық өңдеу әдістерінің кесу механизмі өңдеу аймағында жиілікті түрде «қыздыру-салқындату» циклін қалыптастыру арқылы сыртқы үйкелісті ішкі үйкеліске ауыстыруға негізделген, бұл кесу процесінің энергия сыйымдылығын төмендетуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижесінде термофрикциялық кесу құралдарының тозуға төзімділігін арттыру мақсатында жоғары беріктікке ие балқыма материалмен олардың кесу жиектерін балқымалау әдісі қолданылғандығы анықталды. STOODY M7-G материалымен балқытылған термофрикциялық құралдардың дәстүрлі термофрикциялық құралдармен салыстырғанда 1,5-2 есе жоғары жұмыс ресурсына ие екендігі эксперименталды түрде дәлелденген. Сонымен қатар, балқымалау әдісінің жоғары еңбек сыйымдылығы мен технологиялық өзіндік құнының жоғары екендігі анықталды. Осыған байланысты термофрикциялық құралдардың кесуші бөлігінің тозуға төзімділігін, оларды даярлау кезінде, технологиялық тәсілдермен қамтамасыз ететін баламалы әдісті әзірлеу өзектілігі негізделді.

Кілтті сөздер: термофрикциялық өңдеу, импульсті салқындату, термофрикциялық кесуші құрал, тозуға төзімділік, қиын өңделуші материалдар, технологиялық әдіс.

Кіріспе

Машина жасау өндірісінің тиімділігі көптеген факторлармен анықталады, олардың арасында металл кескіш құрал маңызды орын алады. Құралдың істен шығуының көп бөлігі (75 % дейін) кесу жиектерінің тозуына байланысты [1]. Бұл әсіресе барлық салаларда кеңінен қолданылатын өңдеу қиын материалдарды өңдеуге байқалады, өйткені бұл материалдар үшін дайындаманы өңдеудің күрделілігі құрал ресурсына сәйкес келеді [2; 3].

Отандық және шетелдік өндірушілердің жаһандық интеграциясы отандық өнеркәсіпте шетелдік техниканы пайдаланудың артуына әкелді. Осыған байланысты өндірістерде химиялық құрамы мен механикалық қасиеттері бойынша ерекшеленетін жаңа материалдар көбірек қолданылуда. Мұндай материалдарды өңдеу металл кесетін құралдарды тұтынуға да кері әсер етеді. Кесу режимдерін тағайындау және құралдың кесетін бөлігінің материалын таңдау кезінде жіберілген қателіктер, қолда бар анықтамалық-техникалық көздерде тиісті ұсыныстардың болмауына байланысты, кесу жиегінің мерзімінен бұрын тозуына немесе сынуына әкеледі.

Өздерінің аспаптық өндірістері жоқ елдер үшін (олардың қатарына Қазақстан кіреді) шетелдік өндірушілерден жоғары (жоғары) құны бар металл кесетін құралдарды сатып алуға тура келетіндігімен жағдай одан әрі ушығып барады. Мұның бәрі механикалық операцияның өзіндік құнының өсуіне, сайып келгенде, өнімнің өзіндік құнының өсуіне әкеп соғады.

Осыған байланысты, қиын өңделуші материалдарды механикалық өңдеу кезінде кесуші құралдың беріктігін (жұмыс ресурсын) арттыру мәселесі қазіргі заманғы машина жасаудың ірі практикалық мәселелерінің бірі болып табылады.

Бұл мәселенің шешімі жаһандық даму жағдайында жоғары сапа, өнімділік, ресурстарды үнемдеу, қол жетімділік және т.б. сияқты өндіріс талаптарын қанағаттандыратын металл кесуші құралды сондай-ақ, механикалық өңдеу және жобалау әдісін әзірлеу болуы мүмкін.

Осындай өңдеу әдістерінің бірі – профессор К. Т. Шеровтың жетекшілігімен жасалған импульсті салқындатумен термофрикциялық өңдеу әдістері және термофрикциялық құралдардың құрылымы болып табылады [4; 5; 6; 7].

Термофрикциялық өңдеудің әзірленген әдістері өңделетін бетте мерзімді «қыздыру-салқындату» циклін қамтамасыз ететін құралдың арнайы құрылымының арқасында басқа кесу механизміне сүйенеді. Оның ерекшелігі дайындамадағы жылу және деформация өрістерін оқшаулау болып табылады, бұл құрал мен кесілген материал арасындағы сыртқы үйкелісті ішкі үйкеліске аударуға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда үйкеліс кесілген материалдың қабаттары арасында жүреді. Бұл технология айналу жиілігі n= 1000–3000 айн/мин болатын шпиндельді түйіні бар әмбебап станоктарда металл дайындамаларды кесу процесін орындауға мүмкіндік береді. Дәстүрлі және ұсынылатын термофрикциялық өңдеу әдісінің

арасындағы негізгі айырмашылық айналымдардың қажетті санының айтарлықтай төмендеуіне әкеледі. Мысалы, импульстік салқындатылған термофрикциялық өңдеу әдісінің технологиясын қолдану шығындарды азайтуға мүмкіндік береді: электр энергиясына (5–7 кВт-тан аспайды).

Осы кесу механизмі негізінде әртүрлі беттерді өңдеуге арналған импульсті салқындатуға ие термофрикциялық кесу әдістері жаратылады:

– жазық беттерді импульсті салқындатуға ие термофрикциялық өңдеу әдісі және үйкеліс дискісінің құрылымы;

– импульсті салқындатуға ие термофрикциялық кесу әдісі және дискілі ара;

– цилиндрлік беттерді термофрикциялық кесу-қатайту әдісі;

– термофрикциялық фрезерлеу әдісі және үйкеліс фрезасы құрылымы;

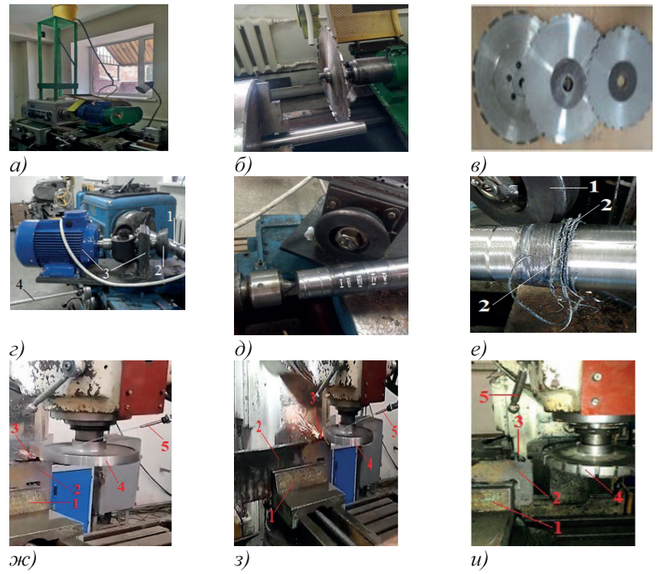
– сыртқы және ішкі цилиндрлік беттерді айналмалы-үйкелісті кеңейтежону әдісі және тостаған кескіш құрылымы;

– технологиялық тесікті термофрикциялық құралмен дәнекерлеп бітеу әдісі.

Материалдар мен әдістері

Импульсті салқындатумен термофрикциялық өңдеудің кейбір әдістерін қарастырайық.

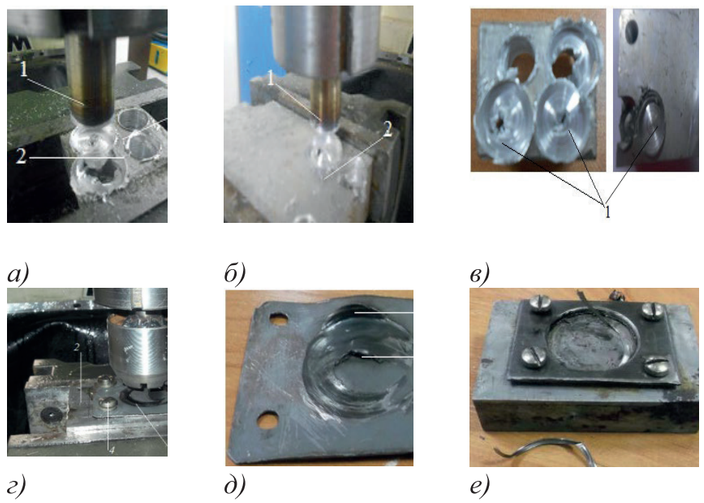
1-суретте импульсті салқындатумен термофрикциялық өңдеу әдістері көрсетілген.



а, б, в – импульсті салқындатуға ие термофрикциялық кесу процесі;
г, д, е – термофрикциялық фрезерлеу процесі; ж,з,и – импульсті салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу процесі

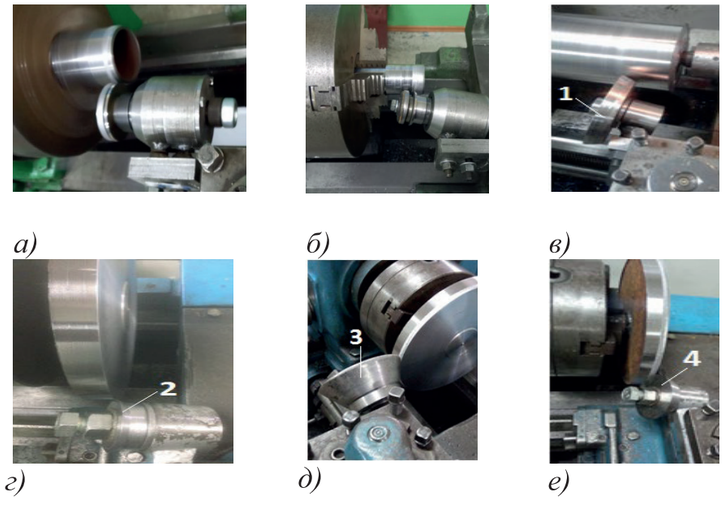
1-сурет – Импульсті салқындатуға ие термофрикциялық өңдеу әдістері

2-суретте технологиялық тесіктерді дәнекерлеп бітеудің және тұтас материалда тесіктер алудың термофрикциялық әдістері көрсетілген.



а, б, в – технологиялық тесіктерді термофрикциялық дәнекерлеп бітеу процесі;
г, д, е – тұтас материалда тесіктерді термофрикциялық бұрғылау процесі
2-сурет – Технологиялық тесіктерді дәнекерлеп бітеудің және тұтас материалда тесіктер алудың термофрикциялық әдістері

3-суретте сыртқы цилиндрлік беттерді ротациялық-фрикциялық жону және үлкен тесіктерді ротациялық-фрикциялық кеңейтежону құрамалы әдістері.

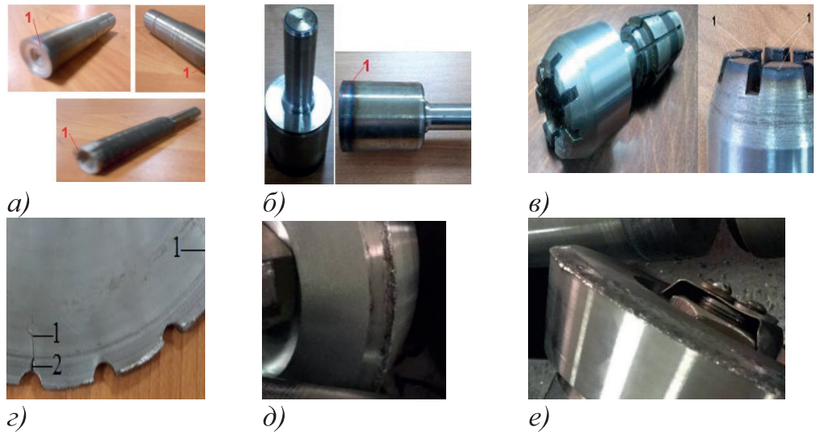


а, б, в, г, д, е – сыртқы цилиндрлік беттерді ротациялық-фрикциялық жону процес; ж, з – үлкен тесіктерді ротациялық-фрикциялық кеңейте жону процесі
3-сурет – Сыртқы цилиндрлік беттерді ротациялық-фрикциялық жону және үлкен тесіктерді ротациялық-фрикциялық кеңейте жону құрамалы әдістері

Термофрикциялық өңдеудің жоғарыда аталған әдістерінің әрқайсысы зертханалық және өндірістік сынақтардан өткен, олардың нәтижелері жоғары өнімділік пен өңдеу сапасын қамтамасыз ететіндігі көрсетілген. Алайда, термофрикциялық құралдардың тозуға төзімділігіне байланысты мәселе бар екендігі анықталды. Бірнеше жүз рет кесуден кейін термофрикциялық құралдардың кесу бөлігінде тозу, жарықтар мен шығыңқылар пайда бола бастайды. Бұл термиялық қыздыру-салқындату циклі жүретін импульсті салқындатуға ие термофрикциялық кесу процесінің нәтижесі. Кесу процесінде термиялық қыздыру салқындату циклінің жоғары жиілікпен қайталануы құралдың кесуші бөлігін мерзімді термиялық құралдардың тозуға төзімділігін арттыруға бағытталған ғылыми зерттеулер өзекті міндет болып табылады.

Төмен жылдамдықпен өңдеу кезінде термофрикциялық құралдардың тозуын зерттеу.

Металл дайындамаларды төмен жылдамдықпен импульсті салқындатуға ие термофрикциялық өңдеу кезінде термофрикциялық құралдардың тозу пішіндері әртүрлі сипат пен өлшемге ие болады [8] . Тозу түрі құралдың бетінде және оның тереңдігінде жүретін процестермен анықталады. 4- суретте термофрикциялық құралдардың фотосуреттері көрсетілген.



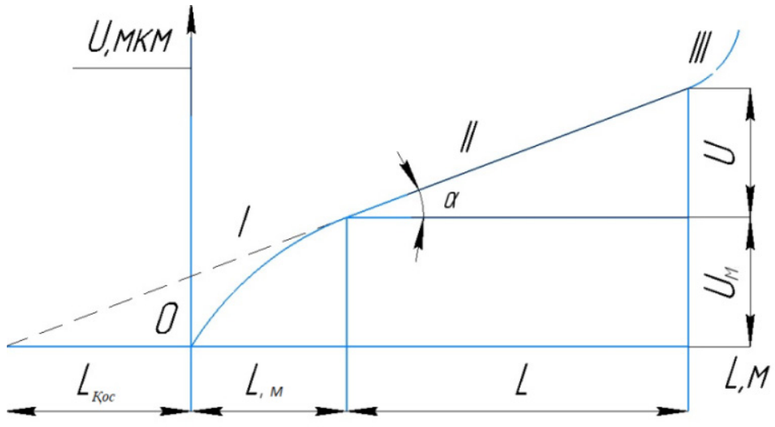
а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

а – технологиялық тесіктерді дәнекерлеп бітеуге арналған үйкеліс құралы;
б – тұтас материалда тесіктер алу үшін тегіс жұмысшы беті бар үйкеліс бұрғысы; в – жұмысшы бетінде арнайы ойықтары бар үйкеліс бұрғысы;
г – кесуге арналған үйкеліс дискісі, жарықтар мен сынықтардың ұлғайтылған көрінісі; д, е – термофрикциялық фрезалап – жонуға арналған үйкеліс фрезасы;
1 – тозу және жарықшақтар; 2 – сынықтар

4-сурет – Термофрикциялық құралдар

5-суретте кесу құралының тозуының (U) кесу ұзындығына (L) тәуелділігі көрсетілген.



5-сурет – Кесу құралының тозуының (U) кесу ұзындығына (L) тәуелділігі графигі

Тозудың үш кезеңі екінші ретті ұстама арқылы ажыратылады. Бірінші кезең болаттар үшін материалдардың механикалық қасиеттерін аз төмендететін 600 °С дейінгі температура аралығына сәйкес келеді. Беттің сыртқы көрінісі: шамамен тең аралықтарда қайталана отырып, беріктігі төмен болған материалдан жасалған бөлшектен ұсақ түйіршіктердің жұлынып түсуі. Тозудың екінші кезеңі 600...1300 °С температура аралығында өрби түседі. Бұл температура болаттардың механикалық қасиеттерін айтарлықтай төмендетеді және металл жұмсара бастайды. Беттің сыртқы түрі: неғұрлым берік бөлшектің жанасу бетінде металдың жабысуы мен дақтары көрінеді, ал берік емес бөлшектің бетінде жырықтар пайда болады.

Тозудың үшінші кезеңі балқу температурасына сәйкес келеді үйкеліс бетінде балқытылған ойықтар пайда болады [9, 10].

Пайдаланылған үйкеліс дискілерін үнемі бақылау нәтижелері бастапқы кезеңдегі жарықтар сыртқы контур бойымен бетінде пайда болатынын көрсетті. Уақыт өте келе олар дискінің бүйір бетінде радиалды бағытта үлкейе түседі (4 г суретті қараңыз).

[8; 11; 12] еңбектерінде термофрикциялық кескіш құралдардың тозуға төзімділігін, қаттылығын және беріктігін арттыру үшін ғылыми зерттеулердің бағыттары анықталды:

– өңделетін дайындама материалының физика-механикалық қасиеттері мен химиялық құрамына негізделген кесуші үйкеліс дискісінің материалын таңдау әдістемесін жарату;

– үйкеліс дискісінің кесу бөлігін нығайтуға ықпал ететін кесуші үйкеліс дискісін жасау технологиясын әзірлеу;

– химиялық құрамын жақсарту арқылы үйкеліс дискілерін жасау үшін қолданылатын құрылымдық болаттардың (Болат 50, Болат 65Г және т.б.) беріктік сипаттамаларын арттыру ;

– жоғары беріктігі бар балқыма материалдармен балқыламау арқылы термофрикциялық құралдардың кесу бөлігінің тозуға төзімділігін арттыру.

[13] жұмыста жоғары беріктігі бар балқыма материалдармен балқыламау арқылы термофрикциялық құралдардың кесу бөлігінің тозуға төзімділігін арттыруға бағытталған зерттеулер жүргізілген. Зерттеу үшін қаттылығы мен температураға төзімділігі жоғары балқыма материалдар таңдалды: STOODY M7-G, STOODY 102-G, OK TUBRODUR 53, OK TUBRODUR 58. 6-суретте жоғары беріктігі бар балқыма материалдармен балқымаланған термофрикциялық құралдар көрсетілген.

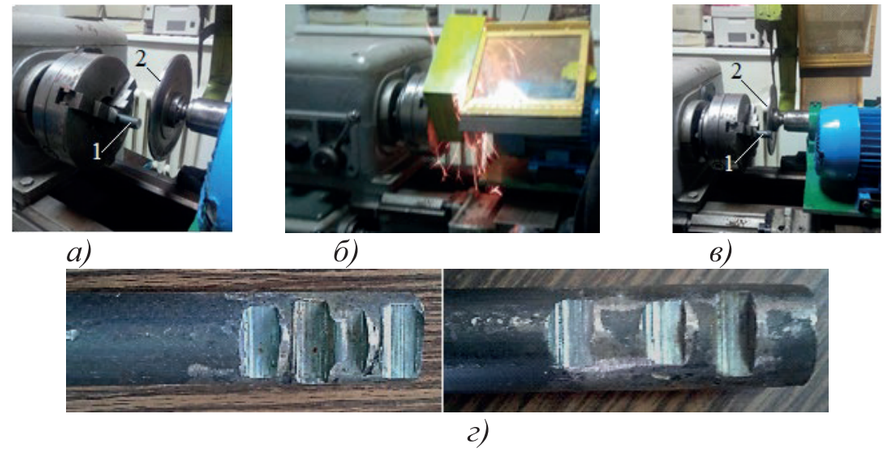
а) б) в) г) д) е) ж) з) и)

а, б, в – балқымаланған ротациялық-фрикциялық тостаған кескіштер;
г, д, е – термофрикциялық фрезерлеу үшін балқымаланған үйкеліс фрезасы;
ж – термофрикциялық кесуге арналған балқымаланған дискілі ара;
з, и – термофрикциялық фрезерлеуге арналған
балқымаланған конустық үйкеліс фрезасы
6-сурет – Жоғары беріктігі бар балқыма материалдармен
балқымаланған термофрикциялық құралдар

Нәтижелер мен талқылаулар

1К62 токарлық-винткескіш білдегіне құрастырылған термофрикциялық кесуге арналған құрылғы көмегімен STOODY M7-G материалынан балқымаланған дискілі араны сынау бойынша тәжірибелер жүргізілген [13;14].

7 – суретте термофрикциялық кесу кезінде STOODY M7-G материалынан балқымаланған дискілі араларды зертханалық сынау процесі көрсетілген.



а) б) в) г)

а – білдекті баптау; б – кесу үрдісі; в – кесуден кейін;
г – кейбір өңделген үлгілер; 1-үлгі-дайындама; 2-диск ара
7-сурет – Термофрикциялық кесу кезінде STOODY M7-G материалынан
балқытылған дискілі араларды зертханалық сынау процесі

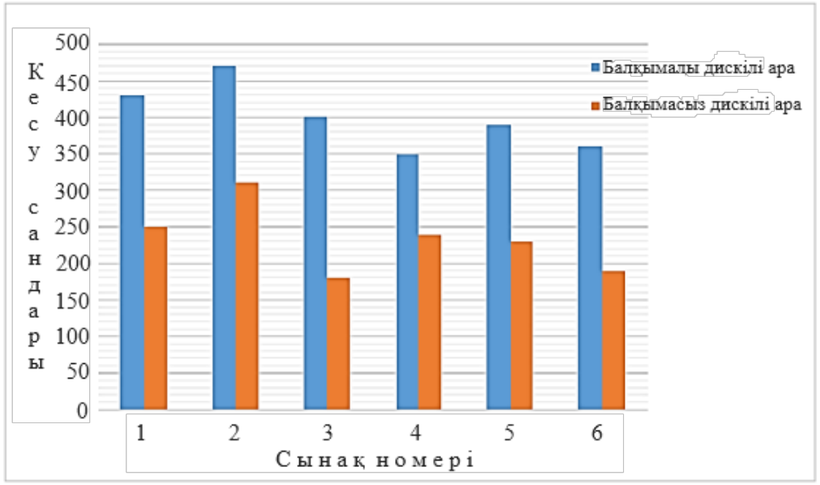
Дискілі ара диаметрі D=285 мм және ені в=6мм. Цилиндрлік дайындаманы кесу келесі режимдерде орындалған: дискілі ара жылдамдығы v=25-35 м/с; дайындама берілісі s = 0,07–0,12 мм/айн. Барлық тәжірибелерде дискілі ара мүлдем қызбаған, жұмыс беттерінде жарықтар мен сынықтар пайда болмаған.

1-кестеде зертханалық сынақ нәтижелері көрсетілген.

1-кесте – Зертханалық сынақ нәтижелері

Сынақ номері	Кесу сандары	
	Балқымаланған дискілі ара	Балқымаланбаған дискілі ара
1	430	250
2	470	310
3	400	180
4	350	240
5	390	230
6	360	190

8 – суретте зертханалық сынақ нәтижелері гистограммасы көрсетілген.



8-сурет – Зертханалық сынақ нәтижелері гистограммасы

Тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері STOODY M7-G материалынан жасалған балқымаланған термофрикциялық құралдардың тозуға төзімділігі дәстүрлі термофрикциялық құралдармен салыстырғанда 1,5÷2 есе жоғары екенін көрсеткен.

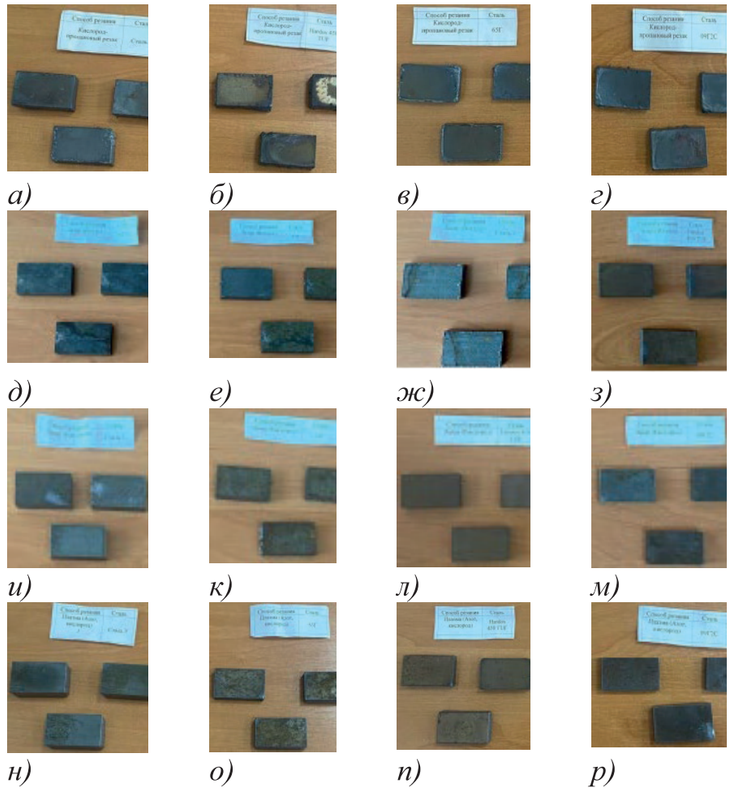
Алайда жүргізілген зерттеулер жоғары беріктігі бар балқыма материалдармен балқыламау арқылы термофрикциялық құралдардың кесу бөлігінің тозуға төзімділігін арттыру әдісінің еңбексыйымдылығының және өзіндік құнының өте жоғары екенін көрсетті.

Осыған байланысты олардың кесу бөлігін нығайтуды қамтамасыз ететін термофрикциялық құралдарды жасау технологиясын әзірлеу ұтымды болып табылады.

Қазіргі уақытта С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінде термофрикциялық құралдардың кесу бөлігінің тозуға төзімділігін технологиялық тәсілмен арттыру бағыты бойынша ғылыми зерттеулер жүргізілуде.

Термофрикциялық құралдың кесу бөлігінің ең жоғары тозуға төзімділігін қамтамасыз ететін технологиялық әдісті анықтау үшін төрт кесу әдісі таңдалды - лазерлік (ауамен және оттегімен), плазмалық, электроэрозиялық және оттегі-пропанмен кесу. Жоғарыда көрсетілген әдістермен кесу кезінде өңделген беттің қатаюын зерттеу үшін әртүрлі материалдар, атап айтқанда Болат 3, HARDOX 450, Болат 09Г2С және Болат 65Г таңдалды.

9-суретте әртүрлі тәсілдермен кесу арқылы алынған және әртүрлі материалдардан жасалған үлгілер көрсетілген.



а, б, в, с – оттегі – пропанмен кесу арқылы алынған үлгілер; д, е, ж, з – лазермен (ауамен) кесу арқылы алынған үлгілер; к, л, м – лазермен (оттегімен) кесу арқылы алынған үлгілер; н, о, п, р – плазмамен алынған үлгілер кесу

9-сурет – Әртүрлі тәсілдермен кесу арқылы алынған және әртүрлі материалдардан жасалған үлгілер

Термофрикциялық құралдардың кесу бөлігін нығайтуды қамтамасыз ететін технологиялық әдісті жарату бойынша ғылыми-зерттеу жұмыстарын одан әрі қарай жалғастыру үшін келесі міндеттерді орындау жоспарланған:

– металлографиялық зерттеуді ұйымдастыру және жүргізу;

– термофрикциялық құралдарды дайындаудың технологиялық әдісін таңдау;

– термофрикциялық құралдардың тәжірибелік үлгілерін дайындау;

– термофрикциялық құралдардың тұрақтылық кезеңін анықтау бойынша эксперименттік зерттеулерді ұйымдастыру және жүргізу;

– кесу процесінде термофрикциялық құралдардың кернеулі деформацияланған күйін модельдеу.

Қорытынды

1 Дәстүрлі және әзірленген өңдеу әдісімен термофрикциялық құралдардың тозуын зерттеу нәтижелері құралдардың тозу пішіндері әртүрлі сипат пен өлшемге ие болатындығын көрсетті.

2 Импульсті салқындатуға ие термофрикциялық өңдеудің қолданыстағы әдістерін талдау нәтижелері кесу процесінде термиялық қыздыру-салқындату циклінің жоғары жиілікпен қайталануы құралдың кесуші бөлігінің мерзімді термиялық өңдеуге ұшырауына алып келетіндігін көрсетті. Сондай-ақ, термофрикциялық құралдардың тозуға төзімділігіне байланысты мәселе бар екендігі, яғни бірнеше жүз рет кесуден кейін термофрикциялық құралдардың кесу бөлігінде тозу, жарықтар мен шығыңқылар пайда бола бастайтындығы анықталды.

3 Жүргізілген зерттеу нәтижелері жоғары беріктігі бар балқыма материалдармен балқыламау арқылы термофрикциялық құралдардың кесу бөлігінің тозуға төзімділігін арттыру әдісінің еңбексыйымдылығының және өзіндік құнының өте жоғары екенін көрсетті.

4 Термофрикциялық құралдардың кесуші бөлігінің қатайуын оларды дайындау кезінде қамтамасыз ете алатын технологиялық әдісті жарату өзекті мәселе екендігі анықталды.

5 Термофрикциялық құралдардың жоғары тозуға төзімділігін қамтамасыз ететін термофрикциялық құралдарды жасау технологиялық әдісін таңдау бойынша одан әрі зерттеудің міндеттері айқындалды.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Каширская, Е. Н., Орлов, А. В.** Определение износа металлорежущего инструмента на основе анализа температуры резания // Ползуновский вестник. – 2012. – №1/1. – С. 120–122.

2 **Насад, Т. Г.** Высокоскоростная обработка труднообрабатываемых материалов: монография / Т. Г. Насад, И. Е. Кирюшин, Д. Е. Кирюшин. – Саратов: СГТУ, 2009. – 148 с.

3 **Подураев, В. Н.** Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.

4 **Шеров К.Т., Муравьев О.П., Уалиев Д.Ш. и др.** Способ термофрикционной обработки плоскости и конструкция диска трения // Инновационный патент №22998 РК на изобретение 15.10.2010, бюл. № 10.

5 **Шеров, К. Т., Муравьев, О. П., Шеров, А. К. и др.** Способ термофрикционной режуще-упрочняющей обработки цилиндрических поверхностей и конструкция диска трения // Инновационный патент № 25649 РК на изобретение. 16.04.2012 г., бюл. № 4.

6 **Шеров, К. Т., Маздубай, А. В., Сихимбаев, М. Р., Исагулов, А. З., Шеров, А. К., Ракишев, А. К., Мусаев, М. М., Сихимбаева, Д. Р.** Способ термофрикционной отрезки металлических заготовок с охлаждением и

конструкция дисковой пилы / Патент №31934 РК на изобретение. 30.03.2017г. Бюл. № 6.

7 **Шеров, К. Т., Мусаев, М. М., Коккоз, М. М.** Способ термофрикционного фрезоточения и фреза трения / Патент РК № 32933. – 2018. – Бюл. № 25.

8 **Шеров, К. Т., Тусупова, С. О.** Исследование износа термофрикционных режущих инструментов / Механика и технологии. – Тараз: Изд-во «Тараз университеті» ТарГУ имени М. Х. Дулати. – 2018. – № 2(60). – С. 7–16.

9 **Талантов, Н. В.** Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М. : Машиностроение. – 1992. – 240 с.

10 **Покинтелица, Н. И., Сидоров, В. А.** Особенности температурно-деформационных процессов в зоне контакта инструмента и заготовки при термофрикционном резании металлов / Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 111/2010. Серія: Машино. – обудування та транспорт. – Севастополь, 2010.

11 **Тусупова, С. О., Шеров, К. Т.** Методы повышения износостойкости, прочности и жесткости термофрикционных инструментов // Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» – Могилев: Белорус. – Рос. ун-т. – 2018. – С. 27.

12 **Тусупова, С. О., Шеров, К. Т.** Наплавка – как технологический метод повышения износостойкости термофрикционных инструментов // Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №10), 13-14 июня 2018 г. Часть 3. – Караганда : Изд-во КарГТУ, 2018. – С. 263–265.

13 **Тусупова, С. О.** Термофрикциялық кесуші құралдардың тозуға төзімділігін, қатаңдығы және беріктігін қамтамасыз ету тәсілін зерттеу және жарату. / 6D071200 – Машинажасау мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация – Караганда 2020. – 169 с.

14 **Шеров, К. Т., Тусупова, С. О., Ракишев, А. К., Мусаев, М. М., Доненбаев, Б. С., Шеров, А. К., Курмангалиев, Т. Б., Сарымбай, А. К.** Контроль качества и испытание термофрикционных инструментов, наплавленных с износостойкими наплавочными материалами / Новости науки Казахстана. – Алматы. – 2020. – № 3 (145) – С. 94–103.

REFERENCES

1 **Kashirskaya, E. N., Orlov, A. V.** Opredelenie iznosa metallorezhushego instrumenta na osnove analiza temperatury rezaniya [Determination of cutting tool wear based on cutting temperature analysis] // Polzunovskij vestnik. – 2012. – № 1/1. – P. 120–122.

2 **Nasad, T. G.** Vysokoskorostnaya obrabotka trudnoobrabatyvaemyh materialov: monografiya [High-speed machining of difficult-to-machine materials: monograph] / T. G. Nasad, I. E. Kiryushin, D. E. Kiryushin. – Saratov: SGTU, 2009. – 148 p.

3 **Poduraev, V. N.** Rezanie trudnoobrabatyvaemyh materialov [Cutting of difficult-to-machine materials.]. – M. : Vysshaya shkola. – 1974. – 587 p.

4 **Sherov, K. T., Muravev, O. P., Ualiev, D. Sh. et. al.** Sposob termofrikcionnoj obrabotki ploskosti i konstrukciya diska treniya [Method of thermofrictional processing of a flat surface and design of a friction disk] // Innovacionnyj patent № 22998 RK na izobretenie 15.10.2010, byul. № 10.

5 **Sherov, K. T., Muravev, O. P., Sherov, A. K. et. al.** Sposob termofrikcionnoj rezhushe-uprochnyayushej obrabotki cilindricheskih poverhnostej i konstrukciya diska treniya [Method of thermofrictional cutting-strengthening processing of cylindrical surfaces and design of a friction disk] // Innovacionnyj patent № 25649 RK na izobretenie. 16.04.2012g., byul. №4.

6 **Sherov, K. T., Mazdubaj, A. V., Sihimbaev, M. R., Isagulov, A. Z., Sherov A. K., Rakishev, A. K., Musaev, M. M., Sihimbaeva, D. R.** Sposob termofrikcionnoj otrezki metallicheskih zagotovok s ohlazhdeniem i konstrukciya diskovoj pily [Method of thermofrictional cutting of metal blanks with cooling and design of a circular saw] / Patent №31934 RK na izobretenie. 30.03.2017g. Byul. №6.

7 **Sherov, K. T., Musaev, M. M., Kokkoz, M. M.** Sposob termofrikcionnogo frezotocheniya i freza treniya [Method of thermofrictional mill-turning and friction milling cutter] / Patent RK № 32933. 2018. Byul. № 25.

8 **Sherov, K. T., Tusupova, S. O.** Issledovanie iznosa termofrikcionnyh rezhushih instrumentov [Study of wear of thermofrictional cutting tools] / Mehanika i tehnologii. – Taraz: Izd-vo «Taraz universiteti» TarGU im. M.H. Dulati. – 2018. – № 2(60). – P. 7–16.

9 **Talantov, N. V.** Fizicheskie osnovy processa rezaniya, iznashivaniya i razrusheniya instrumenta. [Physical fundamentals of the process of cutting, wear, and destruction of tools] – M. : Mashinostroenie. – 1992. – 240 p.

10 **Pokintelica, N. I., Sidorov, V. A.** Osobennosti temperaturno-deformacionnyh processov v zone kontakta instrumenta i zagotovki pri termofrikcionnom rezanii metallov [Features of temperature-deformation processes in the contact zone of the tool and workpiece during thermofrictional metal cutting] / Visnik SevNTU: zb. nauk. pr. Vip. 111/2010. Seriya: Mashino. – obuduvannya ta transport. – Sevastopol, 2010.

11 **Tusupova, S. O., Sherov, K. T.** Metody povysheniya iznosostojkosti, prochnosti i zhestkosti termofrikcionnyh instrumentov [Methods for increasing wear resistance, strength, and rigidity of thermofrictional tools] // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii molodyh uchenyh «Novye materialy, oborudovanie i tehnologii v promyshlennosti» – Mogilev: Belorus. – Ros. un-t. – 2018. – P. 27.

12 **Tusupova, S. O., Sherov, K. T.** Naplavka – kak tehnologicheskij metod povysheniya iznosostojkosti termofrikcionnyh instrumentov [Hardfacing as a technological method for increasing the wear resistance of thermofrictional tools] // Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Integraciya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizacii Plana nacii» (Saginovskie chteniya № 10). – 13–14 iyunya 2018 g. Chast 3. – Karaganda : Izd-vo KarGTU. – 2018. – P. 263–265.

13 **Tusupova, S. O.** Termofrikciyalyқ kesushi құraldardyң tozuға tәzimdiligin, қataңdyғy zhәne beriktigin қamtamasyz etu tәsilin zertteu zhәne zharatu. [Research and development of a method for ensuring the wear resistance, rigidity, and strength of thermofrictional cutting tools.] / 6D071200 – Mashinazhasau mamandyғy bojynsha filosofiya doktory (PhD) dәrezhesin alu үshin dajyndalғan dissertaciya – Karaganda 2020. – 169 p.

14 **Sherov, K. T., Tusupova, S. O., Rakishev, A. K., Musaev, M. M., Donenbaev, B. S., Sherov, A. K., Kurmangaliev, T. B., Sarymbaj, A. K.** Kontrol kachestva i ispytanie termofrikcionnyh instrumentov, naplavlennyh s iznosostojkimi naplavochnymi materialami [Quality control and testing of thermofrictional tools hardfaced with wear-resistant surfacing materials]/ Novosti nauki Kazahstana. – Almaty. – 2020. – № 3 (145) – P. 94–103.

29.05.26 ж. баспаға түсті.
02.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
05.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Д. Ж. Менлен[1], А. К. Шеров[2], Н. Ж. Карсакова[3],
К. И. Имашева[4], Б. О. Жумагалиев[5]
[1,2,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[3,4]Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 29.05.26.
Поступило с исправлениями 02.06.26.
Принято в печать 05.06.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЕРМОФРИКЦИОННЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Стало известно, что существует проблема преждевременного выхода режущего инструмента из строя при механической обработке труднообрабатываемых материалов в машиностроительном производстве, что существенно влияет на эффективность его производства. В качестве решения этой проблемы была поставлена цель развернуть применение метода термофрикционной обработки с импульсным охлаждением вместо существующих методов механической обработки. В настоящее время в этом

направлении достигнуты значительные успехи. Но результаты проведенного исследования показали, что на режущих кромках термофрикционных инструментов имеются такие проблемы, как образование трещин и износ, поломка. Поэтому в статье рассматривается вопрос повышения износостойкости термофрикционных инструментов, используемых для термофрикционной обработки с импульсным охлаждением. Механизм резки методов термофрикционной обработки с импульсным охлаждением основан на замене внешнего трения внутренним трением путем формирования цикла «нагрев–охлаждение» в области обработки частотно, что позволяет снизить энергоемкость процесса резки. В результате исследования установлено, что в целях повышения износостойкости термофрикционных режущих инструментов применен метод выплавки их режущих кромок высокопрочным расплавленным материалом. Экспериментально доказано, что термофрикционные инструменты, расплавленные материалом STOODY M7-G, обладают в 1,5–2 раза большим рабочим ресурсом по сравнению с традиционными термофрикционными инструментами. Кроме того, установлено, что метод выплавки отличается высокой трудоемкостью и высокой технологической себестоимостью. В связи с этим обоснована актуальность разработки альтернативного метода, обеспечивающего износостойкость режущей части термофрикционных инструментов технологическими способами при их изготовлении.

Ключевые слова: термофрикционная обработка, импульсное охлаждение, термофрикционный режущий инструмент, износостойкость, сложные обрабатываемые материалы, технологический метод.

D. Zh. Menglen[1], A. K. Sherov[2], N. J. Karsakova[3],
K. I. Imasheva[4], B. O. Zhumagaliev[5]
[1,2,5]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[3,4]Karaganda Technical University named after A.Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 29.05.26.
Received in revised form 02.06.26.
Accepted for publication 05.06.26.

INVESTIGATION OF WEAR RESISTANCE OF THERMOFRICTION CUTTING TOOLS

Premature failure of cutting tools during the machining of difficult-to-machine materials is a major problem in mechanical engineering production, reducing manufacturing efficiency. To address this issue, thermofrictional machining with pulse cooling was proposed as an alternative to conventional machining methods. Although significant progress has been achieved, studies revealed problems on the cutting edges of thermofrictional tools, including crack formation, wear, and fracture. Therefore, this article focuses on improving the wear resistance of thermofrictional tools used in thermofrictional machining with pulse cooling. The cutting mechanism

of this method is based on replacing external friction with internal friction by creating a cyclic "heating–cooling" process in the machining zone, which reduces cutting energy consumption. The study found that wear resistance can be improved by surfacing the cutting edges with a high-strength molten material. Experimental results showed that tools surfaced with STOODY M7-G material have a service life 1.5–2 times longer than conventional thermofrictional tools. However, the surfacing method is characterized by high labor intensity and production cost. Therefore, the development of an alternative technological method for improving tool wear resistance during manufacturing is justified.

Keywords: thermal friction treatment, pulse cooling, thermal friction cutting tool, wear resistance, complex processed materials, technological method.

МРНТИ 55.57.43

https://doi.org/10.48081/BGQF2224

Б. А. Молдаханов[1], М. В. Дудкин[2], Т. Лешневский[3],
В. С. Яковлев[4], А. Ж. Байгунусов[5]

[1,2]«Европлюс Восток» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Вроцлав ғылым және технологиялар университеті, Польша, Вроцлав қ.;
[4,5]Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2977-693X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5732-0724
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1903-3967
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7315-4719
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8607-4986
*e-mail: bek_m78@mail.ru

ӨСІМДІК ШАРУАШЫЛЫҒЫ ҚАЛДЫҚТАРЫМЕН ЖЕМ-ШӨП ҚОСПАЛАРЫН АРАЛАСТЫРҒЫШТЫҢ ЖҰМЫС ПРОЦЕСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Жем-шөп немесе тұз брикеттерін өндіру, түпкілікті өнімнің сапасы мен жай-күйіне қойылатын көптеген нормативтік шектеулер мен жоғары талаптарға ие. Олар тасымалдау мен ылғалды бөлмеде сақтау кезінде берік және тұтас болуы керек. Сонымен қатар, олар барлық дәмдерін сақтап, жануарлар қоректенуге тартымды көрінуі керек. Тиісінше, бұл талап өндірістің технологиялық желісін құрайтын жұмыс жабдықтарының тұтас кешенінің параметрлерін таңдау арқылы қамтамасыз етілуі керек. Мысалы, тұз брикеттері, оған әр түрлі араластырғыштар кіреді, оларды сығымдау алдында жем қоспаларының біркелкі араласуы мен біркелкілігі қамтамасыз етіледі. Қалыпталатын қоспада бірнеше компоненттер бар, олардың концентрациясы немесе көлемдік құрамы мен мөлшері араластырғыштың, содан кейін престеу жабдықтарының жұмыс процесінің параметрлеріне және соңғы өнімнің күйіне – жем немесе тұз брикеттеріне айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Араластырғыштың бүкіл жұмыс процесін жаңартуға және барлық компоненттердің параметрлері өзгерген кезде де жем қоспасы біртекті болғанша біркелкі араластыруға мүмкіндік беретін араластырғыштың жаңа білігін жобалау нәтижелері келтірілген. Эксперименттік тәжірибелер негізінде эксперименттік деректерді статистикалық өңдеуден кейін кіріс факторларының өзгеруіндегі жұмыс процесін барабар сипаттайтын регрессия теңдеулері жасалды және зерттелетін факторлардың өзгеру шектері көрсетілді. Жоғарыда аталған мақсаттардың ең тиімді көрсеткіштеріне қол жеткізуге мүмкіндік беретін қоспа ингредиенттерінің құрамы таңдалды.

Кілтті сөздер: жем-шөп араластырғыш, буындалған білік, араластыру, дәрумендер, қоспаның ылғалдылығы, пресс, ас тұзы.

Кіріспе

Ірі қара малды азықтандыруға арналған тұзды жалақ брикеттері түріндегі қоспаларды өндіруге арналған технологиялық желіге кіретін машиналардың құрылысы, құрылыс немесе жол машиналарынан айтарлықтай ерекшеленбейді. Тек олар өзірленетін материалдарға қойылатын жоғары талаптармен, олардың араластырғышқа жүктелген компоненттерінің пайыздық үлесінің біркелкі еместігінде. Тұз, араластырғыштағы қоспаның жалпы көлемінің 90–95 % құрайды және әрдайым тартымды дәмдік қасиеттерге ие бола бермейді, оны арттыру үшін қоспаға әр түрлі жем-шөп қоспаларының 10 % қосылады. Брикеттегі тұз оны жалаған кезде ірі қара малдың шөлдеуін және тұрақты су тұтынуын тудыру үшін, сиырларда шөпті үнемі шайнау үшін қажетті сілекей қарқынды пайда болуы үшін қажет, оларды тиімді тұтыну сүттің көбеюіне және сиырлар салмағының өсуіне әкеледі (жануарлардың өнімділігі деп аталады).

Қазіргі кезде ірі қара малдардың рационына микро және макроэлементтер мен кейбір дәрумендер жетіспейді. Осыған байланысты малдың өнімділігі төмендейді. Минералды-витаминді компоненттердің жетіспеушілігі ағзаға кері әсерін тигізіп, нәтижесінде сиырлардың тәбеті нашарлайды, сауыны азаяды, бұзаулардың салмағы төмендейді. Осы мәселелерді шешу үшін тұзды жалақ брикеттерін дайындау желісінде қолданылатын машиналарды жаңарту немесе жаңа түрін әзірлеу маңызды. Себебі бұл тек жабдықтарды заманауи деңгейге көтеру ғана емес, сонымен қатар өнім сапасын арттыруға да мүмкіндік береді [1, 3]. Тағы бір айта кететін жайт, тұзды жалақ брикеттерін шығаратын технологиялық желілерде әдетте ұнтақтағыштар, ұсақтағыштар, араластырғыштар және престеу жабдықтары кездеседі.

Жұмыстың мақсаты: тұзды жалақ брикеттерді қоса алғанда, жем-шөп пен жемшөп қоспаларын өндіруге жұмсалатын шығындарды төмендете отырып, жануарлардың барынша өнімділігін арттыратын, алдын ала араластыру кезінде қоспаның барлық компоненттерін біртекті болуын қамтамасыз ететін, тұзды жалақ брикеттер өндірісінің құрылымы мен тәсілін әзірлеу және ғылыми негіздеу. Құрама жем компоненттерін араластырудың теориялық негіздері және оларды аппаратуралық рәсімдеу В.В. Кафаров, Е.И. Резник, В.Н. Иванец, Б.А. Комаров, К. Бенке, Н. Пфост, Н. Сатомо, Т. Танака, Х. Накадзима, К. Эндо және т.б. жұмыстарында көрсетілген. Ғалымдардан басқа әмбебап және тиімді араластырғыштарды әзірлеумен келесі өндірістік фирмалар айналысты: «Bühler», Швейцария, «Simon-Barron», Англия, «Hayes & Stolz», АҚШ, «Amandus Kahl», Германия, «Sprout Voldron», АҚШ, «Strong Skott», АҚШ, «Lödige», Германия, «Sprout-Matador», Дания, және т.б. Аталған фирмалардың араластырғыш конструкциялары әртүрлі араластырғыш органдардан тұрады. Көбінесе компоненттерді араластыру үшін спиральді ленталардың әр түрлі комбинациялары түрінде орындалған араластырғыш жұмыс органдары пайдаланылады [2, 81–90-бб.].

Материалдар мен әдістері

Теңдестірілген рацион құру – бүкіл әлемде жем-шөптің толықтырушы әрекеті қағидатының көмегімен табысты шешілетін маңызды міндет. Бұл қағидатты іске асырудың тәсілдерінің бірі - құрамы мен қасиеттері бойынша оларды өндіретін машиналар мен технологиялық желілердің мүмкіндіктеріне байланысты болатын жем-шөп қоспаларын қолдану. Олар рациондарды қоректік заттар бойынша теңестіреді және олардың неғұрлым тиімді сіңуіне ықпал етеді. Шығыс Қазақстанның шаруа қожалықтарындағы сиырларға арналған азықтың минералдық құрамын зерттегенде шөпте, сүрлемде, концентраттар мен сабанда калий, темір, мыс және мырыштың жеткіліксіз екенін көрсетті. Жалақ түріндегі тұзы бар премикстердің артықшылығы сонымен қатар ірі қара малдың белгілі бір тығыздықтағы тұзды жалау процесінде белсенді сілекей бөлінуіне кепілдік беретіндігіне байланысты, оларды өндірудің технологиялық желісіне кіретін машиналар қамтамасыз етуі керек.

Минералды қосылыстар ретінде жемде жеткіліксіз микроэлементтерді тең мөлшерде механикалық жолмен енгізу қажет, ал бұл элементтер көлемі бойынша да, нысаны бойынша да, физикалық жай-күйі бойынша да мүлдем әр түрлі болғандықтан, оларды қажетті күйге келтіруге қабілетті машиналар, мысалы ұнтақтау, ұсақтау, кептіру және әзірленіп жатқан қоспаға енгізу машиналары талап етіледі. Тұз брикеттеріне сібір самырсынының қылқан жапырақтарын біркелкі етіп машинамен енгізу анағұрлым пайдалы және қолжетімді.

Жалақ брикеттердің маңызды құрамдас бөлігі тұз болып табылады, ол кәдімгі рационда тапшы болғандықтан, жануарларға өте қажет болады. Өндірісте № 0, 1, 2, 3 стандартты ұсақталған, ылғалдылығы 0,2%, бірінші сортты ас тұзы пайдаланылды. Сонымен қатар жалақ брикет рецептісінің құрамына натрий селениті, күкірт қышқылды марганец, йодты калий, көмірқышқылды кобальт, магний тотығы, монокальций фосфаты, күкірт қышқылды мырыш, және т.б. кіреді [6, 7, 8]. Мысалы, 1-ші және 2-кестелерде келтірілген көмірқышқылды мыс пен күкірт қышқылды марганецтің ұсақтағанға дейін алынған бастапқы әртүрлі гранулометриялық жай-күйін қарастырамыз. Ұсынылып отырған жалақ брикеттер өндірісінің схемасына сәйкес микроэлемент тұздарын шашыраңқы немесе ерітілген күйінде енгізу көзделді. Дайын өнімнің құрамында біркелкі бөлу мүмкіндігін анықтау үшін олардың физикалық-механикалық қасиеттеріне зерттеу жүргізілді.

1-кесте – Әр түрлі ылғалдылықтағы көмірқышқылды мыстың гранулометриялық құрамы

№ р/с	Ылғалдылық, %	Електегі қалдық №, %							Бөлшектердің орташа мөлшері, мм
		2,0	1,2	0,63	0,50	0,25	0,16	Електің түбі	
1	41,2	6,3	28,5	51,4	7,2	4,1	0,2	2,3	1,15
2	38,2	5,3	25,4	46,0	13,5	5,0	0,8	4,0	1,06
3	35,9	1,8	18,6	38,0	30,6	5,7	1,2	4,1	0,89
4	30,4	0,9	10,1	18,3	26,7	20,3	13,5	10,2	0,62

5	25,1	-	2,6	5,5	33,6	28,0	16,8	13,5	0,44
6	22,3	-	0,5	4,3	13,6	24,2	24,9	32,5	0,30
7	19,1	-	0,2	2,6	10,8	27,1	21,1	38,2	0,27
8	15,8	-	-	0,3	9,3	30,7	18,9	40,8	0,25
9	12,5	-	-	0,3	3,5	18,6	33,6	44,0	0,20
10	9,6	-	-	0,1	1,8	7,4	42,2	48,5	0,17
11	3,8	-	-	0,1	1,5	6,6	39,4	52,4	0,16

1-кестедегі мәліметтерден көріп тұрғанымыздай, ылғалдылық төмендеген сайын бөлшектердің орташа мөлшері де азайып отырады. Мысалы, ылғалдылық 41,2 %-дан 25,1 %-ға дейін түскенде, бөлшектер 1,15 мм-ден 0,44 мм-ге дейін ұсақталады, ал ылғалдылық 25 %-дан төмен түскен жағдайда, бөлшектердің мөлшері онша өзгермейтінін байқауға болады (шамамен 0,30–0,16 мм аралығында). Ылғалдылық 9,6 %-ға жеткенде бөлшектердің мөлшері 0,17 мм, ал 3,8 % болғанда 0,16 мм-ге дейін кемиді. Бұл жерде ылғалдылықтың одан әрі төмендеуі бөлшектердің ұсақталуына айтарлықтай әсер етпейді деп айтуға болады.

2-кесте – Әр түрлі ылғалдылықтағы күкірт қышқылды марганецтің гранулометриялық құрамы

№ р/с	Ылғалдылық, %	Електегі қалдық, №, %							Електің түбі	Бөлшектердің орташа мөлшері, мм
		2,0	1,2	1,0	0,63	0,50	0,25	0,09		
1	30,7	61,3	34,2	2,2	1,3	0,5	0,3	0,2	-	2,11
2	27,4	47,2	28,8	8,3	10,2	4,2	0,8	0,5	-	1,84
3	23,6	33,4	15,5	10,1	20,7	15,1	4,2	0,8	0,2	1,53
4	20,4	17,6	12,8	7,3	22,4	30,7	5,6	2,3	1,3	1,11
5	17,8	7,9	9,6	5,5	15,1	48,8	7,3	4,2	1,6	0,84
6	15,4	0,5	5,7	3,7	8,2	55,9	16,5	7,4	2,1	0,60
7	12,2	-	-	0,5	1,1	10,4	51,8	32,8	3,4	0,32
8	9,7	-	-	-	-	-	-	90,3	9,7	0,16
9	6,6	-	-	-	-	-	-	87,6	12,4	0,15
10	3,5	-	-	-	-	-	-	83,6	16,4	0,15

2-кестеде күкірт қышқылды марганецтің нәтижелері көрсетілген. Мұнда да ылғалдылық төмендеген сайын бөлшектердің мөлшері азаяды. Ылғалдылық 30,7 % болғанда бөлшектердің орташа мөлшері 2,11 мм, ал ылғалдылық 9,7 %-ға түскенде бұл көрсеткіш 0,16 мм-ге дейін кемиді. Соңғы екі жолдан (ылғалдылық 6,6 % және 3,5 %) көрініп тұрғандай, мөлшер 0,15 мм шамасында тұрақталып қалады. Бұл кезде материалдың көп бөлігі өте ұсақ фракциялардан тұрады (83–87 %-ы 0,09 мм електен өтеді). Менің байқағаным, мұндай ұсақ бөлшектерді брикет қоспасында біркелкі тарату үшін жақсы араластырғыш қажет болады.

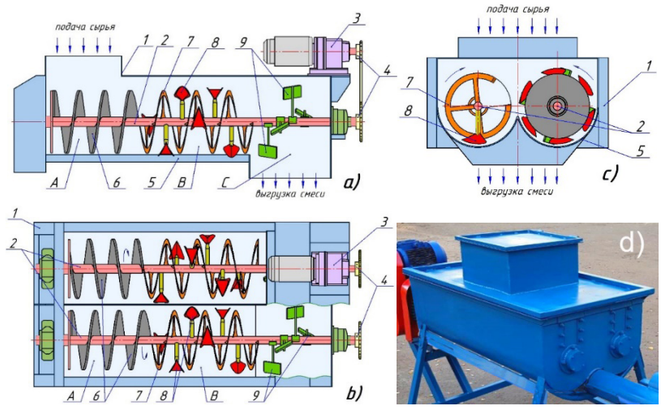
Тазартылмаған күкірт қышқылды марганецтің ылғалдылығы төмендеген сайын оның бөлшектері де ұсақтай түседі. 2-кестеге қарап отырсақ, бұл материалдың тозаңдануы негізінен өте ұсақ бөлшектердің арқасында болып тұр. Атап айтқанда, мөлшері 0,01 мм-ден аспайтын бөлшектер көп. Менің ойымша, мұндай ұсақ фракцияны брикет қоспасының бүкіл көлеміне біркелкі тарату оңай емес. Сондықтан арнайы араластырғыштар керек.

Енді монокальций фосфатына тоқталайық. Бұл орташа гигроскопиялық ұнтақ. Оның түйіршіктерінің мөлшері 0,2-ден 1,4 мм-ге дейін, түсі ақ немесе сұр реңкті. Суда жақсы ериді. Оның негізгі көрсеткіштері төмендегідей: фосфордың жалпы үлесі (Р) – кемінде 22,7%; кальцийдің үлесі (Са) – кемінде 16 %; судың үлесі – 3 %-дан аспайды; тұз қышқылында ерімейтін күл – 10 %-дан аспайды; pH- кемінде 3,3.

Осыған ұқсас зерттеулерді брикеттің барлық компоненттеріне жүргіздік. Осылайша біз әр компоненттің сапасы қандай болуы керектігін анықтадық. Бұл көрсеткіштерді технологиялық желідегі машиналар қамтамасыз етуі тиіс. Жалпы алғанда, зерттелген материалдардың технологиялық қасиеттері жақсы деп бағаланады. Мысалы, олардың табиғи кертпеш бұрышы 40–41 градусты құрады, ал көлемдік салмағы 485–500 кг/м³ аралығында болды.

Зерттеу барысында біз тұзды жалақ брикеттерін алдық. Олардың компоненттері соңғы нығыздау алдында жаңа араластырғыштарда араластырылды.

Ал енді араластырғыштың құрылысына көшейік. 1-суретте шикізатты үздіксіз беріп, дайын қоспаны түсіретін жаңа екі білікті араластырғыштың схемасы (1, а, 1, б және 1, с) және оның фотосуреті (1, d) көрсетілген.

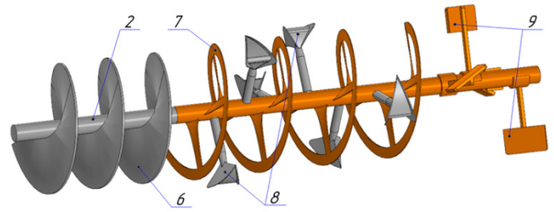


1-сурет – Екі білікті араластырғыштың құрылысы мен жұмыс принципі:
а) – араластырғыштың негізгі түрі; b) – араластырғыштың жоғарғы көрінісі;
с) – араластырғыштың сол жақ көрінісі; d) – араластырғыштың физикалық (эксперименттік) моделі; 1-корпус; 2-білік; 3 – мотор-редуктор; 4-тізбекті беріліс; 5-негіздің төменгі профильді табағы; 6-шнек; 7-араластырғыштың спиральды қырқұралы; 8-тұмсық тәрізді қопсытқыш; 9-күрек; А – шикізат беру аймағы; В – ингредиенттерді араластыру аймағы; С-түсіру аймағы

Араластырғыштың қосымша элементтері - тұмсық тәрізді қопсытқыштары бар әртүрлі тығыздалған спиральдерден тұратын, құрама біліктің 2 пішінін қайталайтын 5 профильді арнайы төменгі табағы бар 1 қораптық нысандағы корпустан тұрады (2-сурет). Корпустың сыртқы жағында орналасқан мойынтірек тіректерінің

көмегімен корпуста екі құрама білік 2 орналасқан (2-сурет). Құрамдастырылған біліктерге жетек-жеке: әрбір білік 1 корпустың үстінде орналасқан 3 мотор-редуктордан 4 тізбекті беріліс көмегімен айналымға келтіріледі. Құрама біліктердің жетегі айналудың әртүрлі бағыттарын ұйымдастыруға мүмкіндік береді: екі білік бір-бірінен әртүрлі жаққа немесе керісінше өзіне қарай айналуы мүмкін; бір жаққа айналуы мүмкін; біліктердің бірі екіншісіне қарағанда аз жылдамдықпен, оның ішінде біліктердің бірі толық тоқтағанға дейін айналуы мүмкін. Біліктердің айналу нұсқасын таңдау дайын жемдік қоспаның, бастапқы шикізаттың құрамы, оның ылғалдылығы, қоспаны дайындау жылдамдығы бойынша талаптарға байланысты болады.

2-суретте құрама біліктің конструкциясы бейнеленген. Білікте 2 сол жағында шнек 6; оның неғұрлым ұзын ортаңғы бөлігінде орамдарының арасында арнайы орналасқан бекіту нүктелеріне орнатылған 8 тұмсық тәріздес қопсытқыштар бекітілетін 7 спиральді қырқұрал орналасқан. Біліктің оң жағына күрекшелер орнатылған 9. 1-суретте қондырғының бір-біріне қатысты 1200 ығысу бұрышымен 8 және 9 үш қалақтардың алты тұмсық тәрізді қопсытқыштарын бекіту көрсетілген.



2-сурет – Араластырғыштың жаңа аралас білігінің сыртқы түрі:
2 – білік; 6 – шнек; 7 – араластырғыштың спиральді қырқұралы;
8 – тұмсық тәрізді қопсытқыш; 9 – күректер

Спиральды қырқұрал 7, тұмсық тәрізді қопсытқыштар «8» және күрекшелер «9» конструкциясы 7 спиральді қырқұралды созуға немесе тығыздауға болатындай, тұмсық тәрізді қопсытқыштар 8 және күрекшелер 9 орнына қырқұрапдардың әртүрлі конфигурациялары мен нысандарын орнатуға, сондай-ақ араластырғыштың жұмыс элементтерінің оның жұмыс процесінде жемшөп қоспаға кіруінің оңтайлы әсер ету бұрышын беруге болады әртүрлі шикізат үшін тиімді араластыруды қамтамасыз ететін.

Екі білікті араластырғыштың жұмыс істеу принципін түсіндіре ктейік. Бастапқы ингредиенттер жүктеу терезесі арқылы түседі (1, а сурет). Бұл кезде екі білік (2) айнала бастайды. «А» аймағында (шнек орналасқан жер, 6) шикізат екі біліктің арасында бөлінеді. Сосын ол «В» аймағына беріледі. Мұнда компоненттер аздап араласады. «В» аймағы – ең ұзын бөлік. Міне, осы жерде ингредиенттер қарқынды түрде араласады.

Спиральді қырқұрал (7) қоспаны оңға қарай, салыстырмалы түрде баяу жылжытады. Ал тұмсық тәрізді қопсытқыштар (8) оны қосымша араластырады.

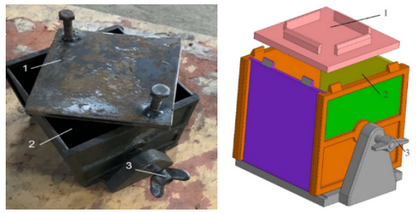
Олар қоспаны көлденеңінен айналдырады. Қопсытқыштардың пішіні арнайы – «тұмсық тәрізді» етіп жасалған. Осының арқасында олар қоспаға тіреледі. Сөйтіп, пайда болған тығыз кесектерді ұсақтайды және қоспа элементтерін әр жаққа шашады. Спиральді қырқуралдың сүйемелдеуші пластиналары да араластыруға көмектеседі.

«С» түсіру аймағында күректер (9) жұмыс істейді. Олар дайын жемшөп қоспасын түсіру терезесіне қарай «лақтырады». Бұл қоспаның тығыздалып кетуіне және корпустың ішкі бетіне жабысып қалуына жол бермейді. Нәтижесінде барлық ингредиенттер көлем бойынша біркелкі араласады. Бір қиындық бар. Араластырғыштағы құбылыстар өте күрделі. Олар компоненттердің пішініне, қасиеттеріне, күйіне, сондай-ақ технологиялық және конструктивтік факторларға байланысты. Сондықтан бөлшектердің қозғалысын математикалық түрде дәл және түсінікті сипаттау қиын. Сондықтан араластыру процесін шынайы зерттеудің негізгі жолы - эксперименттік.

Нәтижелер және талқылау

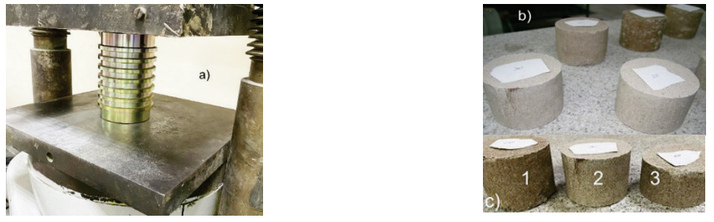
Ұзақ эксперименттік және теориялық зерттеулер нәтижесінде біз компонеттердің оңтайлы құрамын таңдап алдық, ол бойынша әзірленген тұзды жалақ брикеттері ірі қара малдың төлін азықтандыру бойынша тәжірибелерде қолданылды, сондай-ақ тұзды жалақ премикстер өндірісі үшін рецепт жасалды, ол ағымдағы зерттеулерде жаңа компонентерді енгізу және қоспаны дайындау кезінде жаңа араластырғышты қолданған соң, кейбір компоненттердің концентрациясы өзгертілді. Жалақ премикстердің құрамдас бөліктерінің құрамы өзгергенге дейін порциялық араластырғышта жем-шөп тұзының сусымалы материалдарын, минералдық және өсімдік компоненттерін араластыру, кейіннен олардан дайындалған қоспадан фито-минералдық тұз блоктарын дайындау 25 кг/см^2 қысымда П-125 пресінде мынадай арақатынаста жасалды, мас./сағ.: көмірқышқылды мырыш – 0,28; көмірқышқылды мыс – 0,03; йодты калий – 0,05; күкірт қышқылды темір – 0,41; (бентонит) 2 мм-ге дейін ұсақталған цеолит – 30,0; 2 мм дейін ұсақталған тавриялық жусан – 2,0; 1,5 мм дейін ұсақталған сібір самырсының қылқан жапырақтары – 2,5; 2 мм-ге дейін ұсақталған хлорлы натрий (жем тұзы) – 1500,0.

Тұзды жалақ брикеттерді соңғы престеу бойынша эксперименттік зерттеулер жүргізу арнайы эксперименттік жабдықты пайдалана отырып, зертханалық жағдайларда жүзеге асырылды. Көрсеткіштерді алуға неғұрлым ыңғайлы қол жеткізу үшін кейбір тәжірибелер жеке қорап-пішінді қолдана отырып жүргізілді (3-сурет: а) табиғи қорап; б) қораптың компьютерлік моделі).



3-сурет – Эксперименттік табиғи пішін-қорап (а) және оның сандық моделі (б) тұзды жалақ премиксін престеу және сынау үшін: 1-қақпақ-плунжер, 2-өлшемді қорап-қалып, 3-бекіту бұрандалары

Кейбір тәжірибелер цилиндрлік пресс-қалыппен жүргізілді (4, a сурет). 4, b және 4,c-суреттерде бірдей қысым кезінде, бірақ араластыру сапасы мен престелетін қоспа компоненттерінің өлшемдері әртүрлі болған кезде алынған үлгілердің жай-күйі мен биіктігі көрінеді. Бірдей қысым кезінде алынған тұзды жалақ брикеттердің әртүрлі биіктігі қоспаның өсімдік компоненттерінің әртүрлі механикалық қасиеттеріне негізделген. 4-суретте көрсетілген тұзды жалақ брикеттерінің цилиндрлері қалыптық тұз қоспасының бірдей көлемі мен салмағынан алынған, бірақ онда сібір қылқан жапырағы компонентінің ұзындығы әртүрлі: 1–5 мм; 2-үлгіде – 2,5 мм; 3 үлгіде – 1 мм. Барлық үлгілердің пресс-қалыптарының диаметрі бірдей – 60 мм, биіктігі – 120 мм; престің қысымы – 120 МПа. Үлгілердің суретінен көрінгеніндей - қылқан жапырақтардың арматураланған ұзындығы неғұрлым аз болса, тұзды жалақ брикеттер үлгісінің сығылуы мен беріктігі соғұрлым жоғары болады.



4-сурет – Цилиндрлік пресс-қалыппен эксперимент жүргізу:
a) – эксперименттік цилиндрлік пресс-қалыпта; b) – бірдей қысым кезінде алынған үлгілердің жай-күйі мен биіктігі;
c) – араластырудың әртүрлі сапасы мен престелетін қоспа компоненттерінің өлшемдері кезінде алынған үлгілердің жай-күйі мен биіктігі

Араластырудың кіріс факторларын таңдау мен өзгерту шектерін негіздеу үшін жалақ премикстерді алу кезінде компоненттердің массасын араластыру процесіне әсер ететін әртүрлі факторлардың өзара іс-қимылын зерттеу үшін режимдерді іздеу жүзеге асырылды, бұл үшін экспериментті жоспарлаудың математикалық

әдістері қолданылды. Зерттелетін процестің математикалық моделі екінші дәрежелі полинома түрінде ұсынылды:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i X_i + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} X_i^2 + \sum_{i \le j}^{n} b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

мұндағы b_0-қарастырылып отырған факторлар орташа, «нөлдік» деңгейлерде болған жағдайда жауаптың орташа мәніне тең теңдеудің еркін мүшесі; X-жауап функциясын анықтайтын және өзгеретін факторлардың масштабталған мәндері; bij-бір фактордың әсер ету дәрежесі екіншісінің шамасы өзгерген кезде қаншалықты өзгеретінін көрсететін екі факторлы өзара әрекеттесу коэффициенттері; b_{ii} – факторлардан шығу параметрінің сызықтық еместігін анықтайтын квадраттық әсерлердің коэффициенттері; i, j-факторлардың индекстері; n-жоспарлау матрицасындағы фактілер саны.

Араластырғыштың жұмыс процесінің тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар (5-сурет): X_1 – сібір самырсының ың қылқан жапырақтарының болуы, %; X_2 – кальций тотығының болуы, %; X_3 – араластырғыш білігінің айналу жиілігі, айн/мин; X_4 – рецепт бойынша қоспада тұздың болуы (концентрациясы), %; X_5 – араластыру уақыты, мин. Олардың әсерін бағалау көрсеткіштері: Y_1 – меншікті өнімділік (q), кг/кВтсағ; Y_2 – энергия сыйымдылығы (N), кВт; Y_3 – араластырудың біркелкілігі (коэффициент) (kh), %. Y_3 қоспасының компоненттерін араластырудың біркелкілігі сұйық хроматография әдісімен А, Д, Е дәрумендерінің қоспасының көлемінде болуы мен концентрациясы бойынша тексерілді (3-кесте). Сондай-ақ, 5,d суретте алынған тұзды жалақ брикеттері партиясының фотосуреті көрсетілген.

3-кесте – Араластыру тиімділігі

Брикеттердегі дәрумендер	Витаминдердің түпкілікті болуы бойынша өнімнің біркелкілігі
А, мг/г	93,3
Д, мг/г	88,7
Е, мг/г	86,8

Зерттеу үшін орталық композициялық ротатабельді униформ-жоспарлау қолданылды және бөлшектік факторлық эксперимент таңдалды. Тәжірибе тәртібі кездейсоқ сандар кестесі арқылы рандомизацияланды, бұл бақыланбайтын факторлардың эксперимент нәтижелеріне әсерін болдырмады. Зерттелетін факторлардың өзгеру шектері 4-кестеде келтірілген.

4-кесте – Эксперимент жоспарының негізгі сипаттамалары

Жоспарлау шарттары	Факторлардың өзгеру шектері				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Нөлдік деңгей (0)	50	15	35	35	10
Өзгеру аралығы	10	5	15	15	2
Жоғарғы деңгей (+1)	60	20	50	50	12
Төменгі деңгей (-1)	40	10	20	20	8

Жоғарғы «жұлдыз» нүктесі (+2)	70	25	65	65	14
Төменгі «жұлдыз» нүктесі (-2)	30	5	5	5	6

Жоспарлау матрицасына сәйкес бес кіру факторы үшін эксперименттер саны 32-ге тең болады. Эксперимент нәтижелерін өңдеу кезінде (5-кесте) мынадай статикалық критерийлер қолданылды: дисперсиялардың біртектілігін тексеру – Кохрен критерийі, регрессия теңдеулері коэффициенттерінің маңыздылығы –Стьюдент критерийі, теңдеулердің сәйкестігі - Фишер критерийі.

5-кесте – Экспериментті жоспарлау матрицасы

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	Y_3
-1	-1	-1	-1	1	69	0.53	91
1	-1	-1	-1	-1	40	0.58	81
-1	1	-1	-1	-1	60	0.6	92
1	1	-1	-1	1	47	0.62	86
-1	-1	1	-1	-1	61	0.59	89
1	-1	1	-1	1	57	0.58	84
-1	1	1	-1	1	59	0.65	93
1	1	1	-1	-1	45	0.7	84
-1	-1	-1	1	-1	59	0.53	90
1	-1	-1	1	1	47	0.69	81
-1	1	-1	1	1	57	0.72	93
1	1	-1	1	-1	43	0.59	80
-1	-1	1	1	1	63	0.7	95
1	-1	1	1	-1	53	0.73	83
-1	1	1	1	-1	57	0.73	89
1	1	1	1	1	41	0.8	89
-2	0	0	0	0	56	0.51	92
2	0	0	0	0	41	0.7	75
0	-2	0	0	0	57	0.54	80
0	2	0	0	0	45	0.8	93
0	0	-2	0	0	41	0.51	80
0	0	2	0	0	61	0.53	97
0	0	0	-2	0	65	0.51	96
0	0	0	2	0	55	0.53	79
0	0	0	0	-2	40	0.55	87
0	0	0	0	2	57	0.77	95
0	0	0	0	0	49	0.61	85
0	0	0	0	0	55	0.6	91
0	0	0	0	0	51	0.59	89
0	0	0	0	0	50	0.6	88
0	0	0	0	0	52	0.61	90
0	0	0	0	0	51	0.61	88

Зерттеу үшін орталық композициялық ротатабельді униформ-жоспарлау қолданылды және бөлшектік факторлық эксперимент таңдалды. Тәжірибе тәртібі кездейсоқ сандар кестесі арқылы рандомизацияланды, бұл бақыланбайтын факторлардың эксперимент нәтижелеріне әсерін болдырмады. Араластырғыштың жұмыс процесінің математикалық моделі эмпирикалық түрде алынған және

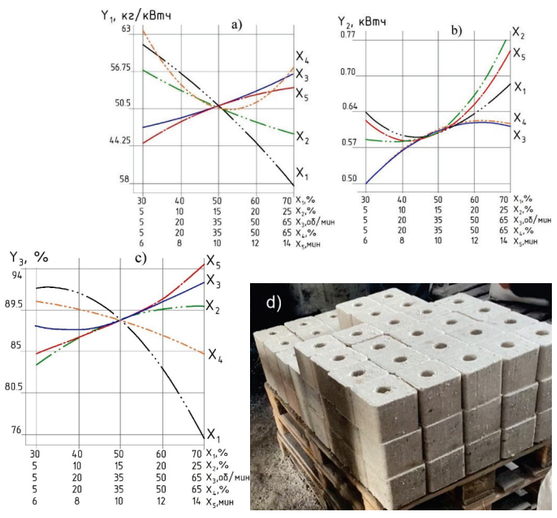
кіріс факторларының өзгеруі кезінде жұмыс процесін барабар сипаттайтын эксперименттік деректерді статистикалық өңдеу нәтижесінде табылған регрессия теңдеулерінің түріне ие:

$$Y_1 = 51{,}51 - 6{,}23 \cdot X_1 - 1{,}91 \cdot X_2 + 1{,}79 \cdot X_3 - 1{,}56 \cdot X_4 + 1{,}67 \cdot X_5 + \\ +1{,}06 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0{,}63 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0{,}75 \cdot X_3 \cdot X_5 - 0{,}81 \cdot X_4 \cdot X_5 + 1{,}92 \cdot X_4^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 0{,}61 + 0{,}024 \cdot X_1 + 0{,}039 \cdot X_2 + 0{,}031 \cdot X_3 + 0{,}033 \cdot X_4 + 0{,}023 \cdot X_5 - \\ - 0{,}015 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}015 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0{,}18 \cdot X_2^2 + 0{,}017 \cdot X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 88{,}98 - 4{,}00 \cdot X_1 + 1{,}11 \cdot X_2 + 1{,}46 \cdot X_3 - 1{,}14 \cdot X_4 + 1{,}29 \cdot X_5 + \\ +0{,}78 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}75 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}71 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0{,}99 \cdot X_1^2 \quad (4)$$

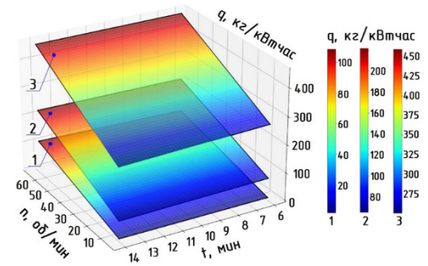
Жаңа араластырғыш жұмысының тиімділігін қоспадағы ингредиенттер құрамының берілген рецептілері және жұмыс процесінің кіріс факторларының шығыс деректеріне әсері бойынша егжей-тегжейлі бағалау регрессия (2), (3), (4) теңдеулерінен алынған.



5-сурет – Xi кіріс факторларының Yj шығыстарынан әсерін анықтауға тәуелділіктер: a) – меншікті өнімділік, кг/кВтсағ; b) – энергия шығыны, кВт; c) – араластырудың біркелкілігі, %; d) – дайын жалақ премикстерінің партиясы

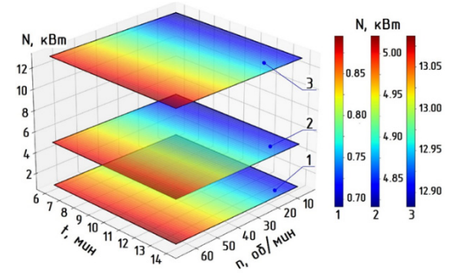
Нақты өнімділіктің q (кг/кВт.сағ) араластырғыш білігінің N-айналу жиілігінің өзгеруіне, айн/мин және t – араластыру уақытының, мин, X_1, X_2 және X_4 белгіленген параметрлері кезінде тәуелділіктерінің графикалық бейнесі 6-суретте келтірілген; N (Вт) энергия шығынының араластырғыштың N-айналу жиілігінің өзгеруіне тәуелділігі, айн / мин және t араластыру уақыты, мин, X_1,

X_2 және X_4 бекітілген параметрлерде, 7-суретте берілген; kh (%) араластыру коэффициентінің араластырғыштың N-айналу жиілігінің өзгеруіне тәуелділігі, айн/мин және t-араластыру уақыты, мин, X1, X2 және X4 бекітілген параметрлерде 8-суретте келтірілген.



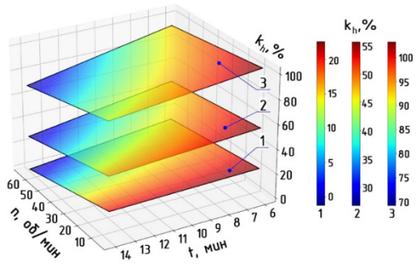
6-сурет – Өнімділікке әсер ететін екі фактор

Бұл жерде q (кг/кВт · сағ) шамасының X3 (біліктің айналу жиілігі, айн/мин) және X_5 (араластыру уақыты, мин) өзгерісіне тәуелділігі көрсетілген. Үш түрлі жағдай алынды: X_1, X_2, X_4 мәндері бекітілген. 1-жағдай: X_1 = 30 %, X_2 = 5 %, X_4 = 5 %; 2-жағдай: X_1 = 50 %, X_2 = 15 %, X_4 = 35 %; 3-жағдай: X_1 = 70 %, X_2 = 25 %, X4=65%. Әрбір жағдай үшін беттік графигі және жылу картасы келтірілген.



7-сурет – Энергия шығынының (N, Вт) X_3 және X_5-ке тәуелділігі

Бұл жерде X_1, X_2, X_4 мәндері бекітілген. 1-жағдай: X_1 = 30 %, X_2 = 5 %, X_4 = 5 %; 2-жағдай: X_1 = 50 %, X_2 = 15 %, X_4 = 35 %; 3-жағдай: X_1 = 70 %, X_2 = 25 %, X_4 = 65 %. Әр жағдай үшін беттік графигі (3D) және жылу картасы көрсетілген. Суреттен көрініп тұрғандай, энергия шығыны айналу жиілігі мен уақыт өскен сайын артады.



8-сурет – Араластыру біркелкілігінің (kh, %) өзгеруі

Бұл суретте де дәл сол бекітілген параметрлер (X_1, X_2, X_4) және екі өзгеретін фактор (X_3 пен X_5) бар. Үш түрлі жағдай келтірілген (1, 2, 3). Графиктерден мынаны байқауға болады: біркелкілік коэффициенті айналу жиілігі мен араластыру уақытының артуымен, әдетте, жоғарылайды.

6, 7 және 8-суреттердегі графиктер (олар (2), (3), (4) регрессия теңдеулері негізінде салынған) бойынша мынадай қорытындылар жасауға болады. Төменде әр факторға жеке-жеке тоқталамын.

1 Сібір самырсынының қылқан жапырақтары (X_1). Бұл фактор меншікті өнімділікке (q) кері әсер етеді (теріс сызықтық мүше бар). Бірақ X_3-пен бірге оң әрекеттеседі. Ал біркелкілік коэффициентіне (kh) ол тіпті күштірек кері әсер етеді (теңдеуде үлкен теріс квадраттық мүше бар). Сондықтан q пен kh-ты көбейту, ал энергия шығынын (N) азайту үшін X_1 мөлшерін барынша азайтқан жөн. Егер X1 қажетті компонент болса, онда онымен оң әрекеттесетін басқа факторларды – мысалы, X_3 (айналу жиілігі) немесе X_2 (кальций тотығы) – реттеу арқылы ымыралы шешім табуға болады.

2 Кальций оксиді (X_2). Бұл фактор энергия шығынын (N) айтарлықтай арттырады. Әсіресе жоғары концентрацияда, квадраттық әсер күшейе түседі. Энергия тұрғысынан бұл тиімсіз. Бірақ оң жағынан қарасақ, X_2 араластыру біркелкілігіне (kh) оң әсер етеді және X_1-мен бірге де kh-ты жақсартады. Сондықтан X_2-ні оңтайландырғанда, біртектілік пен энергия шығынының арасындағы тепе-теңдікті сақтау керек.

3 Айналу жиілігі (X_3) және араластыру уақыты (X_5). Бұл екеуі – жақсы «әмбебап» факторлар. Екеуі де q пен kh-ты арттырады, сонымен қатар олар бір-бірімен оң әрекеттеседі (X_3 – X_5). Жалпы, X_3 пен X_5-ті арттыру процесті жақсартады. Дегенмен, ескеретін жайт: олардың өсуі энергия шығынын (N) да аздап болса да көбейтеді (бірақ X_2-ге қарағанда әлдеқайда аз). Сондықтан рұқсат етілген қуат шегінде жоғары X_3 және X_5 мәндерін пайдалану ұсынылады.

4 Тұздың мөлшері (X_4). Бұл фактор қызықты әсер көрсетеді. Ол меншікті өнімділікті (q) сызықты емес түрде арттырады (квадраттық мүше бар). Бірақ араластыру біркелкілігіне (kh) кері әсер етеді. Ал энергия шығынына (N) - оң әсер етеді. Сонымен қатар, X_4 пен X_5-тің бірлескен әрекеттесуі kh-қа оң әсер етеді,

бірақ q-ға кері әсер етеді. Бұл тұздың процестегі рөлі өте күрделі екенін көрсетеді. Оңтайлы X_4 мәнін табу үшін, әсіресе X_5-пен бірге, қосымша зерттеулер қажет.

5. Уақыт (X5). Бұл фактордың әсері салыстырмалы түрде аз. Ол меншікті өнімділікке (q) және біркелкілікке (kh) шамалы оң әсер етеді.

Жалпы саны отыздан астам эксперимент жүргізілді. Эксперименттер 5 кіру факторына арналған матрица бойынша жасалды. Нәтижесінде компоненттерді араластыру процесінің математикалық моделін құрдық. Бұл модель арқылы келесі көрсеткіштерді есептеуге болады: жаңа араластырғыштың үлестік өнімділігі; энергия шығындары; араластырудың біртектілігі мен тиімділігі.

Ескерту: бұл есептеулер кіріс факторларын түрлендірудің таңдалған интервалдары шегінде ғана дұрыс болады. Модельді құру үшін біз бастапқы факторлардың өзара тәуелділік деректерін жинадық.

Талдау нәтижесінде жұмыс процесін жүргізудің тәжірибелік келісімді ұсынымдары алынды:

1 Кальций тотығының (X_2) құрамын ең төменгі деңгейге (≈ 5%) дейін төмендету - энергия шығындарын айтарлықтай азайтады (Y_2).

2 Сібір самырсынның қылқан жапырақтарын (X_1) төмен немесе орташа деңгейде ұстау (қоспадағы берілген ең жоғары құрамның ≈ 30–40 %) – біркелкілікті бұзбауға мүмкіндік береді. Сібір самырсынның қылқан жапырақтары тым көп мөлшерде болуы (X_1) қоспаны (kh) (Y_3) араластырудың біркелкілігін күрт нашарлатады.

3 Араластырғыш білігінің айналу жылдамдығын (X_3) жоғарғы шекараға дейін арттыру (≈ 55–65 айн/мин) – меншікті өнімділікке (Y_1) және қоспаны араластырудың біркелкілігіне (Y_3) оң әсер етеді.

4 Қоспадағы тұз құрамының артуы (X_4) салмақ есептеуінде (Y_1) меншікті өнімділіктің үлкен өсімін береді, бірақ сақ болу керек: модельде бұл қоспадағы тұздың ең үлкен массасы мен көлеміне байланысты (Y_1) өнімділіктің жоғарылауының өте үлкен мәндерін береді (мүмкін орындалмайтын) – егер технологиялық шектеулер рұқсат етсе, онда X_4 ұлғаюы теориялық тұрғыдан өнімділікті ≈ 60 % дейін арттыруға болады.

5 Араластыру уақыты (X_5) диапазонның жоғарғы бөлігіне дейін (≈ 12–14 мин), жақсы біркелкілікке оң әсер етеді.

Егер басты мақсатымыз энергия шығындарын азайту болса, онда басты рецепт – кальций тотығының (X_2) мөлшерін барынша азайту болып табылады; қалған айнымалылар қажетті біркелкілік пен өнімділікке байланысты таңдалады.

Жоғарыда көрсетілген оңтайландырудың мақсаты – жем-шөп араластырғышының жұмыс процесінің математикалық моделін әзірлеу, онда тұзды жалақ премикстеріне кіретін ингредиенттердің берілген кіріс салмағы мен сандық арақатынасының түрленуінің кең ауқымы жаңа араластырғыш үшін Y_1 ең жоғары меншікті өнімділігін және біркелкілігін қамтамасыз ететін қолжетімді жұмыс режимдерін таңдауға мүмкіндік берер еді, сондай-ақ өнімді алу кезіндегі Y_2 энергия шығыны аз кетеді.

Оңтайландыру тапсырмасының жеңілдетілген математикалық жинағы жалпы түрде келесі модель ретінде болуы мүмкін:

$$x \in D \text{ үшін } q = q \cdot (Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3) \rightarrow optimum \quad (5)$$

Осы үлгі үшін мәндер аумағын сәйкестендіреміз:

$$D: Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow max \quad (6)$$

$$Y_3(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow max \quad (7)$$

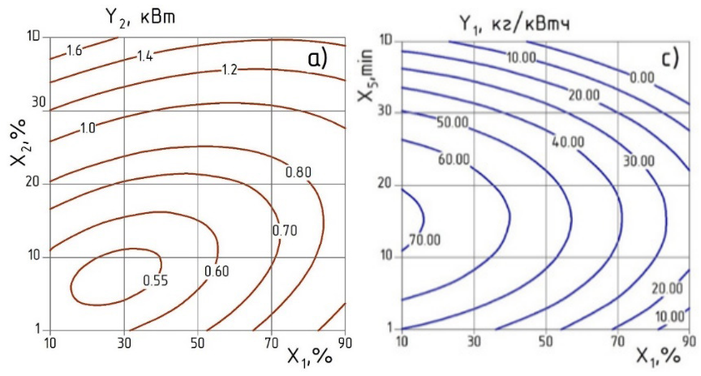
$$Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow min \quad (8)$$

Оңтайландыру нәтижесінде бастапқы кіріс факторлары аралықтарының ұтымды мәндері алынды: X_1= 5,0–7,2 %; X_2= 3,0–6,1 %; X_3 = 46–49 айн/мин; X_4 = 60–80 %; X_5 = 10,5–12,5 мин.

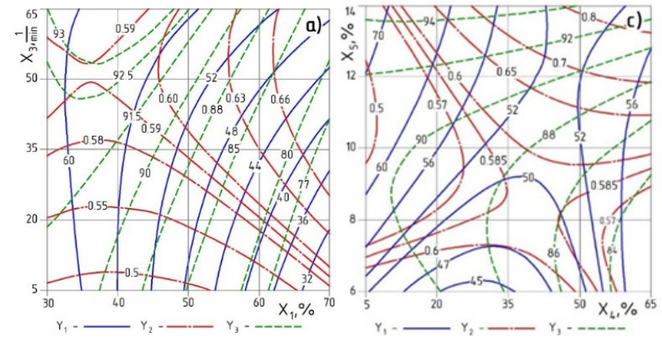
Ұтымды параметрлердің сәйкестігін растау үшін нәтижелері барлық сапа критерийлері үшін 14,1–%-дан аспайтын орташа квадраттық қатемен сенімді аралық көрсеткіштері бойынша елестетілген бірнеше қатар тексеру эксперименттері жүргізілді.

9-суретте ғылыми негіздемеге әлі де қызығушылық танытатын және процесс көрсеткіштерінің зерттелетін саласындағы басқа кіріс факторларының мәндерін олармен салыстыруға және олардың осы саладан тыс шамаларының өзгеруін болжауға мүмкіндік беретін жемшөп қоспаларының жаңа араластырғышының тиісті шығыс көрсеткіштерінің дөңгелектенген нәтижелі желілері орналастырылған.

Осы мақсаттар үшін 10-суреттің номограммалары (а, с) жаңа араластырғыштың шығу параметрлерінің көрсеткіштерін зерттелетін мәндердің шекаралары шегінде табу үшін жасалды.



9-сурет – Әртүрлі факторлардың әсері: а) энергия шығынының (Y_2, кВт) өзгеруі; X_1 – сібір майқарағайының ұсақталған қылқан жапырағының мөлшері (%); X_2 – кальций тотығының болуы (%); б) меншікті өнімділіктің өзгеруі (Y_1, кг/кВт · сағ); X_1 – қылқан жапырағы, %; X_5 – араластыру ұзақтығы, мин



10-сурет – Номограммалар көмегімен факторларды іздеу а) қылқан жапырағы мөлшерінің (X_1, %) араластырғыш білігінің айналым санына тәуелділігі (X_3, айн/мин); с) қылқан жапырағы мөлшерінің (X_1, %) араластыру ұзақтығына тәуелділігі (X_5, мин)

Жоғарыда келтірілген талдаулар мен оңтайландыру нәтижелеріне сүйене отырып, мынадай қорытынды жасауға болады. Жаңа араластырғыштың шығыс параметрлерін қажетті мәндерге келтіруге болады. Ол үшін оларды үш өлшем бойынша түрлендірудің ұтымды аймағынан шығып кетпеу керек. Сонымен бірге, қажет болған жағдайда сәйкесті технологиялық шешімдер қабылдауға болады.

Жалпы математикалық модельді келесі жағдайларда пайдалануға болады:

– жаңа азықтық араластырғыштардың параметрлерін есептеу кезінде;

– араластыру процестерін автоматтандыру үшін;

– шығыс параметрлерін басқару алгоритмдерін әзірлеу кезінде.

Бұл модель жұмыс істеуге жарамды және практикалық есептерді шешуге көмектеседі.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Осы жұмыстарға байланысты зерттеулерді ҚР Ғылым және Жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (AP26102017 – «Өнімділігі жоғары өсімдік қалдықтарын қайта өңдеудің инновациялық технологиясы үшін параметрлерді негіздеу және жабдықтарды әзірлеу» гранты).

Қорытынды

Тұзды жалақ премикс брикеттерін дайындау үшін қоспасының компоненттерін араластыру процесіне қатысты орындалған эксперименттік, талдамалық және конструкторлық зерттеулер мынадай қорытындылар жасауға мүмкіндік береді:

1 Араластырғыштың құрама біліктері жаңартылды. Олар өз конструкциясында шнек, спиральді қауырсын, тұмсық тәрізді қопсытқыштар мен араластырғыш қалақтарды біріктіреді және аралас компоненттердің тұтастығы мен сапасының сақталуына зиянды әсер етпей, әртүрлі шикізат үшін оңтайлы араластыруды қамтамасыз етеді.

2 Экспериментті көп факторлы жоспарлау әдісін қолдану тұздық витаминдендірілген премикс-жалақтарды дайындау үшін қоспа компоненттерін

араластыру процесінің математикалық үлгілерін алуға мүмкіндік берді, солардың көмегімен араластыру процесінің тиімділігін айқындайтын басты факторлар бөлінді және олардың оңтайлы мәндерінің графикалық тәуелділіктері алынды.

3 Теориялық және эксперименттік зерттеулер нәтижесінде араластырғыш біліктерін жаңартудың орындылығы расталды. Жаңа араластырғышта араластыру процесінің кіріс параметрлерінің өзгеруінің диапазонында ең жоғары меншікті өнімділікке және біртектілікке қол жеткізуге мүмкіндік берген тұздық премикс-жалақтар құрамының түпкілікті өнімі анықталды.

4 Дайын өнімнің сапасына кешенді талдау жүргізілді. Қоспа ингредиенттерін араластыру процесіне енгізілетін витаминдер мен элементтердің гигроскопиялық және пластикалық қасиеттерінің өзгеруі және құрамы зерттелді.

5 Компоненттердің оңтайлы құрамы таңдалды, сондай-ақ тұзды премикс-жалақтар өндіру үшін рецепт жасалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Doudkin, M., Kim, A., Vavilov, A., Guryanov, G., Yakovlev, V., Varavin, Ye.** Justification Of The Efficiency Of Modernizing A Grain Extruder For The Production Of Feed Additives Using Crop Residues. Engineering, Technology & Applied Science Research. – Vol. 15. – № 5: October, 2025.

2 **Doudkin, M., Kim, A., Yakovlev, I., Vasilkov, D., Asangaliev, Ye., Moldakhanov, B.** Analysis of experimental studies on the efficiency of a new mixer for molding mixtures components for the production of premix lick blocks and the final product effect. Production Engineering Archives. – 2025. – 31(1). – P. 81–90.

3 **Salem Ali Karrab and Mohamed Ali Ballem.** Failure Analysis and Repair of a Broken Extruder Shaft: A Case Study. EJERS, European Journal of Engineering Research and Science. – Vol. 5. – № 1. – P. 107–111, January 2020. – http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.1.1738

4 **Lytkina, L. I., Shevtsov, A. A., Shentsova, E. S., Apalikhina, O. A.** The probabilistic model of the process mixing of animal feed ingredients into a continuous mixer-reactor. Proceedings of VSUET. – № 2. – 2016. – P. 16–21.

5 **Lytkina, L. I., Shevcov, A. A., Pereverzeva, S. A., Sazonova, S. I.** Mixer with Z-image working body for mixing high-typical components // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 5. P. 65–68.

6 **Shevtsov, A. A., Drannikov, A. V., Shentsova, E. S., Lytkina, L. I.** Pereverzeva S.A. Method for the production of feed briquettes based on molasses and a line for its implementation. Patent RF, № 2630453. – 2017.

7 **Hedegaard, C. J., Strube, M. L., Hansen, M. B., Lindved, B. K. et al.** Natural Pig Plasma Immunoglobulins Have Anti-Bacterial Effects: Potential for Use as Feed Supplement for Treatment of Intestinal Infections in Pigs // PLoS ONE. – 2016. – Vol. 11. – № 1. – https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147373

8 **Mahfuz, S., Piao, X. S.** Application of Moringa (Moringa oleifera) as Natural Feed Supplement in Poultry Diets // Animals. – 2019. – Vol. 9. – № 7. – P. 431. – https://doi.org/10.3390/ani9070431

9 **Cai M., Mu L., Wang Z.-l., Liu J.-y.** Assessment of mulberry leaf as a potential feed supplement for animal feeding in P. R. China // Asian-Australas J Anim Sci. – 2019. – Vol. 32. – № 8. – P. 1145–1152.

10 **Shilong Li, Jun Lu.** Finite Element Analysis of Worm Auger in Meat Grinder. Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 945–949. – P. 162–165. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.162

03.04.26 ж. баспаға түсті.
06.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
18.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Б. А. Молдаханов[1], М. В. Дудкин[2], Т. Лешневский[3],
В. С. Яковлев[4], А. Ж. Байгунусов[5]
[1,2]ООО «Европлюс Восток», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Вроцлавский университет науки и техники, Польша, г. Вроцлав;
[4,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 03.04.26.
Поступило с исправлениями 06.04.26.
Принято в печать 18.05.26.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СМЕСИТЕЛЯ КОРМОВЫХ СМЕСЕЙ С ОТХОДАМИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Производство кормовых или солевых брикетов имеет множество нормативных ограничений и высоких требований к качеству и состоянию конечной продукции. Они должны быть прочными и целыми при транспортировании и хранении во влажном помещении. При этом они должны сохранять все вкусовые качества и быть привлекательными для питания животных. Соответственно, это требование должно обеспечиваться выбором параметров всего комплекса рабочего оборудования, составляющего технологическую линию производства. Например, брикеты соли, в которые входят различные смесители, перед прессованием которых обеспечивается равномерное перемешивание и равномерность кормовых добавок. Формуемая смесь содержит несколько компонентов, концентрация или объемный состав и количество которых могут существенно повлиять на параметры рабочего процесса смесителя, а затем прессового оборудования и состояние конечного продукта - на кормовые или солевые брикеты. Приведены результаты проектирования нового вала смесителя, позволяющие обновить весь рабочий процесс смесителя и равномерно смешивать его до однородности кормовой смеси даже при изменении параметров всех компонентов. На основе

экспериментального опыта были сделаны уравнения регрессии, адекватно характеризующие рабочий процесс в изменении входящих факторов после статистической обработки экспериментальных данных и указаны пределы изменения исследуемых факторов. Выбран состав ингредиентов смеси, позволяющий достичь наиболее эффективных показателей вышеуказанных целей.

Ключевые слова: смеситель для корма, шарнирный вал, перемешивание, витамины, влажность смеси, пресс, поваренная соль.

B. A. Moldakhanov[1], M. V. Doudkin[2], T. Leśniewski[3],
V. S. Yakovlev[4], A. Zh. Baigunussov[5]
[1,2]LLP «Europlyus Vostok», Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Wrocław University of Science and Technology, Poland, Wrocław;
[4,5]East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 03.04.26.
Received in revised form 06.04.26.
Accepted for publication 18.05.26.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFICIENCY OF THE WORKING PROCESS OF THE MIXER OF FEED MIXTURES WITH CROP WASTE

The production of feed or salt briquettes has many regulatory limitations and high requirements for the quality and condition of the final product. They must be strong and intact when transported and stored in a wet room. At the same time, they must maintain all taste and be attractive for animal nutrition. Accordingly, this requirement must be ensured by selecting the parameters of the entire complex of working equipment that makes up the production line. For example, salt briquettes, which include various mixers, before pressing of which uniform mixing and uniformity of feed additives is ensured. The moldable mixture contains several components, the concentration or bulk composition and amount of which can significantly affect the working process parameters of the mixer, and then the press equipment and the state of the final product - on feed or salt briquettes. The results of designing a new mixer shaft are presented, which make it possible to update the entire working process of the mixer and evenly mix it until the feed mixture is homogeneous even when the parameters of all components change. Based on experimental experience, regression equations were made that adequately characterize the work process in changing incoming factors after statistical processing of experimental data, and the limits of changing the studied factors were indicated. The composition of the ingredients of the mixture is selected to achieve the most effective indicators of the above goals.

Keywords: feed mixer, articulated shaft, mixing, vitamins, moisture content of the mixture, press, table salt.

SRSTI 55.47.03
https://doi.org/10.48081/BGQF2225

R. B. Mukanov[1], H. Madeniet[2], A. Oksenenko[3], G. Tokin[4], Ye. Vitulyova[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-0513
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5736-8661
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0216-9988
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5324-9973
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6075-4870
*e-mail: r.mukanov@satbayev.university

CFD ANALYSIS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

In this paper, a numerical study of the aerodynamic characteristics of an aircraft-type unmanned aerial vehicle using computational fluid dynamics (CFD) methods is performed. The geometric model of the UAV was developed taking into account the requirements for low-speed aircraft. The calculations were performed in the SolidWorks Flow Simulation 2025 software environment in the formulation of the external flow.

During the simulation, velocity fields, static pressure distribution, and flow trajectories were obtained. Analysis of the results showed the presence of zones of local acceleration of the flow above the wing, as well as braking zones in the tail section of the vehicle. Special attention is paid to the analysis of pressure distribution, which made it possible to identify aerodynamically unfavorable sections of the structure.

The results obtained show the operability of the chosen aerodynamic layout and the need for further optimization of the tail section, as well as calculations at various speeds and angles of attack.

Keywords: unmanned aerial vehicle; UAV aerodynamics; numerical simulation; CFD analysis; SolidWorks Flow Simulation; external airflow.

Introduction

Currently, unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in various fields, including territory monitoring, geodesy, cargo transportation, and engineering research [1; 2]. One of the key factors determining the effectiveness of a UAV is its aerodynamic characteristics, which affect the lift, drag, and energy efficiency of flight [3;4;5;6].

The relevance of the study is due to the growing interest in the development of low-speed UAVs with increased aerodynamic quality. Despite a significant amount of work in the field of aircraft aerodynamics, the issues of optimizing the geometry of small UAVs, especially the tail section, remain insufficiently studied. In particular, there are no universal solutions that minimize resistance while maintaining the stability of the device [7;8;9;10;12].

Modern computational fluid dynamics (CFD) methods allow for detailed flow analysis and identification of structural problem areas at early design stages. The use

of CFD is especially important for UAVs operating in the low Reynolds number range, where aerodynamics differ significantly from classical modes. [13;14;15;16;17;18;19]

The purpose of this work is to numerically analyze the aerodynamic characteristics of UAVs and identify design features that affect drag and flow efficiency.

Materials and methods

The geometric model of the UAV was developed in a CAD environment and is an aircraft-type device with an integrated wing. (Fig. 1).

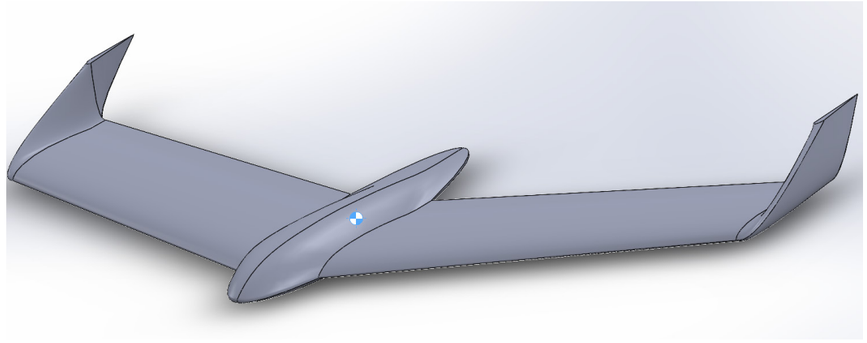


Figure 1 – 3D UAV model

The design includes a central fuselage and wingtips with a span of 2.4 m. forming a spatial aerodynamic layout (Fig. 2).

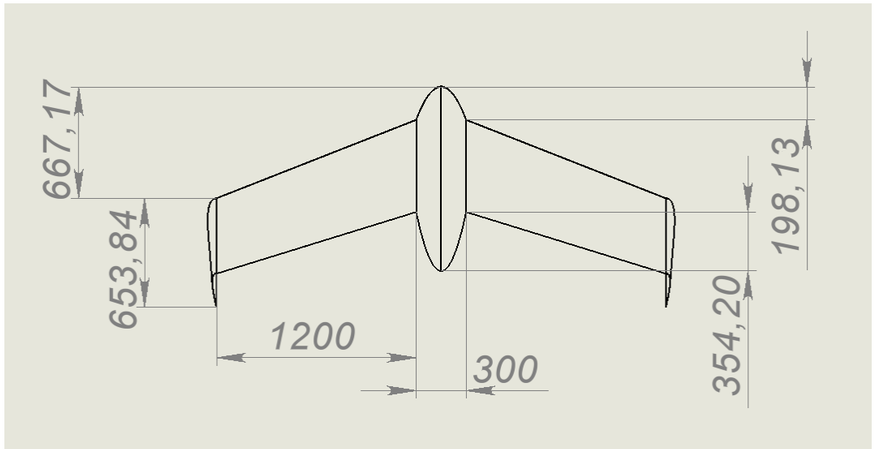


Figure 1 – Geometric parameters of the UAV

The SolidWorks Flow Simulation 2025 program was used for numerical simulation. The calculation was performed in the formulation of an external flow. Air under normal atmospheric conditions was considered as the working medium (Fig. 3).

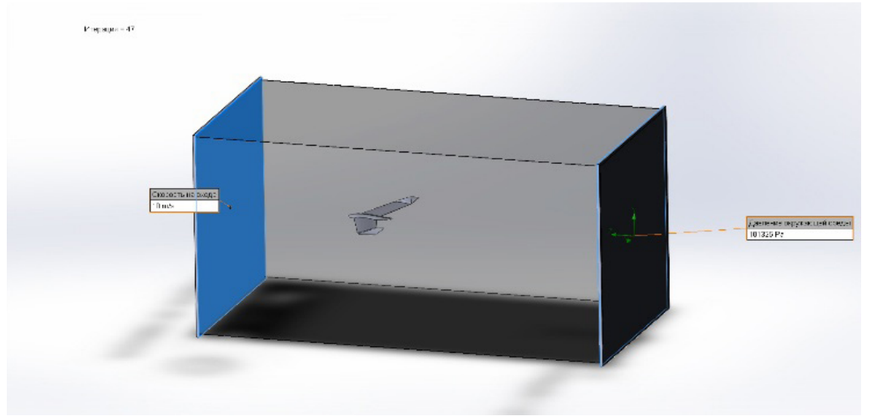


Figure 3 – The computational domain
of CFD modeling of the external flow of UAVs

The calculated area was a rectangular volume measuring 10000 × 5000 × 5000 mm, which corresponds to the simulation of wind tunnel conditions. A uniform flow velocity of 10 m/s was set at the inlet boundary, and free flow conditions were set at the outlet (Fig. 4).

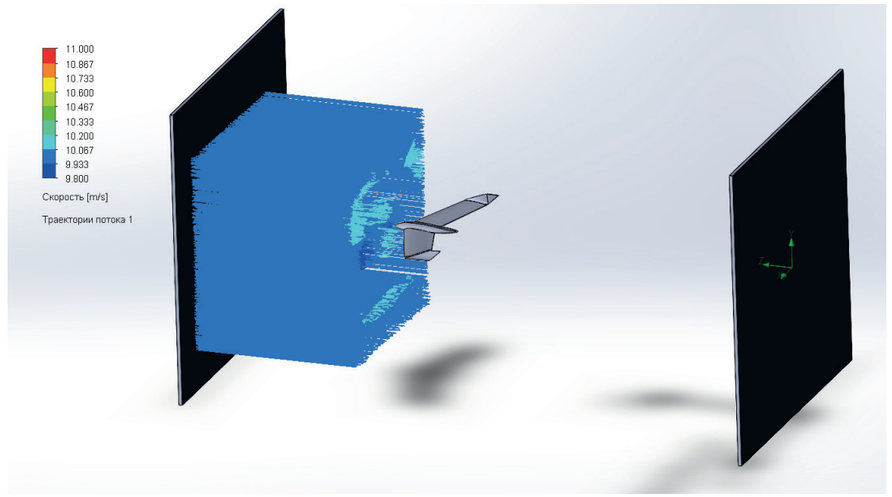


Figure 4 – Flow trajectories and velocity distribution
in the UAV computational domain

During CFD modeling, the velocity field, pressure distribution over the UAV surface, flow trajectories in the computational domain, as well as the integral aerodynamic force

used as one of the convergence criteria for the numerical solution were analyzed. The calculation was performed until a stable solution was reached, at which the change in integral parameters became minimal.

Results and discussion

The results of CFD modeling showed that at an incoming flow velocity of 10 m/s, a characteristic redistribution of velocities is observed. In the wing area, the flow accelerates to values of the order of 11 m/s, while in the tail and in the wake, the velocity decreases to 9.8 m/s (Fig. 5).

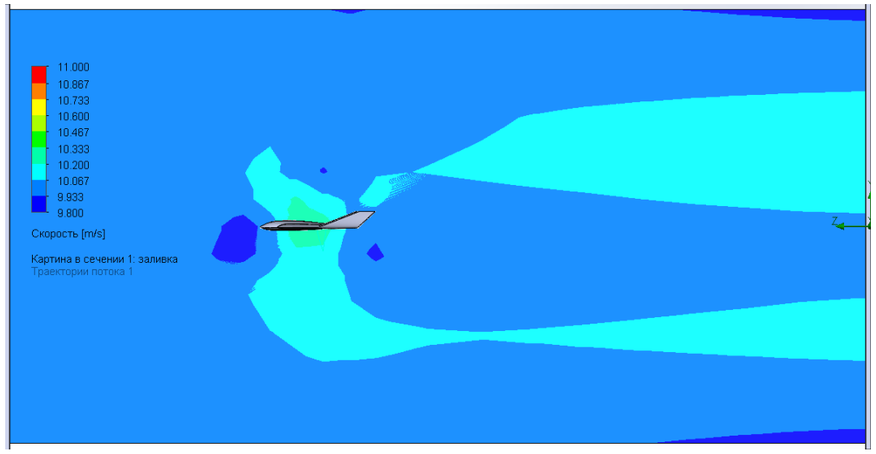


Figure 5 – Distribution of the flow velocity
in the central longitudinal section of the UAV

This distribution corresponds to the classical laws of aerodynamics, according to which acceleration of the flow is accompanied by a decrease in pressure, and deceleration by an increase. The acceleration of the flow over the upper surface of the wing indicates the formation of lift.

Vortex structures are observed in the area of the wing tips due to the redistribution of pressure and the formation of inductive resistance (Fig. 6).

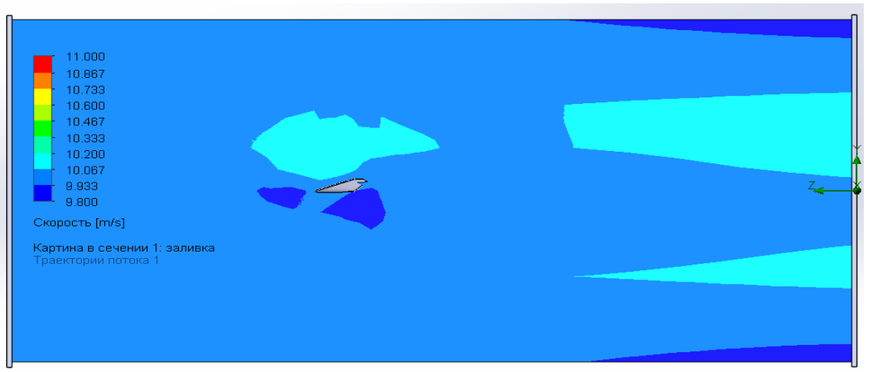


Figure 6 – Velocity field in the area of wing tips
with the formation of vortex structures

An analysis of the pressure distribution showed that the flow runs into the UAV from left to right, while a zone of moderate pressure increase forms in the front part. On the surface of the wing, there is a characteristic pressure drop between the upper and lower surfaces, providing the formation of lift (Fig. 7).

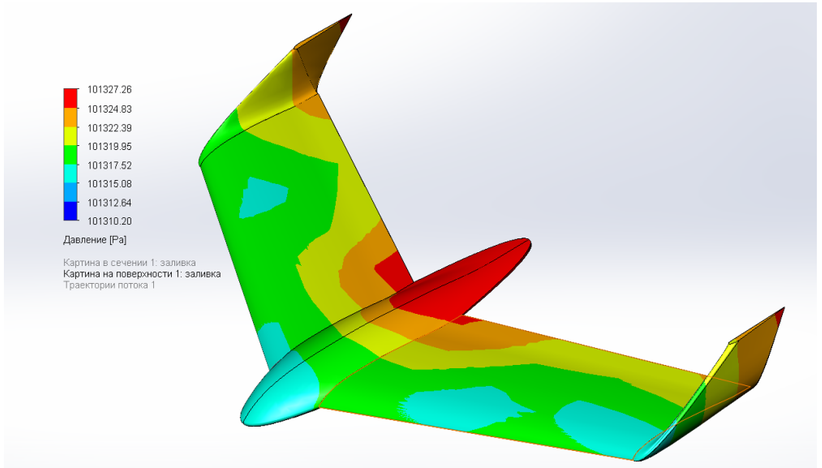


Figure 7 – Static pressure distribution over the UAV surface

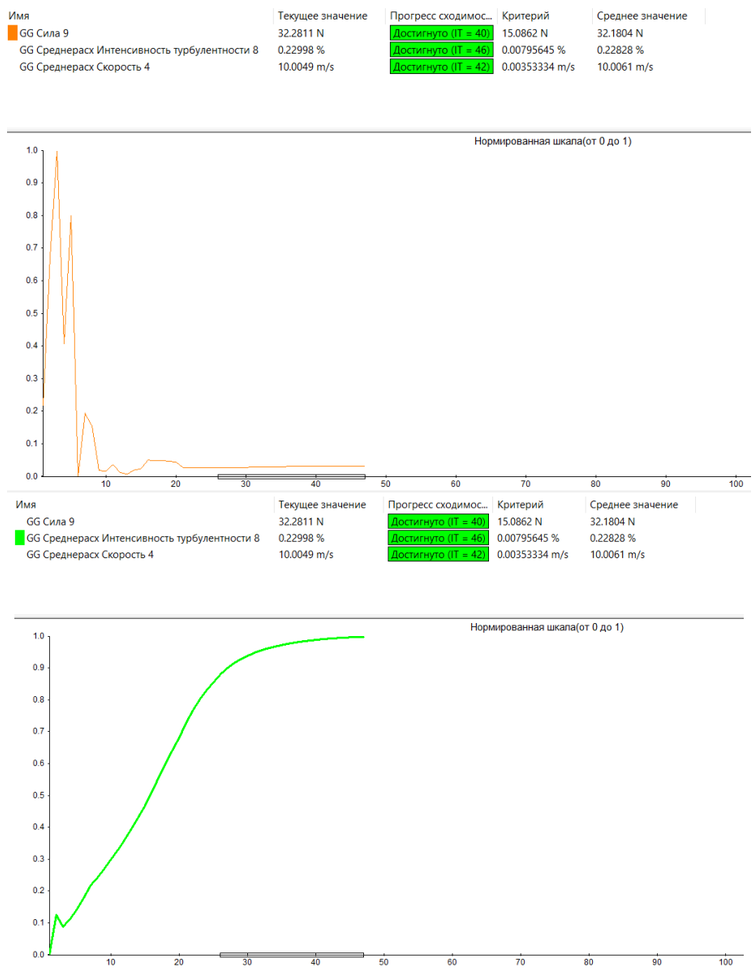
A local pressure zone has been identified in the central part of the fuselage, due to the geometry of the structure and leading to additional aerodynamic losses.

There is an insufficiently smooth pressure recovery in the tail section of the device, accompanied by the formation of high-pressure zones. This effect indicates the presence of shape resistance and the need to optimize the geometry of the tail section.

In the area of the wing tips, irregularities in the pressure distribution associated with the formation of vortex structures and inductive resistance are recorded.

A special feature is the presence of a high-pressure zone in the tail section of the device. This effect indicates an ineffective pressure recovery and indicates the presence of additional aerodynamic losses associated with mold resistance.

Figure 8 shows the convergence graphs of the controlled parameters of the CFD calculation of the UAV. The integral force, average flow velocity, and average turbulence intensity were used as convergence criteria. At the initial stage of the calculation, fluctuations in the parameters are observed due to the formation of the flow structure around the model. As the number of iterations increases, the oscillation amplitude decreases, after which the parameters reach stable values.



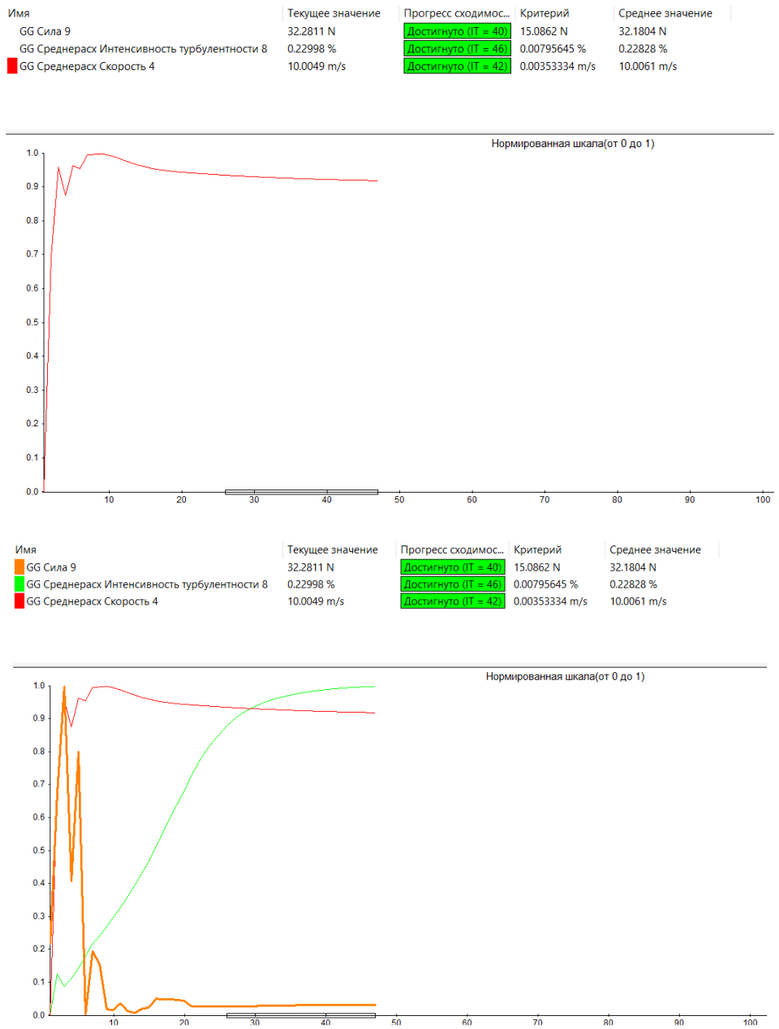


Figure 8 – Convergence of controlled parameters of CFD calculation of UAVs

The average flow velocity was 10.0061 m/s, which almost coincides with the set speed of 10 m/s. The integral force stabilized at 32.18 N, and the average turbulence intensity was 0.22828%. The achievement of convergence criteria for all controlled parameters confirms the stability of the numerical solution and the possibility of using the results obtained for further analysis of the aerodynamic characteristics of the UAV.

Financing information

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № BR28713375 «Multipurpose Robotic UAV Platform for Remote Monitoring (AeroScope)»)

Conclusions

The CFD analysis revealed the main features of the flow around the developed UAV model at an incoming flow velocity of 10 m/s. It is established that a local acceleration of the flow occurs above the bearing surface to 11 m/s, while in the tail and wake regions the velocity decreases to 9.8 m/s, which corresponds to the nature of the external flow of a low-speed aircraft.

Vortex structures associated with the formation of inductive resistance have been identified in the area of the wing tips. The distribution of static pressure showed the presence of local areas of increased pressure, especially in the tail section of the device, which indicates additional aerodynamic losses due to the shape resistance.

The convergence graphs confirmed the stability of the numerical solution: the integral force stabilized at about 32.18 N, the average flow velocity was 10.006 m/s, and the average turbulence intensity was about 0.228 %. The results obtained show the operability of the chosen aerodynamic layout and the need for further optimization of the tail section, as well as calculations at various speeds and angles of attack.

REFERENCES

1 **Галата, К. О., Никонов, Н. Г., Папилина, А. Е.** Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии и картографии // Вестник науки. – 2025. – № 1(82). – [Electronic resource]. – https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-bpla-v-geodezii-i-kartografii (дата обращения: 28.04.2026).

2 **Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M.** Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. IEEE Access. – 2019. – 7. – P. 48572–48634. – Article 8682048. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530

3 **Исмаилов, К. К.** Определение аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата самолетного типа аналитическими методами // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 78. –С. 112–124.

4 **Yuankun Liao, Kai Cheng, Wuhe Sun, Yan Zhao, Xiaojie Jia, Wanrong Qi.** Computational fluid dynamics analysis of aerodynamic characteristics in long-endurance unmanned aerial vehicles, Heliyon. – Volume 10. – Issue 19. – 2024. – e38804. – ISSN 2405–8440. – https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38804.

5 **Mueller, T. J., DeLaurier, J. D.** Aerodynamics of Small Vehicles // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2003. – Vol. 35. – P. 89–111. – https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161102.

6 **Orozco, C., Vásquez, S., Caratt, J., De Armas, N., Guarín, A.** CFD-Based Study of Aerodynamic Performance in UAVs under Adverse Pressure Gradient Conditions // Procedia Computer Science. – 2025. – Vol. 257. – P. 1213–1220. – https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.162.

7 **Campos Rodriguez, V. A., Su,, Y.** Preliminary Design and Performance-Stability Analysis of a Fixed-Wing UAV Using XFLR5 // Journal of Aircraft and Spacecraft Technology. – 2023. – Vol. 7. – № 1. – P. 8–16. – https://doi.org/10.3844/jastsp.2023.8.16.

8 **Barroso Barderas, E., Bardera Mora, R., Rodriguez-Sevillano, Á. A., Matías García, J. C.** Numerical Analysis of Bioinspired Tails in a Fixed-Wing Micro Air Vehicle // Aerospace. – 2023. – Vol. 10. – № 9. – Article 793. – https://doi.org/10.3390/aerospace10090793.

9 **Harith, A., Sahwee, Z., Mohd Kamal, N. L., Norhashim, N., Abdul Hamid, S., Ahmad Shah, S., Ismail, N.** Aerodynamic Design Optimisation of UAV Fuselage to Minimise Drag // Karya Journal of Aerospace and Avionics System. – 2025. – Vol. 2. – № 1. – P. 11–21. https://doi.org/10.37934/kjaas.2.1.1121.

10 **Öz, Y., Ünal, N., Kök, E., Budak, C., Ünal, E. A., Yildiz, M.** Comparative aerodynamic analysis of four tail configurations in unmanned aerial vehicles using computational fluid dynamics // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 2026. – Vol. 98. – № 3. – P. 357–370. – https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2025-0123.

11 **Dinh, A. B., Ngo, K. H., Nguyen, N. V.** An efficient low-speed airfoil design optimization process using multi-fidelity analysis for UAV flying wing // Science and Technology Development Journal. – 2016. – Vol. 19. – № K5. – P. 43–52. https://doi.org/10.32508/stdj.v19i3.519.

12 **Lesalli, P. V.** Preliminary Design and Static Stability Analysis of V-Tail Small Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle Purposed for Racing Plane Pilots and Anti-drone Training Platform Using XFLR-5 // Advances in Engineering Research. – 2025. – Vol. 258. – P. 75–87. – https://doi.org/10.2991/978-94-6463-668-0_10.

13 **Giacomini, E., Westerberg, L. G.** CFD Analysis of Transition Models for Low-Reynolds Number Aerodynamics // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Article 10299. https://doi.org/10.3390/app151810299.

14 **Kapoulas, I. K., Statharas, J. C., Hatziefremidis, A., Baldoukas, A. K.** Fast Airfoil Selection Methodology for Small Unmanned Aerial Vehicles // Applied Sciences. 2022. – Vol. 12. – Article 9328. – https://doi.org/10.3390/app12189328.

15 **Bardera, R., Rodríguez-Sevillano, Á. A., Barroso-Barderas, E., Matías-García, J. C.** CFD study of the effect of leading-edge tubercles on the aerodynamic characteristics of a small UAV based on Eppler 186 airfoils // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 23. – Article 102639. – https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102639.

16 **Malik, K., Asrar, W., Sulaeman, E.** Low Reynolds Number Numerical Simulation of the Aerodynamic Coefficients of a 3D Wing // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. – 2018. – Vol. 5. – № 1. – Article 8. – https://doi.org/10.15394/ijaaa.2018.1209.

17 **Ebrahimi, M. J., Pasandidehfard, M., Esmaeili, A., Moghimi, Esfandabadi, M. H.** Optimization of Aerodynamic Design of a Winged UAV Through Genetic Algorithms and Large Eddy Simulation // International Journal of Aerospace Engineering. – 2024. – Article ID 2698950. – https://doi.org/10.1155/ijae/2698950.

18 **Lian, Y., Shyy, W.** Laminar-Turbulent Transition of a Low Reynolds Number Rigid or Flexible Airfoil // AIAA Journal. – 2007. – Vol. 45. – № 7. – P. 1501–1513. – https://doi.org/10.2514/1.25812.

REFERENCES

1 **Galata, K. O., Nikonov, N. G., Papilina, A. E.** Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov (BPLA) v geodezii i kartografii [Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Geodesy and Cartography] // Vestnik nauki. – 2025. – № 1(82). [Electronic resource]. – https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-bpla-v-geodezii-i-kartografii (access date 28.04.2026).

2 **Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M.** Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. IEEE Access. – 2019. – 7. – P. 48572–48634. – Article 8682048. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530

3 **Ismailov, K. K.** Opredelenie aerodinamicheskih harakteristik bespilotnogo letatel'nogo apparata samoletnogo tipa analiticheskimi metodami [Determination of Aerodynamic Characteristics of a Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle Using Analytical Methods] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. –2022. – № 78. – P. 112–124.

4 **Yuankun Liao, Kai Cheng, Wuhe Sun, Yan Zhao, Xiaojie Jia, Wanrong Qi.** Computational fluid dynamics analysis of aerodynamic characteristics in long-endurance unmanned aerial vehicles, Heliyon. – Volume 10. – Issue 19. – 2024. – e38804. – ISSN 2405–8440. – https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38804.

5 **Mueller, T. J., DeLaurier, J. D.** Aerodynamics of Small Vehicles // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2003. – Vol. 35. – P. 89–111. – https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161102.

6 **Orozco, C., Vásquez, S., Caratt, J., De Armas, N., Guarín, A.** CFD-Based Study of Aerodynamic Performance in UAVs under Adverse Pressure Gradient Conditions // Procedia Computer Science. – 2025. – Vol. 257. – P. 1213–1220. – https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.162.

7 **Campos Rodriguez, V. A., Su,, Y.** Preliminary Design and Performance-Stability Analysis of a Fixed-Wing UAV Using XFLR5 // Journal of Aircraft and Spacecraft Technology. – 2023. – Vol. 7. – № 1. – P. 8–16. – https://doi.org/10.3844/jastsp.2023.8.16.

8 **Barroso Barderas, E., Bardera Mora, R., Rodriguez-Sevillano, Á. A., Matías García, J. C.** Numerical Analysis of Bioinspired Tails in a Fixed-Wing Micro Air Vehicle // Aerospace. – 2023. – Vol. 10. – № 9. – Article 793. – https://doi.org/10.3390/aerospace10090793.

9 **Harith, A., Sahwee, Z., Mohd Kamal, N. L., Norhashim, N., Abdul Hamid, S., Ahmad Shah, S., Ismail, N.** Aerodynamic Design Optimisation of UAV Fuselage to Minimise Drag // Karya Journal of Aerospace and Avionics System. – 2025. – Vol. 2. – № 1. – P. 11–21. https://doi.org/10.37934/kjaas.2.1.1121.

10 **Öz, Y., Ünal, N., Kök, E., Budak, C., Ünal, E. A., Yildiz, M.** Comparative aerodynamic analysis of four tail configurations in unmanned aerial vehicles using computational fluid dynamics // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 2026. – Vol. 98. – № 3. – P. 357–370. – https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2025-0123.

11 **Dinh, A. B., Ngo, K. H., Nguyen, N. V.** An efficient low-speed airfoil design optimization process using multi-fidelity analysis for UAV flying wing // Science and Technology Development Journal. – 2016. – Vol. 19. – № K5. – P. 43–52. https://doi.org/10.32508/stdj.v19i3.519.

12 **Lesalli, P. V.** Preliminary Design and Static Stability Analysis of V-Tail Small Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle Purposed for Racing Plane Pilots and Anti-drone Training Platform Using XFLR-5 // Advances in Engineering Research. – 2025. – Vol. 258. – P. 75–87. – https://doi.org/10.2991/978-94-6463-668-0_10.

13 **Giacomini, E., Westerberg, L. G.** CFD Analysis of Transition Models for Low-Reynolds Number Aerodynamics // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Article 10299. https://doi.org/10.3390/app151810299.

14 **Kapoulas, I. K., Statharas, J. C., Hatziefremidis, A., Baldoukas, A. K.** Fast Airfoil Selection Methodology for Small Unmanned Aerial Vehicles // Applied Sciences. 2022. – Vol. 12. – Article 9328. – https://doi.org/10.3390/app12189328.

15 **Bardera, R., Rodríguez-Sevillano, Á. A., Barroso-Barderas, E., Matías-García, J. C.** CFD study of the effect of leading-edge tubercles on the aerodynamic characteristics of a small UAV based on Eppler 186 airfoils // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 23. – Article 102639. – https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102639.

16 **Malik, K., Asrar, W., Sulaeman, E.** Low Reynolds Number Numerical Simulation of the Aerodynamic Coefficients of a 3D Wing // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. – 2018. – Vol. 5. – № 1. – Article 8. – https://doi.org/10.15394/ijaaa.2018.1209.

17 **Ebrahimi, M. J., Pasandidehfard, M., Esmaeili, A., Moghimi, Esfandabadi, M. H.** Optimization of Aerodynamic Design of a Winged UAV Through Genetic Algorithms and Large Eddy Simulation // International Journal of Aerospace Engineering. – 2024. – Article ID 2698950. – https://doi.org/10.1155/ijae/2698950.

18 **Lian, Y., Shyy, W.** Laminar-Turbulent Transition of a Low Reynolds Number Rigid or Flexible Airfoil // AIAA Journal. – 2007. – Vol. 45. – № 7. – P. 1501–1513. – https://doi.org/10.2514/1.25812.

Received 06.05.26.
Received in revised form 18.05.26.
Accepted for publication 18.05.26.

***Р. Б. Муканов[1], Қ. Мәдениет[2], А. Оксененко[3],**
Г. Токип[4], Е. Витулёва[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
06.05.26 ж. баспаға түсті.
18.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
18.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТЫНЫҢ АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН CFD ТАЛДАУ

Бұл мақалада есептеу гидродинамикасы (CFD) әдістерін қолдана отырып, ұшақ типіндегі ұшқышсыз ұшу аппаратының аэродинамикалық сипаттамаларына сандық зерттеу жүргізілді. ҰҰА-ның геометриялық моделі төмен жылдамдықты ұшу аппараттарына қойылатын талаптарды ескере отырып әзірленді. Есептеулер SolidWorks Flow Simulation 2025 бағдарламалық ортасында сыртқы ағынмен ағу есебінің қойылымында орындалды.

Модельдеу барысында жылдамдық өрістері, статикалық қысымның таралуы және ағын траекториялары алынды. Нәтижелерді талдау қанат үстінде ағынның жергілікті үдеу аймақтарының, сондай-ақ аппараттың құйрық бөлігінде тежелу аймақтарының бар екенін көрсетті. Қысымның таралуын талдауға ерекше назар аударылды, бұл конструкцияның аэродинамикалық тұрғыдан қолайсыз бөліктерін анықтауға мүмкіндік берді.

Алынған нәтижелер таңдалған аэродинамикалық сұлбаның жұмысқа қабілеттілігін және құйрық бөлігін одан әрі оңтайландыру қажеттілігін, сондай-ақ әртүрлі жылдамдықтар мен шабуыл бұрыштары кезінде қосымша есептеулер жүргізу қажеттігін көрсетеді.

Кілтті сөздер: ұшқышсыз ұшу аппараты; ҰҰА аэродинамикасы; сандық модельдеу; CFD-талдау; SolidWorks Flow Simulation; сыртқы ағынмен ағу.

***Р. Б. Муканов[1], Қ. Мәдениет[2], А. Оксененко[3],**
Г. Токип[4], Е. Витулёва[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Поступило в редакцию 06.05.25.
Поступило с исправлениями 18.05.26.
Принято в печать 18.05.26.

CFD-АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В данной статье выполнено численное исследование аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата самолётного типа с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). Геометрическая модель БПЛА была разработана с учётом требований, предъявляемых к малоскоростным летательным аппаратам. Расчёты

выполнены в программной среде SolidWorks Flow Simulation 2025 в постановке задачи внешнего обтекания.

В ходе моделирования были получены поля скоростей, распределение статического давления и траектории потока. Анализ результатов показал наличие зон локального ускорения потока над крылом, а также зон торможения в хвостовой части аппарата. Особое внимание уделено анализу распределения давления, что позволило выявить аэродинамически неблагоприятные участки конструкции.

Полученные результаты показывают работоспособность выбранной аэродинамической компоновки и необходимость дальнейшей оптимизации хвостовой части, а также проведения расчётов при различных скоростях и углах атаки.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; аэродинамика БПЛА; численное моделирование; CFDанализ; SolidWorks Flow Simulation; внешнее обтекание.

МРНТИ 55.22.29

https://doi.org/10.48081/BGQF2226

Б. К. Рахадилов[1], А. Б. Нәбиолдина[2],
****Е. А. Алтаев[3], Г. Т. Тлеубергенова[4]***
[1]ТОО «PlasmaScience» Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.;
[2,3,4]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.;
[3]Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5990-7123
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5581-2194
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3160-1107
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4064-5368
*e-mail: yernar6ai@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

В работе представлены результаты комплексного исследования износо- и коррозионностойких оксидных покрытий на основе Al_2O_3, полученных методом воздушно-плазменного напыления, предназначенных для повышения эксплуатационного ресурса деталей насосного оборудования, работающего в агрессивных и абразивных средах. В качестве материала подложки использовалась аустенитная нержавеющая сталь 10Х18Н9, широко применяемая в химическом и энергетическом машиностроении. Основное внимание уделено изучению влияния тока плазменной дуги в диапазоне 300–500 А на формирование микроструктуры, фазовый состав, пористость, а также механические, трибологические и адгезионные характеристики напылённых покрытий. Показано, что увеличение тока напыления способствует более полному расплавлению частиц порошка Al_2O_3, улучшению их сплющивания при ударе о поверхность подложки и формированию более плотной и однородной структуры покрытия с пониженной пористостью. Установлено, что с ростом тока плазменной дуги наблюдается увеличение адгезионной прочности и микротвёрдости покрытий, а также снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания в условиях абразивного воздействия. Наиболее благоприятное сочетание высокой износостойкости, адгезионной прочности и структурной стабильности покрытий достигается при токе напыления 500 А. Коррозионные испытания в агрессивных средах показали, что нанесение покрытий Al_2O_3 не оказывает существенного негативного влияния на коррозионное поведение стали 10Х18Н9 и не снижает её коррозионной стойкости. Полученные результаты подтверждают перспективность применения воздушно-плазменных оксидных покрытий на основе Al_2O_3 для защиты и упрочнения деталей насосного оборудования, эксплуатируемых в условиях интенсивного износа и коррозионного воздействия.

Ключевые слова: воздушно-плазменное напыление, покрытие Al_2O_3, износостойкие покрытия, насосное оборудование, трибология, адгезия.

Введение

Центробежные насосы широко применяются в различных технологических процессах на горно-металлургических и химических предприятиях для перекачки холодной и горячей воды, сточных вод, пульп, шламов, а также агрессивных и вязких жидкостей [1]. Вместе с тем одним из основных недостатков центробежных насосов является их высокая чувствительность к наличию твёрдых абразивных частиц в перекачиваемой среде. При эксплуатации в условиях перекачки пульп и шламов, содержащих песок и другие твёрдые включения, происходит интенсивный абразивно-эрозионный износ проточной части насоса. Наиболее подвержены разрушению рабочие колёса, улитки и крышки насосов, что приводит к снижению их гидравлических характеристик и сокращению межремонтного ресурса [2].

На горно-металлургических предприятиях детали насосного оборудования часто изготавливаются из аустенитной нержавеющей стали 10Х18Н9, обладающей высокой коррозионной стойкостью в нейтральных и слабоагрессивных средах [3]. Однако данный материал характеризуется сравнительно низкой сопротивляемостью абразивному и эрозионному износу. При перекачке пульповых, отработанных и химически активных растворов происходит сокращение срока службы насосов, сопровождающееся образованием задиров, трещин, эрозионных раковин и интенсивным износом рабочих поверхностей [4]. Эксплуатация шламовых насосов в агрессивных и абразивных средах сопровождается также рядом дополнительных проблем, включая кавитационные повреждения, коррозию, засорение проточной части, рост вибрации и шума, снижение коэффициента полезного действия и нарушение герметичности уплотнений. Все перечисленные факторы приводят к увеличению эксплуатационных затрат и повышенному риску аварийных отказов оборудования [5].

Одним из наиболее эффективных способов повышения долговечности деталей насосного оборудования является применение защитных износостойких покрытий. Такие покрытия позволяют существенно снизить интенсивность абразивного и коррозионного износа, повысить устойчивость к эрозионному воздействию и увеличить ресурс работы насосов без капитального ремонта [6]. Особый интерес представляют керамические оксидные покрытия на основе оксида алюминия (Al_2O_3), обладающие высокой твёрдостью, химической инертностью и устойчивостью к воздействию абразивных частиц [7; 8; 9].

Метод воздушно-плазменного напыления (ВПН, англ. Air Plasma Spraying, APS) – это один из перспективных методов газотермического нанесения покрытий, который активно развивается и применяются во многих отраслях техники и материаловедения. Этот метод является перспективной технологией формирования керамических покрытий, позволяющей получать слои с заданной толщиной, фазовым составом и микроструктурой, адаптированными к конкретным условиям эксплуатации. Регулирование параметров напыления открывает возможности

целенаправленного управления физико-механическими, трибологическими и коррозионными свойствами покрытий [10; 11; 12].

Несмотря на то, что покрытия на основе Al_2O_3, полученные методом воздушно-плазменного напыления, достаточно широко исследованы, в литературе недостаточно полно раскрыта взаимосвязь между током плазменной дуги, формированием микроструктуры и совокупностью эксплуатационно значимых свойств покрытий при их нанесении на нержавеющие стали, применяемые в насосном оборудовании. Большинство опубликованных работ, как правило, сосредоточено либо на структурно-фазовом состоянии покрытий, либо на отдельных механических или трибологических характеристиках без их комплексного сопоставления. В то же время ограниченно представлены данные о сравнительном поведении плазменно-напылённых покрытий Al_2O_3 при трении с контртелами различной природы, а также о связи параметров напыления с механизмами изнашивания и особенностями адгезионного разрушения. Недостаточно изученным остаётся и вопрос о том, как изменение тока плазменной дуги в процессе воздушно-плазменного напыления влияет одновременно на пористость, фазовый состав, микротвёрдость, износостойкость, адгезионную прочность и коррозионное поведение покрытий на подложке из стали 10Х18Н9.

В связи с этим целью настоящей работы является установление закономерностей влияния тока плазменной дуги в диапазоне 300–500 А на микроструктуру, фазовый состав, пористость, механические, трибологические, адгезионные и коррозионные свойства покрытий Al_2O_3, сформированных методом воздушно-плазменного напыления на стали 10Х18Н9.

Научная новизна работы заключается в комплексной оценке влияния тока плазменной дуги на свойства покрытий Al_2O_3 применительно к условиям эксплуатации деталей насосного оборудования, а также в сопоставлении механизмов трения и изнашивания при использовании металлического и керамического контртел и в выявлении особенностей адгезионного разрушения покрытий, сформированных при различных режимах напыления.

Материалы и методы

В качестве подложки использовалась аустенитная нержавеющая сталь 10Х18Н9 (Cr 17–18 %; Ni 8–10 %; C ≤ 0,12 %; остальное – Fe). Образцы изготавливались в виде дисков диаметром 22 мм и толщиной 5 мм. Перед напылением проводились шлифование, обезжиривание и пескоструйная обработка электрокорундом фракции 40–50 мкм с обеспечением шероховатости Ra = 1,0–1,2 мкм.

Покрытия Al_2O_3 наносились методом воздушно-плазменного напыления на установке SX-60 Plasma Spraying Equipment при токах плазменной дуги 300, 400 и 500 А (таблица 1). В качестве варьируемого параметра в настоящем исследовании был выбран ток плазменной дуги, оказывающий определяющее влияние на тепловложение в процессе напыления, степень расплавления частиц порошка и формирование микроструктуры покрытия. Остальные технологические параметры воздушно-плазменного напыления, включая расход плазмообразующих газов, дистанцию напыления и скорость подачи порошка, были зафиксированы на

оптимальных уровнях, рекомендованных для формирования покрытий на основе Al_2O_3, с целью исключения их влияния и обеспечения корректного анализа роли тока дуги. Диапазон тока 300–500 А был выбран исходя из технологических возможностей используемой установки и данных литературы. При токах ниже 300 А, как правило, наблюдается недостаточное расплавление частиц и формирование покрытий с повышенной пористостью. В то же время увеличение тока свыше 500 А может приводить к перегреву частиц и подложки, росту остаточных термических напряжений и образованию микротрещин, что ограничивает практическую применимость таких режимов. В качестве порошка использовался электрокорунд белый 25А (34 ± 6 мкм). Толщина покрытий составляла 100–250 мкм.

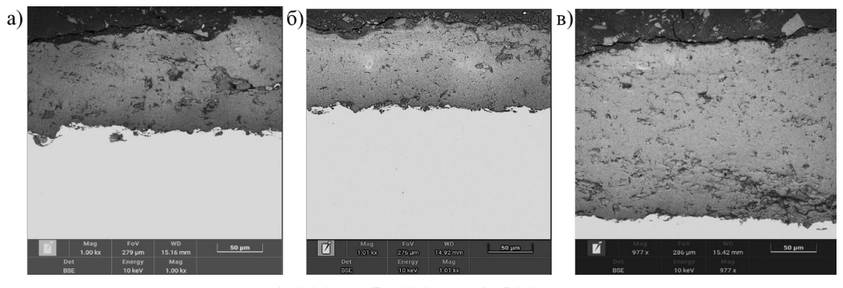
Таблица 1 – Режимы нанесения оксидных покрытий Al2O3 методом ВПН

№ режима	Сила тока, А	Напряжение, В	Мощность, кВт	Расход H_2, л/ч	Расход, Ar, л/ч
1	300	47	14,1	30	2200
2	400	48	19,2	30	2200
3	500	49	24,5	30	2200

Микроструктура покрытий исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии на SEM3200. Фазовый состав покрытий определялся на рентгеновском дифрактометре X'PertPRO с использованием CuKα – излучения. Съемки проводились при следующих параметрах: напряжение на трубке U=40 кВ; ток трубки I=30 мА; время экспозиции 0,25 с; шаг съемки 0,02°. Дифрактограммы были расшифрованы при помощи программы HighScore и базы данных PDF-2. Микротвердость и модуль упругости измерялись методом индентирования на твердометре Fischerscope HM2000S. Трибологические испытания проводились по схеме «шар–диск» при сухом трении с контртелами из стали 100Cr6 и диоксида циркония ZrO_2 на трибометре TRB3 в сухом режиме трения в соответствии со стандартом ASTM G99. После проведения испытания на трение методом шар-диск определена площадь износа методом профилометрии согласно стандарту ISO13565 на профилометре TAYLOR HOBSON SURTRONIC S-100 SERIES. Адгезионная прочность оценивалась методом прогрессирующего царапания (scratch-test) на установке RST 300 (CSM Instruments) с алмазным индентором Rockwell (R = 200 мкм) при линейном увеличении нагрузки от 0,5 до 200 Н на длине трека 6 мм. Коррозионные свойства исследовались методом потенциодинамической поляризации. Испытания проводились при комнатной температуре (25 °C) в 3.5 % водном растворе NaCl. Площадь открытой поверхности образца составляла 1 $см^2$. В качестве измерительной системы использовалась трехэлектродная электрохимическая ячейка: насыщенный каломельный электрод (SCE) служил электродом сравнения, а платиновая пластина – вспомогательным электродом, а образец с покрытием – рабочим электродом. Перед началом измерений образцы выдерживались в растворе в течение 10 мин для стабилизации потенциала открытой цепи (OCP).

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлена микроструктура покрытий Al_2O_3, полученных методом воздушно-плазменного напыления при различных значениях тока плазменной дуги (300, 400 и 500 А). Покрытия, сформированные при токах 300 и 400 А, имеют толщину порядка 100–150 мкм. Для образца, полученного при 300 А, характерна выраженная неоднородность структуры, повышенная пористость и наличие зон неполного сплавления частиц порошка. В приповерхностной области и на границе с подложкой наблюдаются поры и микропустоты, что обусловлено недостаточным тепловложением и неполным расплавлением частиц в плазменном потоке (рисунок 1а). При увеличении тока до 400 А структура покрытия становится более плотной и однородной. Отмечается существенное снижение пористости, а также улучшение межламеллярного сцепления за счёт более полного расплавления и деформации частиц Al_2O_3 при осаждении. Граница «покрытие–подложка» характеризуется высокой сплошностью и отсутствием выраженных дефектов (рисунок 1б). При токе 500 А формируются наиболее плотные и однородные покрытия толщиной 240–250 мкм. Частицы порошка практически полностью расплавлены и образуют хорошо связанный ламеллярный слой с минимальным количеством пор. Межфазная граница остаётся ровной и без признаков отслоения. Вместе с тем при детальном анализе выявляются локальные микротрещины, преимущественно ориентированные параллельно поверхности покрытия, а также узкие межламеллярные зазоры, что, вероятно, связано с развитием термических напряжений при повышенном тепловложении (рисунок 1в). Количественный анализ микроструктуры показал, что с увеличением тока плазменной дуги наблюдается последовательное снижение пористости покрытий: от ~4,17 % при 300 А до ~2,83 % при 400 А и ~1,98 % при 500 А. Это свидетельствует о том, что повышение тока способствует более полному расплавлению частиц Al_2O_3 и улучшению их спекания при ударе о подложку. В результате формируется более плотная и однородная ламеллярная структура с повышенной межслойной связностью. Снижение пористости при увеличении тока также указывает на рост тепловложений в процессе напыления.



а) 300А; б) 400 А, в) 500 А

Рисунок 1 – Микроструктуры покрытий Al_2O_3, полученных методом ВПН при различных токах плазменной дуги

На рисунке 2 представлены дифрактограммы покрытий оксида алюминия, полученных методом ВПН при различных токах плазменной дуги (300 А, 400 А, 500 А). Во всех случаях зарегистрированы характерные дифракционные пики, соответствующие α-Al_2O_3 (корунд) и γ-Al_2O_3 (метастабильная модификация). Позиция основных отражений совпадают для всех образцов, что свидетельствует о сохранении одинакового фазового состава покрытий при изменении тока напыления.

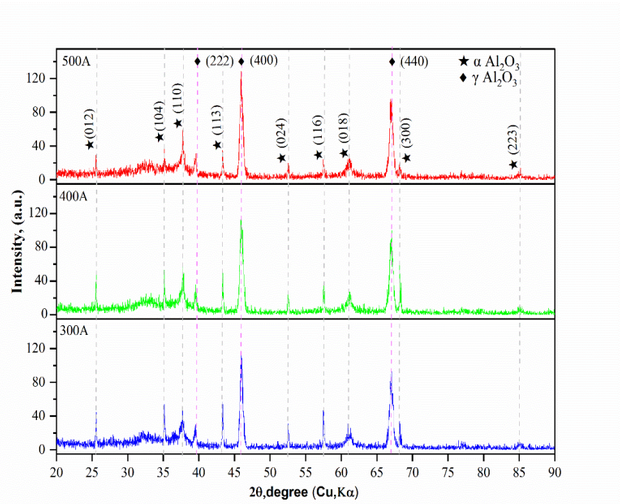


Рисунок 2 – Дифрактограммы покрытий Al_2O_3, полученных при различных токах ВПН: 300 А, 400 А, 500 А

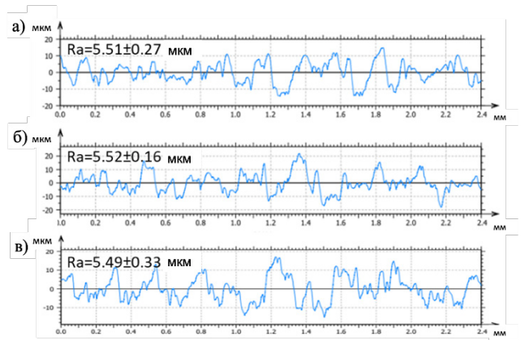
Рентгенофазовый анализ показал наличие α- и γ-Al_2O_3 во всех покрытиях. Изменение режима напыления не приводит к существенным фазовым преобразованиям, а соотношение фаз сохраняется в пределах 65–68 % α-Al_2O_3 и 32–35 % γ-Al_2O_3.

Таблица 2 – Соотношение фаз α- и γ-Al_2O_3 в покрытиях, полученных при различных токах

Образцы	α-Al_2O_3, %	γ-Al_2O_3, %
Al_2O_3_300А	67,4	32,6
Al_2O_3_ 400А	68,4	31,6
Al_2O_3_500А	65,8	34,2

На рисунке 3 представлены профилограммы поверхности покрытий Al_2O_3, полученных при токах 300 А, 400 А и 500 А. Полученные значения Ra показывают, что шероховатость поверхности всех образцов находится на одном уровне, независимо от величины тока плазменной дуги. Незначительные отличия в пределах погрешности измерения могут быть связаны с локальными колебаниями

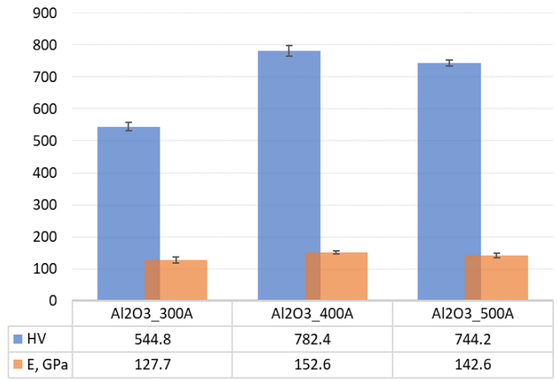
температуры и скоростью осаждения частиц в процессе напыления. Поверхность покрытий характеризуется мелковолнистым рельефом, обусловленным послойным осаждением расплавленных частиц оксида алюминия и их частичным перекрытием. Отсутствие значительных различий в величине Ra указывает на стабильность параметров плазменного процесса и равномерность формирования поверхности при всех режимах.



а) 300 А; б) 400 А; с) 500 А

Рисунок 3 – Профиль шероховатости поверхности покрытий Al_2O_3, полученных при различных токах плазменной дуги

Результаты измерения микротвердости и модуля упругости покрытий Al_2O_3, полученных при токах плазменной дуги 300 А, 400 А и 500 А, представлены на рисунке 4. Как видно из данных, микротвердость покрытий существенно зависит от режима напыления. При токе 300 А значение микротвердости составляет 544,8 ± 13,51 HV0,1, что соответствует сравнительно рыхлой и пористой структуре покрытия, наблюдавшейся на микроструктурных изображениях. При увеличении тока до 400 А микротвердость возрастает до 782,4 ± 16,27 HV0,1, а модуль упругости до 152,6 ± 4,76 ГПа. Это связано с улучшением расплава частиц, их более полным спеканием и уменьшением пористости. В данном режиме формируется наиболее плотная и равномерная структура покрытия, обеспечивающая оптимальное сочетание твердости и упругих свойств. При дальнейшем повышении тока до 500 А микротвердость несколько снижается до 744,2 ± 9,22 HV0,1, а модуль упругости до 142,6 ± 6,89 ГПа. Незначительное уменьшение этих характеристик может быть обусловлено повышением термических напряжений.

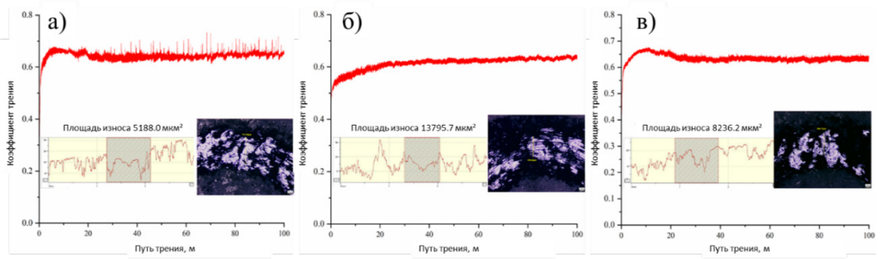


	Al2O3_300A	Al2O3_400A	Al2O3_500A
HV	544.8	782.4	744.2
E, GPa	127.7	152.6	142.6

Рисунок 4 – Микротвердость и модуль упругости покрытий Al_2O_3, полученных при различных токах плазменной дуги

Трибологические испытания покрытий Al_2O_3 проводились на трибометре CSM Instruments TRB3 по схеме «шар–диск» в условиях сухого трения при комнатной температуре в соответствии со стандартом ASTM G99. В качестве контртел использовались шары диаметром 6 мм из стали ШХ15 (100Cr6) и диоксида циркония ZrO_2. Перед испытаниями образцы и контртела очищались этиловым спиртом и высушивались при комнатной температуре. Испытания проводились при нормальной нагрузке 10 Н, скорости скольжения 0,03 м/с, радиусе износного трека 2 мм и суммарном пути трения 100 м. Эксперименты проводились в воздушной атмосфере без смазки при температуре 20–25 °C. В процессе испытаний регистрировался коэффициент трения. После завершения испытаний определялись ширина и глубина износной дорожки с использованием профилометра, на основе которых рассчитывался удельный износ покрытия. Морфология износных дорожек анализировалась методом оптической микроскопии для идентификации механизма износа.

На рисунках 5–6 представлены зависимости коэффициента трения от пути скольжения и микропрофили износных дорожек покрытий Al_2O_3, полученных при различных токах плазменной дуги (300 А, 400 А, 500 А), испытанных по схеме «шар-диск» с контртелами из стали 100Cr6 и диоксида циркония ZrO_2. Анализ полученных данных показал, что трибологическое поведение покрытий существенно зависит как от режима напыления, так и от природы контртела. При этом установлена немонотонная зависимость удельного износа от тока плазменной дуги: минимальные значения наблюдаются при 300 А, затем при 400 А происходит резкое увеличение износа, после чего при 500 А износ вновь снижается. Во всех случаях наблюдается характерное поведение, включающее стадию приработки с последующим переходом к установившемуся режиму трения.



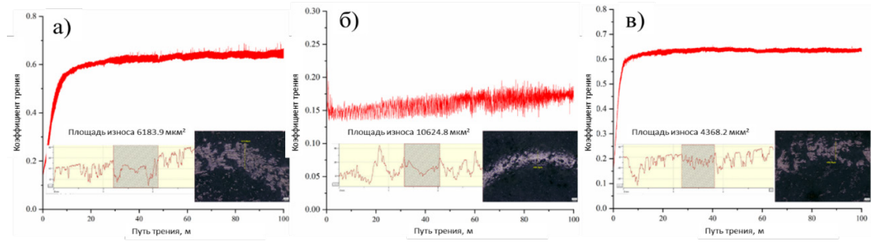
а) 300 А; б) 400 А; в) 500 А

Рисунок 5 – Кривые коэффициент трения и профили износных дорожек покрытий Al_2O_3, испытанных с контртелом 100Cr6

При взаимодействии с металлическим контртелом реализуется преимущественно абразивно-адгезионный механизм изнашивания, сопровождающийся локальной пластической деформацией и переносом материала (рис.5). Для покрытия, полученного при токе 300 А, коэффициент трения составляет около 0,65 (рис. 5а), а удельный износ – ~0,07×10³ мм³/Н·м (рис. 7). Несмотря на повышенную пористость и неоднородность структуры, изнашивание протекает относительно равномерно, без выраженного выкрашивания. Это связано с тем, что пористая структура частично компенсирует внутренние напряжения и снижает склонность покрытия к хрупкому разрушению. При увеличении тока до 400 А коэффициент трения снижается до 0,45–0,50 (рис. 5б), однако удельный износ возрастает до максимального значения ~0,17×10³ мм³/Н·м (рис. 7). Данное явление обусловлено формированием плотной, но структурно напряжённой системы. Повышенное тепловложение в процессе напыления приводит к накоплению остаточных термических напряжений, что повышает хрупкость покрытия. В процессе трения это реализуется через развитие микротрещин, межламеллярное расслоение и выкрашивание материала, что приводит к интенсивной потере материала, несмотря на снижение коэффициента трения. Для покрытия, сформированного при токе 500 А, коэффициент трения вновь возрастает до ~0,65 (рис. 5в), тогда как удельный износ снижается до ~0,10×10³ мм³/Н·м (рис.7). Это связано с формированием более однородной и плотной структуры с высокой межламеллярной связностью. Улучшение сцепления между ламеллами и снижение дефектности ограничивают развитие хрупкого разрушения, что обеспечивает повышение износостойкости покрытия.

При использовании керамического контртела ZrO_2 характер взаимодействия изменяется: адгезионная составляющая практически отсутствует, и изнашивание носит преимущественно абразивный характер (рис.6). В целом наблюдается более стабильный режим трения и меньшая интенсивность износа. Для покрытия, полученного при токе 300 А, коэффициент трения составляет 0,6–0,65 (рис. 6а), а удельный износ – около 0,08×10³ мм³/Н·м (рис.7). Износ протекает равномерно, без выраженных дефектов, несмотря на пористость покрытия. При

токе 400 А коэффициент трения снижается до ~0,3 (рис. 6б), однако удельный износ увеличивается до ~0,13×10³ мм³/Н·м (рис.7). Как и в случае со стальным контртелом, это связано с хрупким разрушением покрытия. В условиях отсутствия адгезии основной вклад в износ вносит абразивное выкрашивание, вызванное развитием микротрещин в структурно напряжённом покрытии. Наиболее благоприятные результаты получены при токе 500 А: при коэффициенте трения около 0,6 (рис. 6в) удельный износ снижается до минимального значения ~0,05×10³ мм³/Н·м (рис.7). Это обусловлено высокой плотностью и целостностью покрытия, а также устойчивостью к разрушению при контакте с твёрдым керамическим контртелом.



а) 300 А; б) 400 А; в) 500 А

Рисунок 6 – Кривые коэффициент трения и профили износных дорожек покрытий Al_2O_3, испытанных с контртелом ZrO_2:

На рисунке 7 показаны значения удельного износа покрытий Al_2O_3, сформированных при токах плазменной дуги 300, 400 и 500 А, при испытаниях с контртелами из стали 100Cr6 и диоксида циркония ZrO_2.

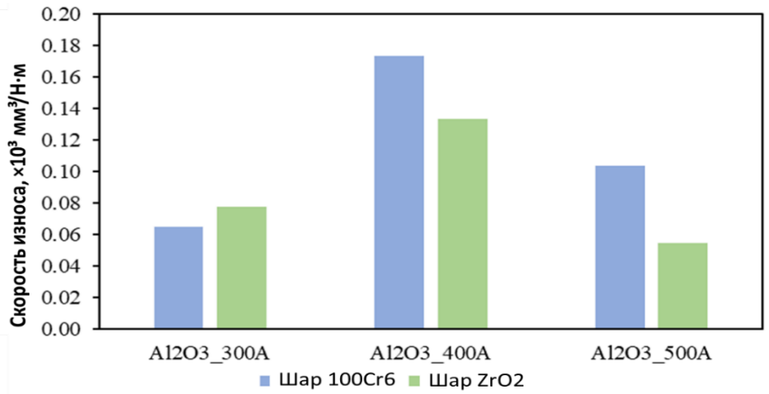


Рисунок 7 – Удельный износ покрытий Al_2O_3, полученных при различной плазменной дуге при трении с контртелом 100Cr6 и ZrO_2

Таким образом, установлено, что коэффициент трения и удельный износ не находятся в прямой зависимости. Минимальные значения коэффициента трения наблюдаются при токе 400 А, однако именно этот режим характеризуется максимальным износом, что связано с преобладанием механизмов хрупкого разрушения. Немонотонная зависимость износа от тока плазменной дуги обусловлена конкуренцией двух факторов: с одной стороны, повышение тока приводит к уплотнению структуры и снижению пористости, с другой - вызывает рост остаточных термических напряжений. При промежуточном режиме (400 А) реализуется наиболее неблагоприятное сочетание этих факторов, тогда как при 500 А достигается более оптимальный баланс между плотностью структуры и её механической устойчивостью. В целом показано, что ключевым фактором, определяющим износостойкость покрытий Al_2O_3, является не только их плотность, но и уровень внутренних напряжений и склонность к хрупкому разрушению.

Для оценки адгезионной прочности покрытий Al_2O_3 с металлической подложкой применялся метод прогрессирующего царапания (scratch-test), позволяющий определить критические нагрузки, соответствующие зарождению и развитию дефектов покрытия. В процессе тестирования регистрировались силы трения, акустическая эмиссия и параметры деформации, по изменению которых определялись критические нагрузки разрушения. Результаты испытаний показали существенное влияние тока напыления на адгезионную стойкость покрытий (рисунок 8). Покрытие, полученное при 300 А, характеризуется ранним началом повреждений: микротрещины возникают уже при ~53 Н (Lc1), а при ~127 Н (Lc2) наблюдаются выраженные отслаивания и интенсивное разрушение слоя, что указывает на слабую межламеллярную связь. Для покрытия при 400 А отмечается более высокая устойчивость: первые изменения фиксируются при ~39 Н, тогда как выраженные дефекты появляются лишь при ~148 Н, а основное разрушение развивается при 185–195 Н (Lc3). При этом преобладают локальные сколы без полного отслаивания, что свидетельствует о более плотной структуре покрытия при сохранении хрупкого характера разрушения. Наилучшие показатели адгезионной прочности демонстрирует покрытие, сформированное при 500 А. Ранние дефекты проявляются при ~68 Н, значимые повреждения – после ~134 Н, а основное разрушение происходит при 185–190 Н. Скретч-дорожка сохраняет целостность и характеризуется отсутствием крупных отслаиваний, что указывает на высокую плотность, низкую пористость и прочные межламеллярные связи покрытия.

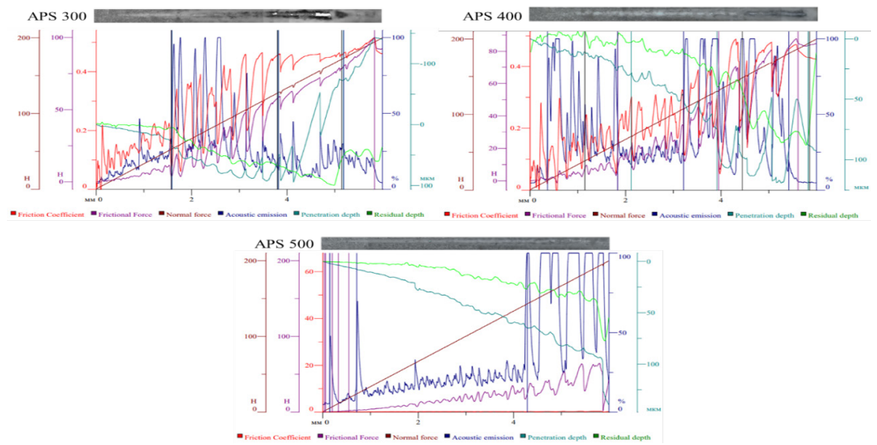


Рисунок 8 – Кривые нагрузки, коэффициента трения, акустической эмиссии и изображения скретч-дорожек покрытий Al_2O_3, полученных при различных токах (300 А, 400 А, 500 А)

Результаты scratch-теста свидетельствуют о росте адгезионной прочности с увеличением тока плазменной дуги. Максимальные критические нагрузки разрушения зафиксированы для покрытия, полученного при 500 А, что указывает на высокую прочность межламеллярных связей и надёжное сцепление с подложкой.

На рисунке 9 приведены анодно-катодные поляризационные кривые исходной стали 10Х18Н9 и образцов с покрытиями Al_2O_3, полученными при токах 300, 400 и 500 А. Анализ показал, что нанесение оксидного покрытия практически не изменяет характер коррозионного поведения материала. Все кривые располагаются в близком интервале потенциалов и имеют схожий наклон анодных ветвей, что указывает на идентичный механизм протекания электрохимических процессов. Исходная сталь характеризуется коррозионным током 0,01343 мА и скоростью коррозии $2{,}08\times10^{-4}$ мм/год. Покрытие, сформированное при 300 А, демонстрирует практически те же значения, что свидетельствует об отсутствии заметного влияния данного режима напыления на коррозионную активность. При токе 400 А наблюдается умеренное снижение коррозионного тока и скорости коррозии, однако форма поляризационной кривой остается неизменной. Для покрытия, полученного при 500 А, значения Icorr и скорости коррозии также близки к остальным образцам. В целом установлено, что изменение тока напыления в диапазоне 300–500 А не оказывает существенного влияния на электрохимическую стойкость покрытий Al_2O_3.

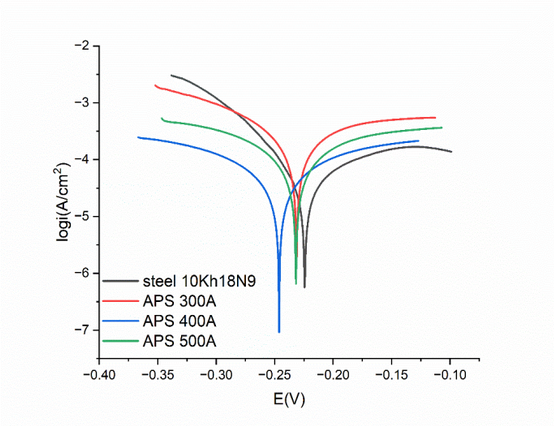


Рисунок 9 – Потенциодинамические поляризационные кривые стали 10Х18Н9 и покрытий Al_2O_3, полученных при различных токах (300 А, 400 А, 500 А)

В целом коррозионные испытания показали, что все покрытия Al_2O_3 обеспечивают сопоставимый уровень барьерной защиты. Различия в значениях коррозионного тока и скорости коррозии незначительны и укладываются в узкий диапазон, что подтверждается близким расположением поляризационных кривых. Наблюдаемое при токе 400 А незначительное снижение Icorr и CR, вероятно, обусловлено формированием более плотной структуры покрытия.

Следует отметить, что проведённые испытания выполнены в ограниченных условиях (3,5 % раствор NaCl, комнатная температура), моделирующих нейтральную хлоридсодержащую среду. В реальных условиях эксплуатации насосного оборудования возможно воздействие более агрессивных факторов, включая кислотные и щелочные среды, а также повышенные температуры. В этой связи полученные результаты следует рассматривать как частные для рассматриваемых условий, а их обобщение требует проведения дополнительных исследований.

Информация о финансирования

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992876).

Выводы

Проведённое исследование показало, что ток плазменной дуги при воздушно-плазменном напылении оказывает ключевое влияние на микроструктуру, механические и трибологические свойства покрытий Al_2O_3, при этом фазовый состав и коррозионная стойкость остаются практически неизменными. Повышение тока с 300 до 400 А приводит к уплотнению структуры, уменьшению пористости и значительному росту микротвердости и модуля упругости, формируя наиболее однородные и прочные покрытия. Ток 500 А обеспечивает максимальную адгезионную прочность и минимальный удельный износ при трении, особенно с

керамическим контртелом, однако вызывает появление локальных микротрещин из-за термических напряжений. Фазовый анализ показал стабильное соотношение α- и γ-Al_2O_3 вне зависимости от режима напыления, а коррозионные испытания подтвердили сохранение электрохимической устойчивости стали 10Х18Н9 после нанесения покрытий. Таким образом, выбор оптимального тока напыления позволяет рационально балансировать между структурной однородностью, механическими характеристиками, трибологической стойкостью и адгезионной прочностью покрытий. Полученные результаты подтверждают перспективность применения покрытий Al_2O_3 для увеличения межремонтного периода эксплуатации насосов, работающих в условиях абразивного и коррозионного воздействия

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Binama, M., Muhirwa, A., Bisengimana, E.** Cavitation Effects in Centrifugal Pumps − A Review // Binama Maxime. Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2016. – Vol. 6(5). – P. 52–63.

2 **Mohammadi, Z., Heidari, F., Fasamanesh, M, Saghafian, A, Amini, F, Mahdi Jafari, S.** Centrifugal pumps // Transporting Operations of Food Materials Within Food Factories., Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry. – 2023. – P. 155–200.

3 **Марголин, Б. З., Петров, С. Н., Прокошев, О. Ю., Кондратьева, А. М.** Моделирование процессов деградации механических свойств аустенитной хромоникелевой стали 10Х18Н9 в результате теплового старения // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Том 9(4).

4 **Pokharel, N., Ghimire, A., Thapa, B., Thapa, B. S.** Wear in centrifugal pumps with causes, effects and remedies : A Review // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – 1037. – P. 012042

5 **Patel, M., Kumar, A., Pardhi, B., Pal, M.** Abrasive, Erosive and Corrosive Wear in Slurry Pumps – A Review // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) . – 2020. – Vol 07(03).

6 **PalDey, S., Deevi, S. C.** Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al) N: a review //Materials Science and Engineering. – 2003. – Vol. 342(1–2). – P. 58–79.

7 **Kaushal, S., Zeeshan, M. D., Ansari, M. I., Sharma, D.** Progress in tribological research of Al_2O_3 ceramics: A review // Materialstoday proceedings. – 2023. – Vol – 82. – P. 163–167.

8 **Khairullina, A. S., Artykbayeva, A. B., Bakkara, A. E., Sadykov, B. S., Zhapekova, A. O., Zhussupova, I. B., Aksenov, V. S.** Development of composite aluminum powders with enhanced thermoreactivity for energetic systems // Chemical Journal of Kazakhstan. – 2025. – Vol. 3(91). – P. 63–73.

9 **Чернышова, Т. А., Кобелева, Л. И., Болотова, Л. К.** Дискретно армированные композиционные материалы с матрицами из алюминиевых сплавов и их трибологические свойства // Металлы. – 2001. – (6). – С. 85–98.

10 **Sarikaya, O.** Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process// Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. – 190(2–3). – P. 388–393.

11 **Srinivasan, V., Sampath, S., Vaidya, A., Streibl, T., Friis, M.** On the reproducibility of air plasma spray process and control of particle state. //Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – Vol. – 15. – P. 739–743.

12 **Зайко, Т. И., Палагушкин, Б. В., Кузьмин, В. И., Гуляев, И. П., Сергачёв, Д. В., Корниенко, Е. Е.** Воздушно-плазменное напыление функциональных покрытий //Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – №. 1–3. – С. 28–34.

REFERENCES

1 **Binama, M., Muhirwa, A., Bisengimana, E.** Cavitation Effects in Centrifugal Pumps − A Review // Binama Maxime. Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2016. – Vol. 6(5). – P. 52–63.

2 **Mohammadi, Z., Heidari, F., Fasamanesh, M, Saghafian, A, Amini, F, Mahdi Jafari, S.** Centrifugal pumps // Transporting Operations of Food Materials Within Food Factories., Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry. – 2023. – P. 155–200.

3 **Марголин, Б. З., Петров, С. Н., Прокошев, О. Ю., Кондратьева, А. М.** Моделирование процессов деградации механических свойств аустенитной хромоникелевой стали 10Х18Н9 в результате теплового старения // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Том 9(4).

4 **Pokharel, N., Ghimire, A., Thapa, B., Thapa, B. S.** Wear in centrifugal pumps with causes, effects and remedies: A Review // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. – 2022. – 1037. – P. 012042

5 **Patel, M., Kumar, A., Pardhi, B., Pal, M.** Abrasive, Erosive and Corrosive Wear in Slurry Pumps – A Review // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) . – 2020. – Vol 07(03).

6 **PalDey, S., Deevi, S. C.** Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al) N: a review //Materials Science and Engineering. – 2003. – Vol. 342(1–2). – P. 58–79.

7 **Kaushal, S., Zeeshan, M. D., Ansari, M. I., Sharma, D.** Progress in tribological research of Al_2O_3 ceramics: A review // Materialstoday proceedings. – 2023. – Vol – 82. – P. 163–167.

8 **Khairullina, A. S., Artykbayeva, A. B., Bakkara, A. E., Sadykov, B. S., Zhapekova, A. O., Zhussupova, I. B., Aksenov, V. S.** Development of composite aluminum powders with enhanced thermoreactivity for energetic systems // Chemical Journal of Kazakhstan. – 2025. – Vol. 3(91). – P. 63–73.

9 **Chernyshova, T. A., Kobeleva, L. I., Bolotova, L. K.** Diskretno armirovannye kompozicionnye materialy s matricami iz alyuminievyh splavov i ih tribologicheskie svojstva [Discretely reinforced composite materials with aluminum alloy matrices and their tribological properties] // Metally. – 2001. – (6). – P. 85–98.

10 **Sarikaya, O.** Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process// Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. – 190(2–3). – P. 388–393.

11 **Srinivasan, V., Sampath, S., Vaidya, A., Streibl, T., Friis, M.** On the reproducibility of air plasma spray process and control of particle state. //Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – Vol. – 15. – P. 739–743.

12 **Zajko, T. I., Palagushkin, B. V., Kuz'min, V. I., Gulyaev, I. P., Sergachyov, D. V., Kornienko, E. E.** Vozdushno-plazmennoe napylenie funkcional'nyh pokrytij [Air-plasma spraying of functional coatings]//Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – №. 1–3. – P. 28–34.

Поступило в редакцию 26.01.26.
Поступило с исправлениями 11.02.26.
Принято в печать 21.04.26.

Б. К. Рахадилов[1], А. Б. Нәбиолдина[2], *Е. А. Алтаев[3], Г. Т. Тлеубергенова[4]

[1]«PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2,3,4]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

26.01.26 ж. баспаға түсті.
11.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
21.04.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АУА-ПЛАЗМАЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЮМИНИЙ ОКСИДІ НЕГІЗІНДЕ ҚОРҒАНЫС ЖАБЫНДАРЫН АЛУ

Бұл мақалада агрессивті және абразивті ортада жұмыс істейтін сорғы жабдығы бөліктерінің қызмет ету мерзімін арттыруға арналған, ауа-плазмалық бүрку арқылы алынған Al_2O_3 негізіндегі тозуға және коррозияға төзімді оксидті жабындарды кешенді зерттеу нәтижелері берілген. Субстрат материалы ретінде химия және энергетикада кеңінен қолданылатын аустенитті тот баспайтын болат 10Х18N9 пайдаланылды. Негізгі назар аударылатын жабындардың микроқұрылымының, фазалық құрамының, кеуектілігінің, сондай-ақ механикалық, трибологиялық және

адгезиялық сипаттамаларының қалыптасуына 300–500 А диапазонындағы плазмалық доғалық токтың әсерін зерттеуге бағытталған. Бүрку тоғының жоғарылауы Al_2O_3 ұнтақ бөлшектерінің толық балқуына ықпал ететіні, субстрат бетіне соқтығысқанда олардың тегістелуін жақсартатыны және кеуектілігі төмендетілген тығыз және біркелкі жабын құрылымын құрайтыны көрсетілді. Плазмалық доға тоғының жоғарылауымен жабындардың жабысқақ беріктігі мен микроқаттылығының жоғарылауы, сонымен қатар абразивтік жағдайларда үйкеліс пен тозу қарқындылығының төмендеуі байқалатыны анықталды. Тозуға төзімділіктің, жабысқақ беріктігінің және жабындардың құрылымдық тұрақтылығының ең қолайлы үйлесімі 500 А бүрку тоғы арқылы қол жеткізіледі. Агрессивті ортада коррозияға қарсы сынақтар Al_2O_3 жабындарын қолдану 10Х18N9 болаттың коррозияға төзімділігіне айтарлықтай теріс әсер етпейтінін және оның коррозияға төзімділігін төмендетпейтінін көрсетті. Алынған нәтижелер қарқынды тозу және коррозия жағдайында жұмыс істейтін соргы жабдығының бөлшектерін қорғау және нығайту үшін Al_2O_3 негізіндегі ауа-плазмалық оксидті жабындарды қолдану мүмкіндігін растайды.

Кілтті сөздер: ауа-плазмалық бүрку, Al_2O_3 жабыны, тозуға төзімді жабындар, соргы жабдықтары, трибология, адгезия.

B. K. Rakhadilov[1], A. B. Nabioldina[2], *E. A. Altayev[3], G. T. Tleubergenova[4]
[1]LLP «PlasmaScience», Republic of Kazakhstan, Ust- Kamenogorsk;
[2,3,4]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 26.01.26.
Received in revised form 11.02.26.
Accepted for publication 21.04.26.

FORMATION OF PROTECTIVE COATINGS BASED ON ALUMINUM OXIDE USING AIR-PLASMA SPRAYING

The paper presents the results of a comprehensive study of wear and corrosion resistant oxide coatings based on Al_2O_3, obtained by air-plasma spraying, designed to increase the service life of pumping equipment parts operating in aggressive and abrasive environments. Austenitic stainless steel 10Kh18N9, widely used in chemical and power engineering, was used as the substrate material. The main focus is on studying the influence of plasma arc current in the range of 300–500 A on the formation of microstructure, phase composition, porosity, as well as mechanical, tribological and adhesive characteristics of sprayed coatings. It has been shown that increasing the spraying current promotes more complete melting of Al_2O_3 powder particles, improves their flattening upon impact with the substrate surface, and forms a denser and more uniform coating structure with reduced porosity. It has been established that with an increase in the plasma arc current, an increase in the adhesive strength and microhardness of the coatings is observed, as well as a

decrease in the coefficient of friction and wear intensity under abrasive conditions. The most favorable combination of high wear resistance, adhesive strength and structural stability of coatings is achieved with a spraying current of 500 A. Corrosion tests in aggressive environments have shown that the application of Al_2O_3 coatings does not have a significant negative impact on the corrosion behavior of 10Kh18N9 steel and does not reduce its corrosion resistance. The obtained results confirm the potential of using air-plasma oxide coatings based on Al_2O_3 for the protection and strengthening of pumping equipment parts operated under conditions of intensive wear and corrosion.

Keywords: air-plasma spraying, Al_2O_3 coating, wear-resistant coatings, pumping equipment, tribology, adhesion.

МРНТИ 55.30.00

https://doi.org/10.48081/BGQF2227

П. М. Рахметова[1], Н. С. Сембаев[2],
****Л. А. Курмангалиева[3], К. М. Искаков[4]***
[1,3]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157
[2]ORCID: https// orcid.org/0000-0003-3032-1094
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2922-2518
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8146-2535
*e-mail: lezzet@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ROS-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЗАХВАТА ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В данной статье представлен конвейер обработки данных на основе ROS для надежного обнаружения и роботизированного манипулирования, который сочетает классическое компьютерное зрение с аналитическим планированием захвата. Конвейер объединяет обнаружение на основе RGB, 3D-реконструкцию, оценку положения с 6 степенями свободы, аналитическое планирование захвата и выполнение движений без столкновений в рамках модульной архитектуры. В отличие от подходов, основанных исключительно на машинном обучении, система делает акцент на интерпретируемости, детерминированной производительности и готовности к развертыванию без необходимости дополнительного сбора данных или переобучения нейронных сетей. Устойчивость к шуму датчиков, изменению освещения и частичным перекрытиям достигается за счет временной стабилизации оценок положения и проверки согласованности между модальными точками. Аналитический планировщик захвата генерирует варианты захвата сверху и сбоку и оценивает их на основе стабильности силового смыкания, ограничений захвата, возможности обратной кинематики и предотвращения столкновений в MoveIt. Выбранный захват выполняется с помощью структурированной последовательности «предварительный захват – захват – подъем – размещение» с действиями восстановления (повторное обнаружение, переранжирование, перепланирование) в случае сбоя. Основной вклад заключается в создании унифицированной архитектуры ROS, которая тесно связывает оценку позы с формальной оценкой качества захвата, обеспечивая детерминированную работу, прозрачное принятие решений и легкую адаптацию к другим призматическим объектам и аппаратным платформам.

Ключевые слова: операционная система для роботов, обнаружение и манипулирование, компьютерное зрение, оценка положения с 6 степенями свободы, планирование MoveIt.

Введение

Интеллектуальные роботизированные системы стремительно развиваются, ускоряя автоматизацию в промышленных и логистических условиях. Для удовлетворения растущих требований к эффективности, адаптивности и автономности современные роботы должны тесно интегрировать восприятие, принятие решений и физическое взаимодействие в рамках единой архитектуры управления. Операционная система для роботов (ROS), как модульное и расширяемое промежуточное программное обеспечение, стала де-факто стандартом для интеграции разнородных программных и аппаратных компонентов посредством совместимой связи.

Решения на основе ROS достигли высоких результатов в различных классах приложений, включая мобильных роботов с визуальным управлением для транспортировки объектов [1], системы навигации и регулирования траектории [2], [3] и мобильные манипуляторы для осмотра, обслуживания и выполнения задач в сложных, неструктурированных средах [4], [5]. В совокупности эти работы демонстрируют способность ROS координировать восприятие, навигацию и манипуляцию, поддерживая при этом быстрое прототипирование и масштабируемость, что делает ее краеугольным камнем как для академической, так и для промышленной разработки робототехники.

В то же время достижения в области компьютерного зрения и глубокого обучения существенно улучшили роботизированное восприятие. Современные методы обнаружения и отслеживания становятся все более надежными в динамичных и загроможденных сценах [6–8]. Сочетание 3D-восприятия, измерения глубины и анализа на основе геометрии позволяет еще точнее локализовать и манипулировать различными типами объектов, от жестких цилиндрических компонентов [9] до деформируемых материалов и гибкой упаковки [10]. Эти тенденции стимулируют создание архитектур, ориентированных на ROS, которые сочетают в себе передовое восприятие с аналитическим планированием захвата для обеспечения надежной обработки объектов. Однако коробки сильно различаются по размеру, положению, текстуре и материалу, и часто складываются или частично перекрываются при изменяющемся освещении и фоновых помехах. Поэтому надежная автоматизация требует сквозной координации восприятия, оценки положения, синтеза захвата, планирования движения и выполнения в рамках единого конвейера ROS.

Несмотря на зрелость ROS, решение для надежного обнаружения коробок и стабильного выполнения захвата в режиме реального времени остается сложной задачей. Конвейеры машинного зрения часто деградируют в условиях склада из-за перекрытий, изменений освещения и шума датчиков, вызывая ошибки положения, которые распространяются на манипуляции [7], [8]. Развертывание ROS также может страдать от проблем синхронизации, задержек связи и помех, которые ухудшают стабильность отслеживания и точность датчиков [11]. Аналитическое планирование захвата является интерпретируемым и эффективным, но зависит от точной геометрии объекта; зашумленные или неполные 3D-реконструкции в

условиях помех могут приводить к нестабильному захвату [9], [12]. Хотя многие исследования рассматривают навигацию, восприятие или манипулирование изолированно [2], [12], [13], меньше работ представляют интегрированные рабочие процессы, адаптированные для объектов коробчатой формы.

В данной работе предлагается унифицированная ROS-основанная структура для автоматического обнаружения и манипулирования коробками, которая сочетает надежное восприятие с аналитическим планированием захвата в модульной, расширяемой архитектуре. Конвейер разработан для реалистичных условий склада и напрямую связывает выходные данные обнаружения и положения с аналитическим модулем захвата, специфичным для коробок, в то время как тесно интегрированный слой управления/выполнения преобразует выходные данные планирования в действия манипулятора через стандартизированные интерфейсы ROS, отдавая приоритет быстродействию в реальном времени, масштабируемости и устойчивости к неопределенностям датчиков и связи.

Материалы и методы

Экспериментальная платформа использует ROS-совместимый роботизированный манипулятор, оснащенный RGB-D датчиком для синхронного захвата данных о цвете и глубине для обнаружения объектов и оценки положения по 6 степеням свободы. Аппаратная конфигурация соответствует общим принципам мобильных устройств/манипуляторов на основе ROS (Рисунок 1), где датчики и исполнительные механизмы интегрированы в единую программную архитектуру [1; 4; 5]. Комплект датчиков включает в себя RGB-камеру высокого разрешения и, опционально, лидарный датчик глубины (Intel RealSense L515, диапазон 0,25–9 м, разрешение по глубине 1024×768 при 30 кадрах в секунду). Поток RGB-D обеспечивает плотные карты глубины и цветные изображения, позволяя извлекать геометрические признаки, необходимые для аналитического планирования захвата, как показано в исследованиях манипулирования на основе 3D-зрения и кооперативного восприятия [7; 12]. Вычислительный блок с поддержкой графического процессора выполняет восприятие и планирование движения в реальном времени, что соответствует современным конвейерам обнаружения/отслеживания на основе глубокого обучения и гибридным системам восприятия [6; 8; 13].

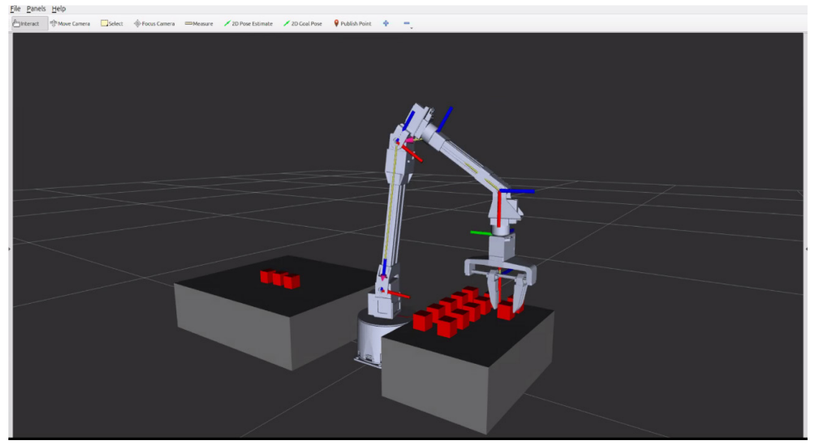


Рисунок 1 – Платформа роботизированного манипулятора в ROS

Экспериментальная сцена содержит объекты коробчатой формы разных размеров для проверки геометрической обобщенности и устойчивости в условиях, подобных складским. Метод реализован в виде модульного конвейера ROS, который связывает визуальное восприятие, оценку 3D-позы, аналитический синтез захвата и управление манипулятором. Следуя архитектурам, ориентированным на ROS для мобильной робототехники и манипуляций, специфичных для конкретных задач [1;4;14], система разделена на узлы ROS для получения изображений, обнаружения, геометрической реконструкции и выполнения. Как показано на рис. 1, архитектура включает четыре основных модуля, в которых данные и управление передаются от датчиков к манипулятору и обратно через обратную связь.

Модуль восприятия сначала выполняет 2D-обнаружение объектов коробчатой формы с использованием детекторов на основе CNN, разработанных для надежной локализации в визуально сложных сценах [5–7]. Обнаруженные 2D-ограничивающие рамки объединяются с сегментацией глубины для получения 3D-облаков точек и реконструкции геометрии объекта. Ориентация объекта оценивается с помощью PCA, а плоские поверхности извлекаются с использованием подгонки плоскости RANSAC, что соответствует установленным конвейерам 3D-манипуляций [9; 12].

На основе реконструированной 3D-модели модуль планирования захвата выбирает возможные контактные поверхности и направления подхода. Кандидаты на верхний и боковой захваты оцениваются с использованием метрик силового замыкания и геометрической стабильности, отражающих аналитические подходы к оценке захвата и методы геометрического рассуждения для манипуляций [12; 13]. При необходимости конвейер может быть расширен за счет уточнения захвата на основе обучения для обработки нерегулярных или деформируемых объектов путем предложения дополнительных кандидатов [10].

Траектории движения генерируются в ROS с помощью MoveIt, что обеспечивает планирование без столкновений и онлайн-обновления при изменении оценок положения. Это соответствует практике промышленной манипуляции и складской робототехники, которая опирается на эффективное планирование и адаптивные контуры управления [2; 3; 17]. В целом, конвейер ROS поддерживает непрерывную связь между узлами восприятия, планирования и выполнения, поддерживая отзывчивое и модульное поведение [4; 14; 15]. Оценка проводится в нескольких сценариях, сообщая о точности обнаружения, устойчивости оценки позы и успешности выполнения захвата. В экспериментах варьируются освещение, перекрытие и размещение объектов для оценки обобщения в реалистичных условиях склада, сочетая количественные показатели с качественными наблюдениями для выявления различий в производительности в зависимости от условий [6; 7; 18].

Результаты и обсуждение

Предложенный конвейер на основе ROS продемонстрировал надежное обнаружение и оценку положения прямоугольных призм по 6 степеням свободы в условиях, приближенных к складским. Геометрические признаки, извлеченные из данных RGB, в сочетании с временной стабилизацией и проверками согласованности между модальными сигналами, позволили снизить уровень шума датчиков, частичных перекрытий и неоднозначностей, связанных с симметрией. Полученные оценки положения оставались надежными и интерпретируемыми для последующего аналитического планирования захвата, с отклонениями, совместимыми с типичными допусками при захвате и перемещении. Аналитический планировщик захвата генерировал варианты верхнего и бокового захвата и оценивал их с точки зрения устойчивости силового замыкания, ограничений захвата, кинематической осуществимости и предотвращения столкновений. Ранжирование кандидатов по стабильности, устойчивости к неопределенности положения и стоимости движения обеспечивало стабильно успешное выполнение, при этом показатели успешности обычно превышали 90% и дополнительно улучшались при включении действий восстановления (повторное обнаружение, переранжирование, перепланирование). Выполнение движения с помощью MoveIt обеспечивало низкую задержку и плавные последовательности «предварительный захват – захват – подъем – перемещение» без столкновений. Как показано на рисунке 2, задержка планирования неизменно низка: в большинстве случаев она находится в диапазоне ~0,02–0,04 с, тогда как лишь небольшая часть достигает ~0,09 с в более сложных случаях, требующих дополнительной проверки столкновений или перепланирования. В целом, модульная архитектура ROS поддерживает детерминированное поведение и прозрачное принятие решений, оставаясь при этом расширяемой для добавления дополнительных датчиков и альтернативных систем оценки захвата.

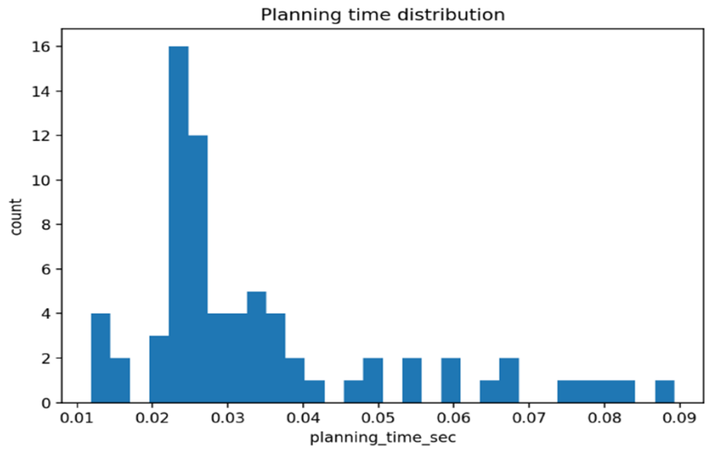


Рисунок 2 – Гистограмма времени планирования движения по результатам экспериментальных запусков

Информация о финансировании (при наличии)

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP22685781).

Выводы

В данной статье представлен конвейер на основе ROS для роботизированной манипуляции, управляемой восприятием, который объединяет обнаружение на основе RGB, оценку положения с 6 степенями свободы, аналитическое планирование захвата и выполнение структурированного движения в единый рабочий процесс. Система надежно идентифицирует и локализует прямоугольные призматические объекты, генерирует возможные варианты захвата и выполняет задачи захвата и перемещения без столкновений с высокой вероятностью успеха, сохраняя при этом интерпретируемое, детерминированное и прозрачное поведение.

Сочетание геометрического анализа и аналитической оценки захвата, дополненное стратегиями восстановления, такими как повторное обнаружение и перепланирование, позволяет конвейеру эффективно работать в условиях шума датчиков, частичного перекрытия и динамического расположения объектов. Модульная архитектура ROS поддерживает работу в реальном времени и облегчает адаптацию к различным объектам, манипуляторам и способам восприятия без обучения нейронных сетей или сбора данных. В будущем планируется интеграция дополнительных датчиков, уточнение захвата на основе машинного обучения для нерегулярных или деформируемых объектов, а также координация нескольких роботов в сложных складских условиях. Эти улучшения могут повысить надежность захвата, сократить время выполнения и еще больше расширить возможности системы по обобщению. В целом, предлагаемый конвейер

на основе ROS обеспечивает легковесное, интерпретируемое и масштабируемое решение для промышленных задач захвата и перемещения, объединяя восприятие, оценку положения, планирование захвата и выполнение движений в единый и практичный рабочий процесс.

REFERENCES

1 **Zhou, J. and Guowei, Z.** «Design of a ROS-Based Vision-Guided Mobile Robot for Object Transportation» 2025 IEEE 8th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Guiyang, China. – 2025. – P. 1289–1292. – https://doi.org/10.1109/IAEAC65194.2025.11166096.

2 **Imamoglu, M. R., Sumer, E. and Temeltas, H.** «A Comparison of Local Planner Algorithms for a ROS-based Omnidirectional Mobile Robot» 2023 8th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), Singapore. – 2023. – P. 26–30. – https://doi.org/10.1109/ICRAE59816.2023.10458649.

3 **Chen, C. S., Lin, F. C., Lin, C. J. and Wu, P. H.** «The Improved ROS-Based MTAR Navigation Framework for Service Robot: Motion Trajectory Analysis Regulator» in IEEE Access. – Vol. 12. – P. 166703–166716. – 2024. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3475014.

4 **Martin, J., Ansuategi, A., Maurtua, I., Gutierrez, A., Obregón, D., Casquero, O., Marcos, M.** «A Generic ROS-Based Control Architecture for Pest Inspection and Treatment in Greenhouses Using a Mobile Manipulator» in IEEE Access. – Vol. 9. – P. 94981–94995. – 2021. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093978.

5 **Kiyokawa T., Katayama H., Tatsuta Y., Takamatsu J. and Ogasawara T.** «Robotic Waste Sorter With Agile Manipulation and Quickly Trainable Detector» in IEEE Access. – Vol. 9. – P. 124616–124631. – 2021. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110795.

6 **Price E., Lawless G., Ludwig R., Martinovic I., Bülthoff H. H., Black M. J., Ahmad A.** «Deep Neural Network-Based Cooperative Visual Tracking Through Multiple Micro Aerial Vehicles» in IEEE Robotics and Automation Letters. – Vol. 3. – № 4. – P. 3193–3200. – Oct. 2018. – https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2850224.

7 **Yu, J., Chen, Y., Wang, X., Chen, L., Chen, H., Zhou, D., Xu, Y., Ju, Z.** «Video Object Detection Considering Dynamic Neighborhood Feature Multiplexing» in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – Vol. 55. – № 8. – P. 5451–5463. – Aug. 2025. – https://doi.org/10.1109/TSMC.2025.3572123.

8 **Meng, Z., Xia, X., Xu, R., Liu, W. and Ma, J.** «HYDRO-3D: Hybrid Object Detection and Tracking for Cooperative Perception Using 3D LiDAR» in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – Vol. 8. – № 8. – P. 4069–4080. – Aug. 2023. – https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3282567.

9 **Dong H., Sun G., Pang W. -C., Asadi E., Prasad D. K. and Chen I.-M.** «Fast Ellipse Detection via Gradient Information for Robotic Manipulation of Cylindrical Objects» in IEEE Robotics and Automation Letters. – Vol. 3. – № 4. – P. 2754–2761. – Oct. 2018. – https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2836428.

10 **Wang, X., Zhao, J., Jiang, X. and Liu, Y. -H.** «Learning-Based Fabric Folding and Box Wrapping» in IEEE Robotics and Automation Letters. – Vol. 7. – № 2. – P. 5703–5710. – April 2022. – https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3158434.

11 **Yu, B., Hu, M., Sun, Z. and Chen, B.** «Data Tampering Attack Design for ROS-Based Object Detection and Tracking Robotic Platform» 2021 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Xi'an, China. – 2021. – P. 159–164. – https://doi.org/10.1109/ICCAIS52680.2021.9624593.

12 **Cong, Y., Chen, R., Ma, B., Liu, H., Hou, D. and Yang, C.** «A Comprehensive Study of 3-D Vision-Based Robot Manipulation» in IEEE Transactions on Cybernetics. – Vol. 53. – № 3. – P. 1682–1698. – March 2023. – https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3108165.

13 **Yu, S., Zhai, D. -H. and Xia, Y.** «EGNet: Efficient Robotic Grasp Detection Network» in IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 70. – № 4. – P. 4058–4067. – April 2023. – https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3174274.

14 **Voisan, E. -I., Paulis, B., Precup, R. -E. and Dragan, F.** «ROS-based robot navigation and human interaction in indoor environment» 2015 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara, Romania. – 2015. – P. 31–36. – https://doi.org/10.1109/SACI.2015.7208244.

15 **Wei, Z., Wang, S., Chen, K., and Wang, F.** «ROSBased Navigation and Obstacle Avoidance: A Study of Architectures, Methods, and Trends» Sensors. – Vol. 25. – № 14. – P. 4306. – Jul. 2025. – https://doi.org/10.3390/s25144306.

16 **Nguyen T.-T., Truong T. M. H., Nguyen H. T. T., Ngo N. M., Dinh M., Nguyen M. K. N., and Ngo H. Q. T.** «Investigation of Indoor Navigation Based on Proxemics for Mobile Robot Using the Robot Operating System (ROS)» in EAI ICRESM. – 2023. – Springer. – 2024. – P. 547–561. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-60154-5_35.

17 **Prakash, R., Behera, L., Mohan, S. and Jagannathan, S.** «Dual-Loop Optimal Control of a Robot Manipulator and Its Application in Warehouse Automation» in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – Vol. 19. – № 1. – P. 262–279. – Jan. 2022. – https://doi.org/10.1109/TASE.2020.3027394.

18 **Rakhmetova, P., Sergazin, G., Altay, Y., Dauletiya, D., Kurmangaliyeva, L.** Development of in-pipe defects detection and classification system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 1 (9 (133)). – P. 80–89. – https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.323293.

Поступило в редакцию 08.06.26.
Поступило с исправлениями 08.06.26.
Принято в печать 10.06.26.

П. М. Рахметова[1], Н. С. Сембаев[2], *Л. А. Курмангалиева[3], К. М. Искаков[4]
[1,3]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2,4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
08.06.26 ж. баспаға түсті.
08.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
10.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ПРИЗМАЛЫҚ НЫСАНДАРДЫ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ҰСТАУҒА АРНАЛҒАН ROS НЕГІЗІНДЕГІ МЕХАТРОНДЫ ЖҮЙЕНІ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада классикалық компьютерлік көруді аналитикалық ұстауды жоспарлаумен біріктіретін сенімді анықтау және роботтық манипуляцияға арналған ROS негізіндегі деректерді өңдеу құбыры ұсынылған. Құбыр RGB негізіндегі анықтауды, 3D реконструкциясын, 6 дәрежелі еркіндік позасын бағалауды, аналитикалық ұстауды жоспарлауды және модульдік архитектура шеңберінде соқтығыссыз қозғалысты орындауды біріктіреді. Таза машиналық оқытуға негізделген тәсілдерден айырмашылығы, жүйе қосымша деректерді жинау немесе нейрондық желілерді қайта оқыту қажеттілігінсіз түсіндіруге, детерминирленген өнімділікке және орналастыруға дайындыққа баса назар аударады. Сенсор шуына, жарықтандыру ауытқуларына және ішінара окклюзияға беріктік поза бағалауларын уақытша тұрақтандыру және модальды нүктелер арасындағы сәйкестікті тексеру арқылы қол жеткізіледі. Аналитикалық ұстауды жоспарлаушы жоғарыдан төмен және бүйірден ұстау нұсқаларын жасайды және оларды MoveIt бағдарламасындағы күш жабылуының тұрақтылығына, ұстау шектеулеріне, кері кинематикалық мүмкіндікке және соқтығысудан аулақ болуға негізделп бағалайды. Таңдалған ұстау істен шыққан жағдайда қалпына келтіру әрекеттерімен (қайта анықтау, қайта рейтингтеу, қайта жоспарлау) құрылымдалған «алдын ала ұстау-ұстау-көтеру-орын» тізбегін пайдаланып орындалады. Негізгі үлес - позаны бағалауды ресми ұстау сапасын бағалаумен тығыз байланыстыратын, детерминирленген жұмысты, ашық шешім қабылдауды және басқа призмалық нысандар мен аппараттық платформаларға оңай

Кілтті сөздер: робот операциялық жүйесі, анықтау және манипуляциялау, компьютерлік көру, 6-DOF позаны бағалау, қозғалысты жоспарлау.

P. M. Rakhmetova[1], N. S. Sembayev[2], *L. A. Kurmangaliyeva[3], K. M. Iskakov[4]
[1,3]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2,4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 08.06.26.
Received in revised form 08.06.26.
Accepted for publication 10.06.26.

EXPERIMENTAL STUDY OF A ROS-BASED MECHATRONIC SYSTEM FOR AUTOMATED GRASPING OF PRISMATIC OBJECTS

This paper presents a ROS-based pipeline for reliable detection and robotic manipulation that combines classical computer vision with analytical grasp planning. The pipeline integrates RGB-based detection, 3D reconstruction, 6-DoF pose estimation, analytical grasp planning, and collision-free motion execution within a modular architecture. In contrast to purely learning-based approaches, the system emphasizes interpretability, deterministic performance, and deployment readiness without requiring additional data collection or neural-network retraining. Robustness to sensor noise, illumination variation, and partial occlusions is achieved through temporal stabilization of pose estimates and cross-modal consistency validation. The analytical grasp planner generates top and side grasp candidates and evaluates them based on force-closure stability, gripper constraints, inverse-kinematics feasibility, and collision avoidance in MoveIt. The selected grasp is executed through a structured pregrasp–grasp–lift–place sequence with recovery actions (re-detection, re-ranking, re-planning) in case of failure. The main contribution is a unified ROS architecture that closely links pose estimation with formal grasp-quality evaluation, providing deterministic operation, transparent decision-making, and easy adaptation to other prismatic objects and hardware platforms.

Keywords: robot operating system, detection and manipulation, computer vision, 6-DOF pose estimation, Movelt planning.

SRSTI 55.21.99

https://doi.org/10.48081/BGQF2228

L. G. Sulyubayeva[1], D. B. Buitkenov[2], D. R. Baizhan[3], N. E. Berdimuratov[4], *B. A. Alibekova[5]

[1,2,3,4,5]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0239-5849
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-3129
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6880-6439
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7644-4527
*e-mail: balymalibekova304@gmail.com

TRIBOCORROSION PROPERTIES OF ALLOY STEEL BORIDE LAYERS AFTER THERMOCYCLIC ELECTROLYTIC-PLASMA BORIDING

This article presents the results of a study of the tribocorrosion resistance of 30KhGSA alloy steel after diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding (DTEPB). The aim of the study is to evaluate the influence of DTEPB parameters on the formation of the surface layer structure and its behavior under tribocorrosion conditions. The study utilized tribocorrosion tests with simultaneous recording of the friction coefficient and electrochemical parameters, potentiodynamic analysis, as well as scanning electron microscopy and energy-dispersive analysis. It was found that the treatment leads to the formation of a dense boride layer, which significantly increases the material's resistance to tribocorrosion destruction. Optimum characteristics are achieved with a 30 % sodium tetraborate content in the electrolyte: the wear rate is reduced to 1.036×10^{-4} mm²/N m, and the corrosion rate is reduced to 0.00685 mm/year. It has been shown that increasing the number of thermal cycles reduces the defectiveness of the boride layer and enhances its protective properties. The formation of a two-layer structure (oxide and boride layers) reduces the friction coefficient and limits the development of tribocorrosion processes. The obtained results confirm the effectiveness of DTEPB as a method for increasing the tribocorrosion resistance of alloy steels.

Keywords: electrolytic-plasma boriding, tribocorrosion, alloy steel, friction coefficient, wear rate.

Introduction

Modern materials science focuses on developing and optimizing the properties of structural materials, taking into account actual operating conditions. Particular attention is paid to surface layers, as they are the first to experience mechanical loads, exposure to aggressive environments, and temperature fluctuations. In most engineering systems [1–3], failure begins with surface degradation, making surface hardening and protection key to increasing the reliability and durability of products. Among the various approaches

to modifying surface properties, diffusion saturation methods occupy an important place, ensuring the formation of hardened layers with a given structure and composition [4;5].

One of the most promising approaches is diffusion thermocyclic electrolyte-plasma boriding (DTEPB). This method is based on the use of plasma discharges in an electrolyte, which allows for the combination of intense surface heating and saturation with boron under conditions of vapor-gas shell formation [6;7].

Unlike traditional boriding methods (furnace, gas, or powder), DTEPB offers a number of fundamental advantages: high processing speed, localized thermal impact, the ability to precisely control process parameters (voltage, current density, electrolyte composition), and reduced energy consumption. Furthermore, the thermal cycling process promotes the formation of a more uniform and controlled structure of the boride layer, reducing the likelihood of cracks and defects. This makes the method particularly effective for processing alloy steels, which are sensitive to overheating and structural transformations. The relevance of DTEPB increases in conditions where materials are exposed to both mechanical wear and a corrosive environment. Under such conditions, tribocorrosion-a complex process involving the interaction of mechanical failure and electrochemical reactions-occurs. Tribocorrosion leads to accelerated wear, reduced strength, and premature failure of components [4,8–11].

Alloy steels, widely used in mechanical engineering, power engineering, and transportation, are particularly susceptible to tribocorrosion failure when used in aggressive environments. Despite their high strength properties, insufficient resistance of surface layers to the combined effects of friction and corrosion limits the service life of components. Therefore, the development of effective hardening methods capable of simultaneously increasing wear and corrosion resistance is an important scientific and technical challenge [12–16]. Thus, the use of diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding represents a promising approach to improving the tribocorrosion resistance of alloy steels by forming a strong, chemically stable, and wear-resistant boride layer.

The aim of this study is to investigate the tribocorrosion resistance of alloy steel after diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding.

Unlike previous studies devoted to conventional boriding or electrolytic-plasma surface treatments, the present work focuses on the tribocorrosion behavior of 30KhGSA steel after diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding (DTEPB). The novelty of this research lies in the combined investigation of boride layer growth kinetics, diffusion characteristics, tribological performance, and electrochemical behavior under tribocorrosion conditions as a function of borax concentration in the electrolyte. The relationship between processing parameters, boride layer structure, wear resistance, and corrosion resistance is established.

Materials and methods

The study was conducted using alloyed structural steel grade 30KhGSA, widely used in mechanical engineering due to its combination of high strength and satisfactory processability.

Table 1 – Chemical composition of grade 30KhGSA steel, %

Steel	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
30KhGSA	0.28 – 0.34	0.9–1.2	0.8–1.1	up to 0.3	up to 0.025	up to 0.025	0.8 –1.1	up to 0.3

The samples were treated using diffusion thermocyclic electrolyte-plasma boriding, a process based on the complex interaction of electrical, thermal, and hydrodynamic processes occurring in the electrode system under the influence of a high voltage on the electrolyte. This process creates a multiphase environment in which electrochemical reactions on the electrode surface, intense heat and mass transfer, and electrolyte movement under the influence of an electric field simultaneously occur. A 0.1–0.3 mm thick vapor-gas shell consisting of evolved gases (H2, O2, CO2) forms in the electrode zone. At a voltage of 250–320 V, avalanche ionization develops at the electrolyte–gas–metal interface, leading to the formation of a nonequilibrium plasma with an electron temperature of up to 7000 K and a gas temperature of 1200–1500 °C. This process is accompanied by a characteristic glow and a stable distribution of microstreamers, providing charge and heat transfer to the cathode surface. The vapor-gas layer performs a dual function: on the one hand, it serves as electrical insulation, preventing direct contact of the electrolyte with the heated surface, and on the other hand, it promotes a uniform distribution of the electric field and stabilization of the discharge [6]. The treatment was carried out in an aqueous electrolyte based on sodium carbonate (Na_2CO_3) with the addition of sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$), which is a source of boron, with varying concentrations of the components in order to optimize the conditions for the formation of a hardened layer. During electrolytic-plasma treatment, the cathode surface is exposed to intense ion flux and electron impacts, while the temperature reaches 850–1100 °C, which initiates active interaction of iron with boron-containing ions of the electrolyte. BO_3^{3-} and $B(OH)_4^-$ ions, deposited on the cathode surface, are partially reduced to atomic boron, which diffuses into the near-surface layer of the metal, forming the boride phases that are presumed to correspond to FeB and Fe_2B according to the characteristic morphology of the diffusion layer and literature data.

The DTEPB process is shown in Figure 1: Figure 1a shows a schematic diagram of the electrolytic-plasma treatment unit, indicating the cathode (sample), anode (electrolytic bath), power source, and geometric parameters (D is the anode diameter, d is the cathode diameter); Figure 1b shows an image of the process, demonstrating the discharge glow and plasma formation zone around the sample.

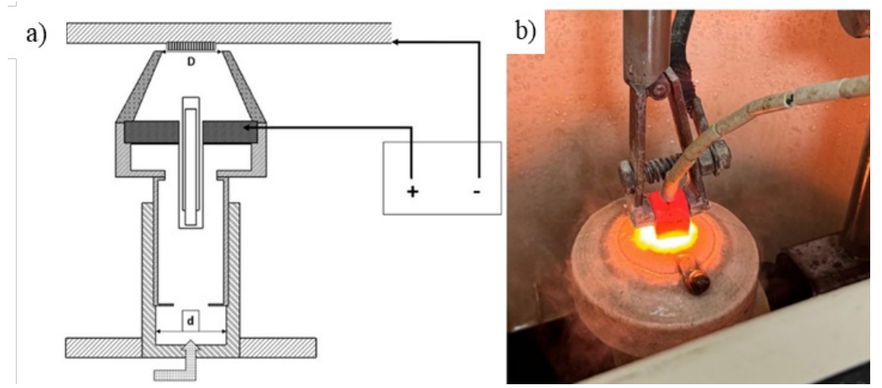


Figure 1 – Schematic representation and actual process of DTEPB of a sample

The electrolyte composition (Table 2) significantly influences the characteristics of the hardened layer. The sodium carbonate (Na_2CO_3) content was maintained at 10 % to ensure stable electrical conductivity, while varying the sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7$ $10H_2O$) concentration allowed for the adjustment of the boriding intensity and layer structure. The treatment was carried out in a thermal cycling regime: at the initial stage, increased voltage was applied to form a vapor-gas shell, while in subsequent stages, the parameters were reduced, ensuring a stable discharge and diffusion saturation of the surface with boron.

Table 2 – Voltage and current density conditions during DTEPB of 30KhGSA steel in electrolytes with varying $Na_2B_4O_7$ $10H_2O$ concentrations

Sample	Electrolyte composition	U_1, V	t_1, s	U_2, V	t_2, s	U_3, V	t_3, s	U_4, V	t_4, s
№ 1	10 % Na_2CO_3 + 10 % $Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$	320	15	200	30	160	300	50	15
№ 2	10 % Na_2CO_3 + 20 % $Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$	320	15	200	30	160	300	50	15
№ 3	10 % Na_2CO_3 + 30 % $Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$	320	15	200	30	160	300	50	15

The test materials consisted of large-sized components, from which samples were selected according to established dimensions. Preliminary separation of the samples was performed on a HOLZMANN BS712TOP-400V metal band saw. A DTQ-5 cutting machine was used to cut samples of the required shape and size. The resulting samples were pressed into phenolic resin using a ZTQ-30S hydraulic press. Grinding operations were performed on a Metapol-2000 grinding and polishing machine using abrasive paper of varying grit sizes, ranging from P150 to P2500, with successively smaller abrasive particles. After mechanical processing, a final polishing with an aqueous aluminum oxide suspension was performed to achieve a mirror-like surface. To reveal the microstructure of the test materials, the surface of the sections was chemically etched in a 4% nitric acid

solution in ethyl alcohol (Nital's reagent). The microstructure of the test samples was examined using an SEM3200 scanning electron microscope. Tribocorrosion tests were conducted using a ball-on-disk setup with an Anton Paar TRB3 tribometer integrated with an Autolab PGSTAT potentiostat (Metrohm Autolab, Netherlands) (Fig. 2a-b). This approach allowed for the simultaneous recording of mechanical and electrochemical parameters of the friction pair interaction during testing. During the experiments, the system operated in potentiostat regime, with the computer continuously recording the potential and current density values. The contact pair consisted of a stationary Si_3N_4 ball with a diameter of 6 mm and a flat metal sample with an open surface area of ≈25 mm². The tests were carried out in a 3.5% aqueous NaCl solution at room temperature (~25 °C).

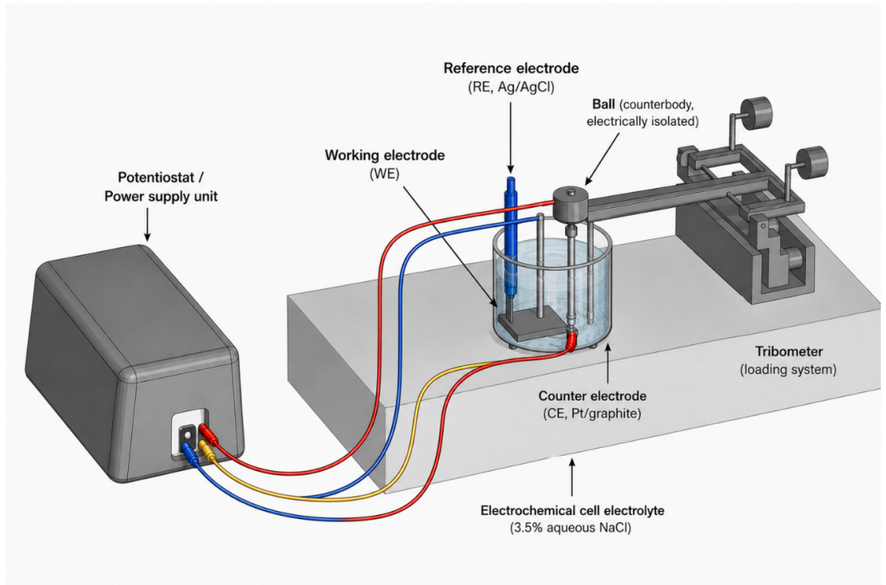


Figure 2 – Schematic diagram of the tribocorrosion testing setup, including a potentiostat, a three-electrode electrochemical cell and a tribometric loading system

Results and discussion

The formation of boride phases during diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding occurs as a result of the complex interaction of electric discharge, plasma-chemical, and diffusion processes. In the anode zone, the electrolyte is ionized by an electric discharge, forming a vapor-plasma shell saturated with active boron-containing ions, which are reduced on the steel surface and interact with the iron. Local heating to 1000–1200°C occurs in the microarc discharge zones, activating boron diffusion into the metal and the formation of Fe_2B phases in the subsurface region and FeB phases in the surface zone. Repeated thermal cycles promote structural densification, uniform

boron distribution, and phase stabilization, forming a dense two-layer boride layer with high hardness, wear resistance, and thermal stability. The electrolyte composition (Table 2) significantly influences the formation and properties of the hardened layer. In all regimes, the sodium carbonate (Na_2CO_3) concentration was maintained at 10 %, ensuring stable electrical conductivity and discharge stability. Varying the sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7$ $10H_2O$) content, which serves as a boron source, allowed for targeted adjustment of the intensity of surface diffusion saturation, as well as the phase composition and morphology of the resulting boride layer. The treatment was carried out in a thermal cycling regime with a stepwise change in the electrical parameters. At the initial stage, increased voltage and current density were used, which facilitated the formation of a stable vapor-gas shell and the initiation of plasma discharges. In subsequent stages, the parameters were reduced, ensuring discharge stabilization, a uniform thermal regime, and effective diffusion saturation of the surface with boron, forming a hardened layer with the desired structure and properties.

Microstructural analysis (Figure 3) revealed the formation of a boride layer with a characteristic saw-tooth morphology. A thin oxide layer is observed on the cross-sectional surface (indicated by the dark region), which formed during cooling after diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding (DTEPB). To determine the chemical composition of the boride layer, energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) was performed on the cross-sections of the borided samples. The analysis was carried out from the surface boride layer toward the transition zone (Figure 3). The EDS results showed that the boron content in the boride layer ranged from 7.83 to 12.24 wt.%, while the iron content varied from 81.43 to 89.13 wt.%. These results confirm the formation of iron boride phases and indicate effective boron diffusion into the steel surface during the boriding process.

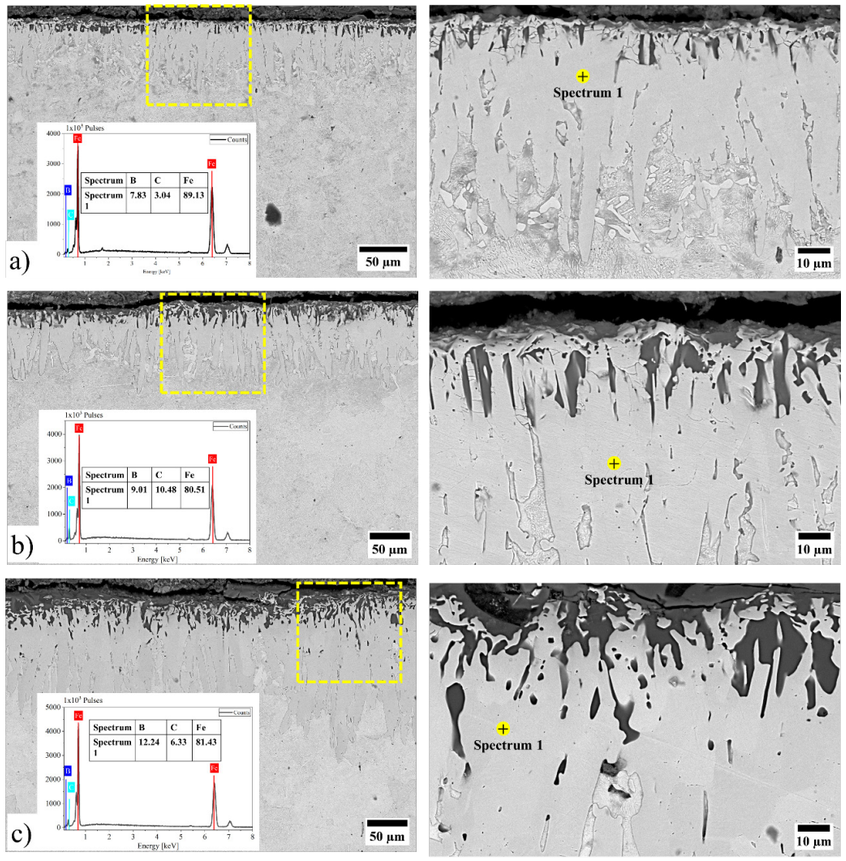
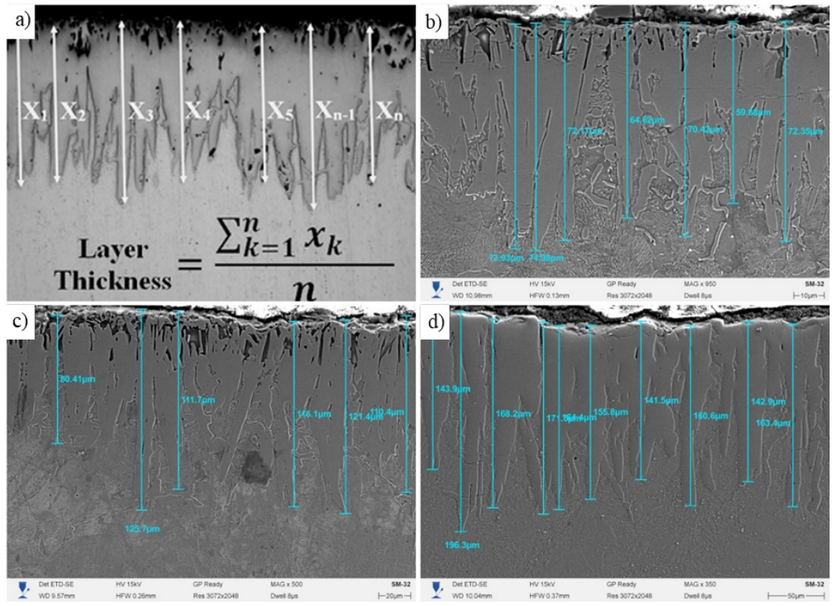


Figure 3 – Microstructure of the borated layer of 30KhGSA steel after DTEPB at different processing temperatures: a – 1; b – 2; c – 3

Figure 3 shows a sequence of measurements of the thickness of the boride layers obtained on the surface of 30KhGSA steel after diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding (DTEPB) in three different processing regimes. Measurements were carried out in several zones of each sample using software built into a scanning electron microscope (SEM), which made it possible to determine the average layer thickness using the formula shown in the image (Fig. 3,a). The microstructure (Fig. 3,b), corresponding to Regime 1, shows the formation of a uniform boride layer with a thickness of 64 to 74 µm, with an average value of about 68 µm, which indicates a stable but moderate saturation of the surface with boron at a low boron potential of the electrolyte. In the image (Fig. 3,c), related to Regime 2, the layer thickness increases: the minimum values reach 80 µm, and the maximum - 125 µm, the average thickness is approximately 110 µm. This indicates a more active diffusion process caused by an

increase in the concentration of $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ and, as a consequence, an increase in the boron potential of the electrolyte.

The micrograph (Fig. 4d), corresponding to regime 3, shows the most intense formation of the boride layer, where the thickness varies between 143–196 µm, with an average value of approximately 160 µm. This demonstrates a significant acceleration of diffusion processes, which is associated with an increase in the borax concentration to 30 %, ensuring a high degree of ionization of boron-containing particles in the plasma zone.



a) Schematic diagram of the method for determining the average layer thickness; b) Microstructure of the boride layer in regime 1; c) Microstructure of the boride layer in regime 2; d) Microstructure of the boride layer in regime 3

Figure 4 – Thickness measurement of boride layers formed on 30KhGSA steel under different thermocyclic electrolytic-plasma boriding regimes

The growth of the boride layer was assumed to be diffusion-controlled. Therefore, the kinetics of layer formation were analyzed using the classical parabolic growth model widely applied for boride coatings. The kinetics of boride layer growth during thermocyclic electrolytic-plasma boriding (TEPB) of 30KhGSA steel obeys a parabolic diffusion law, reflecting the dependence of layer thickness x on processing time t. According to Fick's second law, the transfer of boron atoms in the solid phase is described by expression 1:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

where C – boron concentration at a point with coordinate x at time t, D - boron diffusion coefficient in the Fe_2B phase. The solution to this equation under the boundary conditions $C(x=0,t)=C_s$ and $C(x=u,t)=C_0$ is the concentration distribution function according to expression

$$C(x,t) = Cs + (C_0 - C_S)\mathrm{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad (2)$$

From this solution it follows that the thickness of the boride layer at fixed values of concentrations on the surface (C_s) and in the substrate (C_0) is proportional to the square root of time, which is described by expression 3:

$$x^2 = Kt \quad (3)$$

where K – parabolic growth constant, numerically equal to expression 4:

$$K = 2\sqrt{D} \cdot erf^{-1}(\frac{C(x,t)-C_S}{C_0-C_S}) \quad (4)$$

If we consider the concentration ratio $(C(x,t)-C_s)/(C0 - C_s)$ to be constant within the studied range of temperatures and concentrations, then $K \approx k\sqrt{D}$, and then the diffusion coefficient can be determined as formula 5:

$$D = \frac{x^2}{t} \quad (5)$$

Thus, the square of the layer thickness is proportional to the processing time, which experimentally confirms the parabolic nature of the growth kinetics of the Fe_2B layer (Table 3).

The diffusion model is based on the assumption of diffusion-controlled Fe_2B layer growth and follows the classical parabolic growth law widely used for boriding processes.

Table 3 – Calculation of the diffusion coefficient D and the growth constant K

Regime	Concentration of borax, %	Layer thickness, μm	x, m	time, s	$K = x^2/t$, m^2/s	$D = K/4$, m^2/s
№ 1	10	68	6.8×10^{-5}	1200	3.85×10^{-12}	9.63×10^{-13}
№ 2	20	110	1.10×10^{-4}	1200	1.01×10^{-11}	2.53×10^{-12}
№ 3	30	160	1.60×10^{-4}	1200	2.13×10^{-11}	5.33×10^{-12}

The obtained data show that the thickness of the boride layer increases with increasing borax concentration in the electrolyte, which is due to the growth of the boron potential of the medium and the increase in the density of active B^+ ions participating

in diffusion saturation. In regime 1 (10% $Na_2B_4O_7$), the process is slow: the diffusion coefficient $D = 9.6 \times 10^{-13}$ m^2/s, and the layer thickness is approximately 68 μm. Increasing the borax concentration to 20% (regime 2) causes the diffusion coefficient to increase to 2.5×10^{-12} m^2/s, and the layer thickness reaches ~110 μm. Maximum activity is observed at 30% $Na_2B_4O_7$ (regime 3), where diffusion accelerates more than 5-fold, $D = 5.3 \times 10^{-12}$ m^2/s, and the layer thickness increases to ~160 өм.

The $x^2 = Kt$ dependence for all regimes exhibits parabolic kinetics, confirming that Fe_2B layer growth is limited by boron atom diffusion. According to the Arrhenius equation in formula 6:

$$K = K_0\exp(-\frac{Q}{RT}) \quad (6)$$

where K_0 is the pre-exponential factor, R = 8.314 J/(mol×K), and T = 1223 K, the diffusion activation energy can be estimated to be $Q \approx 180–200$ kJ/mol, which is consistent with published data for the FeB and Fe_2B boride phases [19].

As shown in the tribological test results (Figures 5a–b), the borax concentration significantly affects the friction and wear behavior of the borided layer. For the sample treated in the electrolyte containing 10% borax (Sample No. 1), the friction coefficient stabilized within the range of 0.60–0.65, indicating relatively uniform sliding conditions. The sample processed with 20% borax (Sample No. 2) exhibited a higher friction coefficient of approximately 0.70–0.75 and more pronounced fluctuations, which may be associated with the formation and fragmentation of brittle surface products during sliding.

The best tribological performance was achieved for the sample treated in the electrolyte containing 30% borax (Sample No. 3). During the initial stage of testing, the friction coefficient remained at approximately 0.42–0.44 and subsequently stabilized at about 0.60. This behavior can be attributed to the formation of a hard boride layer providing improved resistance to wear. Correspondingly, the wear rate decreased to the minimum value of 1.036×10^{-4} $mm^3/(N \cdot m)$, which is approximately 54 % lower than that of the untreated steel.

Electrochemical studies (Figure 5c) demonstrated that DTEPB treatment improved the corrosion resistance of 30KhGSA steel. The polarization curves revealed a shift of the corrosion potential toward more noble values and a reduction in corrosion current density after boriding. These changes indicate the formation of a dense and chemically stable boride layer that acts as an effective barrier against the penetration of aggressive species. The improved corrosion behavior confirms the protective effect of the boride layer formed during electrolytic-plasma boriding.

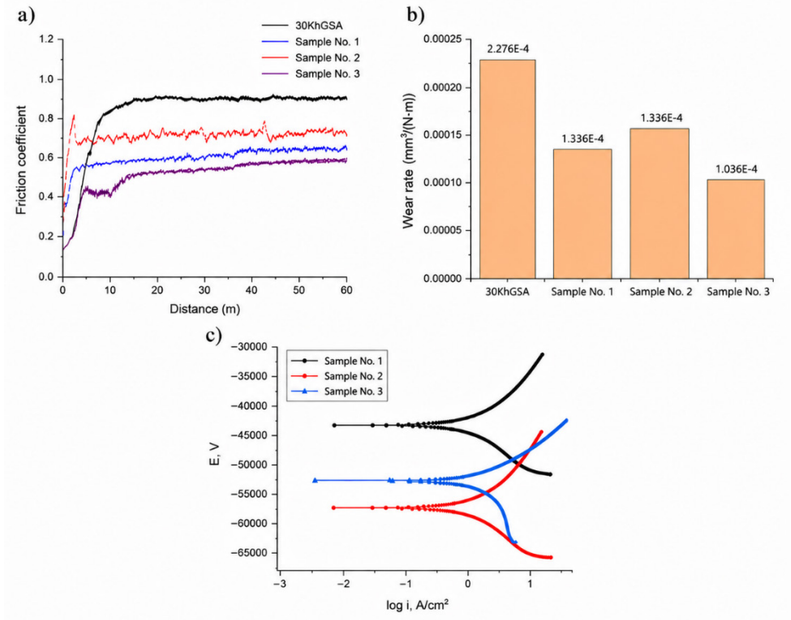


Figure 5 – Results of tribocorrosion tests of 30KhGSA steel after DTEPB: (a) friction coefficient as a function of sliding distance; (b) wear rate; (c) potentiodynamic polarization curves

The obtained results are in good agreement with recent studies devoted to borided steels, in which the formation of FeB and Fe_2B phases was shown to improve surface hardness, wear resistance, and corrosion protection. García-León et al. demonstrated that boride layers on AISI 316L stainless steel reduce tribocorrosion damage under wet sliding conditions due to the formation of a hard protective surface layer [18]. A similar tendency was reported by Alkan et al. for borided HSLA steel, where boriding increased resistance to combined mechanical wear and electrochemical degradation [19]. Compared with these works, the present study shows that thermocyclic electrolytic-plasma boriding provides an effective protective layer on 30KhGSA steel within a shorter processing time, which can be attributed to rapid plasma heating, electrolyte activation, and cyclic diffusion saturation.

The increase in boride layer thickness from approximately 68 to 160 μm with increasing $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ concentration agrees with the diffusion-controlled mechanism of Fe_2B layer growth. Orihel et al. reported that the growth of diiron boride layers is mainly controlled by boron diffusion and strongly depends on boron activity, temperature, and treatment duration [20]. Therefore, the increase in the effective diffusion coefficient from 9.63×10^{-13} to 5.33×10^{-12} m²/s in this work can be explained by the higher boron potential of the electrolyte and the more intensive generation of active boron-containing species in the plasma zone.

At the same time, the tribological behavior of the borided layer depends not only on its thickness but also on its morphology and defectiveness. The higher friction coefficient and stronger fluctuations observed for Sample № 2 may be related to partial fracture of brittle surface regions during sliding. In contrast, Sample № 3 showed the lowest wear rate, indicating the formation of a denser and more wear-resistant boride layer. This confirms that an optimized boriding regime can provide a favorable combination of layer thickness, structural integrity, wear resistance, and corrosion protection.

Table 4 – Corrosion properties of 30KhGSA steel after DTEPB treatment depending on the concentration of $Na_2B_4O_7$ $10H_2O$

	Sample № 1	Sample № 2	Sample № 3
EW, g/mol	27.434	27.434	27.434
p, g/cm³	7.85	7.85	7.85
A, cm²	0.785	0.785	0.785
I_{corr}, mA/cm²	0.7662	0.54007	0.47038
i_{corr}, A	0.976050955	0.687987261	0.599210191
CR, mm/year	0.011154233	0.007862264	0.006847727

Thus, the obtained results indicate that optimization of DTEPB parameters, in particular borax concentration and thermal cycling regimes, enables the formation of a multilayer boride layer with high microhardness, wear resistance, and corrosion resistance. The most effective regime is one containing 30 % $Na_2B_4O_7$ $10H_2O$, providing a comprehensive improvement in the performance characteristics of 30KhGSA steel.

Financing information

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № BR24992879).

Conclusions

Diffusion thermocyclic electrolytic-plasma boriding effectively improves the tribocorrosion resistance of 30KhGSA steel. Increasing the sodium tetraborate concentration from 10 to 30 % promotes the growth of the boride layer from approximately 68 to 160 μm and increases the diffusion coefficient from 9.63×10^{-13} to 5.33×10^{-12} m²/s. The specimen treated in the electrolyte containing 30 % $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ exhibited the best performance, with the minimum wear rate of 1.036×10^{-4} mm²/(N·m) and the lowest corrosion rate of 0.00685 mm/year. The formation of a dense two-layer structure contributes to reduced friction and enhanced protection against tribocorrosion degradation. The obtained results demonstrate the potential of DTEPB technology for industrial applications in machine-building and mining equipment subjected to simultaneous wear and corrosion. Future studies should focus on thermocyclic effects, phase composition verification, and combined surface engineering treatments.

REFERENCES

1 **Zhen-yu, Z., Zhi-guo, J., Qiu-yang, Z., Yu, L., Zhi-peng, Y., Cong, D., Zhong-yu, P.** Research on the Construction of Gradient Nanostructure and Anti-Tribocorrosion Behavior of Aluminum Alloy Surface. Tribology International. – 2024. – 194. – 109448. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109448.

2 **Wieczorek, D., Ulbrich, D., Stachowiak, A., Bartkowski, D., Bartkowska, A., Petru, J., Hajnyš, J., Popielarski, P.** Mechanical, Corrosion and Tribocorrosion Resistance of Additively Manufactured Maraging C300 Steel. Tribology International. – 2024. – 195. – 109604. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109604.

3 **Pino, C. A., Esguerra-Arce, J., Amigó, V., Klyatskina, E., Ayala-Garcia, C., Alvarez, O., Maranon, A., Porras, A., Bermudez-Castañeda, A., Hernandez, C.** Influence of Cashew Nut Shell Liquid on Corrosion and Tribocorrosion Behavior of Metallic Alloys. Wear. – 2024. – 548–549. – 205392. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205392.

4 **Ortiz-Domínguez, M., Keddam, M., Morales-Robles, Á. J.** Characterizations and Boron Diffusion Modelling on the AISI H13 Steel. J min metall B Metall. – 2024. – 60. – P. 353–365. – https://doi.org/10.2298/JMMB240423029O.

5 **Jumbad, V. R., Chel, A., Verma, U., Kaushik, G.** Application of electrolytic plasma process in surface improvement of metals: A review. Letters in Applied NanoBioScience. – 2020. – Vol. 9. – №. 3. – P. 1249–1262.

6 **Sulyubayeva, L., Berdimuratov, N., Baizhan, D., Alimbekuly, T., Alibekova, B.** Effect of Electropolishing on the Microstructure and Tribological Properties of Electrolyte-Plasma Borided Layers on 30KhGSA Steel. Materials. – 2025. – 18. – 4867. – https://doi.org/10.3390/ma18214867.

7 **Meiirbekov, M. N., Ismailov, M. B. Kenzhegulov, A. K., Mustafa, L. M., Tashmukhanbetova, I. B.** Study of the Effect of Combined Reinforcement and Modification of Epoxy Resin with Rubbers on the Impact Strength of Carbon Fiber-Reinforced Plastic. Eurasian j. phys. funct. mater. – 2024. – 8. – 23–32. – https://doi.org/10.32523/ejpfm.2024080103.

8 **Tarasov, I. K., Osmakova, V. E., Taran, A. V., Tarasov, A. M., Nikolaychuk, G. P.** Electrolytic-plasma processing and boriding of various surfaces. Problems of Atomic Science and Technology. – 2024. – P. 100–103. – https://doi.org/10.46813/2024-154-100.

9 **Rafique, R., Poulsen, T. G., Nizami, A.-S., Asam, Z.-Z., Murphy, J. D., Kiely, G.** Effect of Thermal, Chemical and Thermo-Chemical Pre-Treatments to Enhance Methane Production. Energy. – 2010. – 35. – P. 4556–4561. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.011.

10 **Meletis, E. I., Nie, X., Wang, F. L., Jiang, J. C.** Electrolytic Plasma Processing for Cleaning and Metal-Coating of Steel Surfaces. Surface and Coatings Technology. – 2002. – 150. – P. 246–256. – https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01521-3.

11 **Gui, W., Lin, J., Hao, G., Qu, Y., Liang, Y., Zhang, H.** Electrolytic Plasma Processing-an Innovative Treatment for Surface Modification of 304 Stainless Steel. Sci Rep. – 2017. – 7. – 308. – https://doi.org/10.1038/s41598-017-00204-w.

12 **Satbayeva, Z., Maulit, A., Ispulov, N., Baizhan, D., Rakhadilov, B., Kusainov, R.** Electrolytic Plasma Nitriding of Medium-Carbon Steel 45 for Performance Enhancement. Crystals. – 2024. – 14. – 895. – https://doi.org/10.3390/cryst14100895.

13 **Hariharasakthisudhan, P., Varun Kumar, A., Sathickbasha, K., Katiyar, J. K.** Tribocorrosion Challenges and Surface Engineering Strategies for Magnesium-Based Biodegradable Materials: A Critical Review. Tribology International. – 2025. – 210. – 110824. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110824.

14 **Feyzi, M., Fallahnezhad, K., Hashemi, R.** Tribocorrosion at Metal-on-Metal Contacts: The Contributing Role of Geometry and Material Combination. Corrosion Science. – 2023. – 215. – 111047. – https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111047.

15 **Possoli, F. A. A., Souza, A. P. N., Bernardelli, E. A., Borges, P. C.** Tribocorrosion Assessment of Low-Temperature Plasma Nitrided Super Duplex Stainless Steel. Surface and Coatings Technology. – 2024. – 479. – 130572. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130572.

16 **De Stefano, M., Ruggiero, A.** Tribocorrosion of Couplings in Seawater Environment: An Investigation on the Positive-Negative Role of Synergy. Tribology International. – 2024. – 200. – 110143. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110143.

17 **Türkmen İ., Yalamaç E., Keddam M.** Investigation of tribological behaviour and diffusion model of Fe2B layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel. Surface and Coatings Technology. – 2019. – 377. – 124888.

18 **García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Palomar-Pardavé, M., Lartundo-Rojas, L., Guevara-Morales, A., & Martínez-Gutiérrez, H.** Tribochemical products on borided AISI 316L steel exposed to Hank's solution. Wear. – 2024. – 538. – 205209.

19 **Alkan, S., Günen, A., Gülen, M., & Gök, M. S.** Effect of boriding on tribocorrosion behaviour of HSLA offshore mooring chain steel. Surface and Coatings Technology. – 2024. – 476. – 130276.

20 **Orihel P., Keddam M., Jurči P.** Growth, characterization, and kinetic modeling of diiron boride layers on W302 steel. Journal of Materials Research. – 2025. – 1–11.

Received 20.04.26.
Received in revised form 24.04.25.
Accepted for publication 08.06.26.

Л. Г. Сулюбаева[1], Д. Б. Буйткенов[2], Д. Р. Байжан[3],
Н. Е. Бердімуратов[4], *Б. Ә. Әлібекова[5]
[1,2,3,4,5]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
20.04.26 ж. баспаға түсті.
24.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
08.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТЕРМОЦИКЛДІ ЭЛЕКТРОЛИТТІ-ПЛАЗМАЛЫҚ БОРЛАУДАН КЕЙІНГІ ЛЕГИРЛЕНГЕН БОЛАТТЫҢ БОРИДТІ ҚАБАТТАРЫНЫҢ ТРИБОКОРРОЗИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Мақалада 30ХГСА легирленген болатының диффузиялық термоциклдік электролитті-плазмалық борлаудан (ДТЭПБ) кейінгі трибокоррозиялық төзімділігін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – ДТЭПБ параметрлерінің беткі қабат құрылымының қалыптасуына және оның трибокоррозиялық әсер жағдайындағы мінез-құлқына ықпалын бағалау. Жұмыста үйкеліс коэффициенті мен электрохимиялық параметрлерді бір мезгілде тіркей отырып трибокоррозиялық сынақтар, потенциодинамикалық талдау, сондай-ақ сканерлеуші электрондық микроскопия және энергодисперсиялық талдау қолданылды. Өңдеу нәтижесінде материалдың трибокоррозиялық бұзылуға төзімділігін едәуір арттыратын тығыз боридті қабаттың қалыптасатыны анықталды. Ең тиімді сипаттамалар электролит құрамында натрий тетраборатының мөлшері 30 % болғанда байқалады: тозу қарқындылығы 1,036×10⁻⁴ мм²/Н· м-ге дейін, ал коррозия жылдамдығы 0,00685 мм/жыл-ға дейін төмендейді. Термоциклдер санының артуы боридті қабаттың ақаулылығын азайтып, оның қорғаныш қасиеттерін арттыратыны көрсетілді. Екі қабатты құрылымның (оксидті және боридті қабаттар) қалыптасуы үйкеліс коэффициентін төмендетіп, трибокоррозиялық процестердің дамуын шектейді. Алынған нәтижелер ДТЭПБ әдісінің легирленген болаттардың трибокоррозиялық төзімділігін арттырудағы тиімділігін растайды.

Кілтті сөздер: электролитті-плазмалық борлау, трибокоррозия, легирленген болат, үйкеліс коэффициенті, тозу қарқындылығы.

Л. Г. Сулюбаева[1], Д. Б. Буйткенов[2], Д. Р. Байжан[3],
Н. Е. Бердімуратов[4], *Б. Ә. Әлібекова[5]
[1,2,3,4,5]Восточно-Казахстанский Университет имени Сарсена Аманжолова,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 20.04.26.
Поступило с исправлениями 24.04.26.
Принято в печать 08.06.26.

ТРИБОКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА БОРИДНЫХ СЛОЁВ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО БОРИРОВАНИЯ

В статье представлены результаты исследования трибокоррозионной стойкости легированной стали 30ХГСА после диффузионного термоциклического электролитно-плазменного борирования (ДТЭПБ). Целью исследования является оценка влияния параметров ДТЭПБ на формирование структуры поверхностного слоя и его поведение в условиях трибокоррозионного воздействия. В работе применены трибокоррозионные испытания с одновременной регистрацией коэффициента трения и электрохимических параметров, потенциодинамический анализ, а также изучения сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионный анализ. Установлено, что обработка приводит к формированию плотного боридного слоя, существенно повышающего устойчивость материала к трибокоррозионному разрушению. Оптимальные характеристики достигаются при содержании 30 % тетрабората натрия в электролите: интенсивность изнашивания снижается до 1,036×10⁻⁴ мм²/Н·м, а скорость коррозии – до 0,00685 мм/год. Показано, что увеличение числа термоциклов способствует снижению дефектности боридного слоя и повышению его защитных свойств. Формирование двухслойной структуры (оксидный и боридный слои) обеспечивает снижение коэффициента трения и ограничивает развитие трибокоррозионных процессов. Полученные результаты подтверждают эффективность ДТЭПБ как метода повышения трибокоррозионной стойкости легированных сталей.

Ключевые слова: электролитно-плазменное борирование, трибокоррозия, легированная сталь, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

ҒТАМР 55.03.35

https://doi.org/10.48081/BGQF2229

Ж. Б. Тошов[1], К. Т. Шеров[2], *А. В. Маздубай[3], С. Қардыбай[4], Х. Б. Теміртас[5]

[1]И. Кәрімов атындағы Ташкент мемлекеттік техникалық университеті, Узбекистан Республикасы, Ташкент қ.;

[2,4]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

[3,5]Торайғыров университеті, Павлодар қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4278-1557

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2683-9484

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6580-2085

*e-mail: mazdubay.a@teachers.tou.edu.kz

ҮШШАРОШКАЛЫ БҰРҒЫЛАУ ҚАШАУЛАРЫНЫҢ ТОЗУ СЕБЕПТЕРІ МЕН ДИНАМИКАЛЫҚ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ КҮЙІН ЗЕРТТЕУ

Үшшарошкалы бұрғылау қашаулары – тау-кен өнеркәсібіндегі ең ауыр жүктемелі элементтердің бірі. Қазақстанда ашық карьерлерде бұрғылау жұмыстарының үлесі пайдалы қазбаларды өндіру құнының 40 %-на жетеді, сондықтан қашау тозуының себептерін зерттеу ерекше өзекті. Осы жұмыста тістердің сынуы, эрозиялық тозу, шарошкалардың ілінісуі, температуралық жарықтар, металл бойынша жұмыс істеу және эксцентрлі тозу сияқты он алты ақау түрі жүйелі түрде қарастырылды. Олардың ішіндегі ең көп тарағандары – тістердің сынуы (7 %) және металл тозуы (7 %). Кернеулі-деформациялық күйді бағалау үшін Джонсон–Кук моделінің модификацияланған нұсқасы қолданылды. Бұл модель деформациялық қатаюды, деформация жылдамдығына сезімталдықты және температуралық әсерлерді бір уақытта ескереді. ANSYS кешеніндегі сандық модельдеу 30 кН осьтік жүктеме және 100 айн/мин жағдайында орындалды. Нәтижелер көрсеткендей, ең жоғары эквивалентті кернеу (14,38 МПа) тістің жынысқа алғаш ену сәтінде пайда болады – дәл осы аймақта фрагментация барынша қарқынды жүреді. Алынған деректер конструкцияның осал тұстарын анықтауға, бұрғылау режимдерін оңтайландыруға және қашаулардың қызмет ету мерзімін ұзартуға тікелей негіз болады. Сонымен қатар, ұсынылған тәсіл болашақта әртүрлі тау жыныстары мен динамикалық жүктеме жағдайлары үшін қашау конструкциясын алдын ала бағалауға және материалдардың тозуға төзімділігін арттыру бойынша мақсатты шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: үшшарошкалы қашау, бұрғылау құралдары, тозу механизмдері, кернеулі-деформациялық күй, ANSYS модельдеуі, Джонсон–Кук моделі, тау жыныстары, сандық талдау.

Кіріспе

Қазақстанда ашық кен орындарын өндірудегі бұрғылау жұмыстары негізінен жалпы өндірістік үрдістер үшін маңызды болып саналатын шарошкалы бұрғылау құралдарын пайдалану арқылы жүзеге асырылады. Ұңғымаларды бұрғылау – ол көп еңбекті қажет ететін және қымбат процесс. Бұрғылау жұмыстарының көпшілігі шарошкалы бұрғылау құралдарымен орындалады. Ал тау жыныстарын бұзуға арналған 100-ден астам бұрғылау құралдары бар. Бұрғылау жұмыстарының құны пайдалы қазбаларды өндірудің жалпы құнының 25–40 %-ын құрайды.

Бүгінгі таңда ұңғымаларды бұрғылау бүкіл әлемде маңызды рөл атқарады, бұрғылау жабдықтары мен құралдарын таңдау минералды өндіру құнына әсер етеді. Үшшарошкалы бұрғылау құралын пайдаланған кезде кескіш тістердің тез тозуы, мойынтіректердің істен шығуы және қашаулардың беріктігі тау жыныстарын кесетін құралдың тиімділігіне әсер етеді. Сондықтан, барлық жағдайларда тек бұрғылау қашауын таңдау тиімсіз, және бұл бұрғылау жағдайларын оңтайландыруға да қатысты. Жобалау және құрылыс кезінде ең тиімді геометриялық параметрлерді анықтау арқылы бұрғылау қашауының кинетикалық сипаттамаларын оңтайландыру ең энергия үнемдейтін бұрғылау құралдарын әзірлеуге мүмкіндік береді, бұл бүгінде инженерлерден жоғары өнімді техникалық және технологиялық шешімдерді әзірлеуді талап етеді [1, 162-б.].

Республикада жаңа кен орындарын игеру бойынша бірқатар маңызды жобалар аяқталды, бұл минералды өндіруді арттыру үшін озық практикалық шараларды енгізуді талап етеді. Республикада кен өндіру өнеркәсібінің дамуы да бұрғылау жұмыстарының көлемін арттырып отыр. Бұрғылау процесінің қарқындануы Қазақстан Республикасы Үкіметінің өнімділікті арттыру және минералды өндіру құнын төмендету бойынша алға қойған мақсаттарына жетуге көмектесетін факторлардың бірі болып табылады. Қазақстан Республикасының экономиканы одан әрі дамыту және либерализациялауға бағытталған стратегиясында макроэкономикалық тұрақтылықты және экономикалық өсімнің жоғары қарқынын сақтау қажеттілігі атап көрсетілген. Атап айтқанда, ашық карьерлік өндіруді арттыру, дайын өнімнің құнын төмендету және жылдық өндірісті арттыру ұлттық экономиканың бәсекеге қабілеттілігін арттыру үшін ерекше маңызды. Тиісінше, өндіру көлемінің артуы және өндіру, мұнай және газ салаларындағы геологиялық барлау жұмыстары бұрғылау қондырғыларына, соның ішінде бұрғылау құралдарына сұранысты арттырады. Бұл өз кезегінде жоғары сапалы бұрғылау құралдарына қажеттілікті арттырады және тау-кен және металлургия өнеркәсібінде үлкен ғылыми және практикалық маңызға ие [2, 336-б.].

Бұрғылау жұмыстарының құнын төмендету, ең алдымен, оңтайлы бұрғылау режиміне және бұрғылау құралдарын таңдауға байланысты. Геометриялық параметрлерді оңтайландыру, бұрғылау шығындарын азайту және бұрғылау ұштарының беріктігін арттыру тау-кен өндірісіндегі өзекті мәселелер болып табылады. Дегенмен, бұрғылау ұштарының құнын төмендету, бұрғылау жылдамдығын арттыру және бұрғылау ұштарының сенімділігін арттыруға

байланысты мәселелер шешілмеген күйінде қалып отыр, және бұл мәселелерді шешу қазір барған сайын маңызды болып келеді.

Пайдалы қазбаларды ашық әдіспен өндіру жер асты әдісімен салыстырғанда қауіпсіздігі, жеңілдігі және басқаруға қолайлылығының арқасында кен өндірудің басым түрі болып табылады [3].

Жоғары құны мен еңбек сыйымдылығына байланысты ашық тау-кен жұмыстарында бұрғылау-жару жұмыстары негізгі өндірістік процестердің бірі болып саналады.

Ашық кен өндіру барысында бұрғылау жұмыстарының өзіндік құнын төмендету пайдалы қазбаларды өндірудің жалпы шығындарын тіпті жартысына дейін қысқартуға мүмкіндік береді.

Бұрғылау-жару жұмыстарын оңтайландыру жетілдірілген, тиімділігі жоғары бұрғылау қашауларын қолдану, олардың түрлерін дұрыс таңдау және берілген тау-кен техникалық жағдайларда қолдану технологиясын жетілдіру арқылы жүзеге асырылады.

Жаңа карьерлердің игерілуіне және бұрғылау жұмыстары көлемінің тұрақты түрде артуына, тау жыныстарын бұзу жағдайларының күрделенуіне байланысты әртүрлі типтегі жоғары тиімді жыныс бұзушы құралдарға деген қажеттілік өсуде. Бұл бұрғылау қашауларының параметрлерін және бұрғылау режимдерін қысқа мерзім ішінде оңтайландыру қажеттілігіне әкеледі.

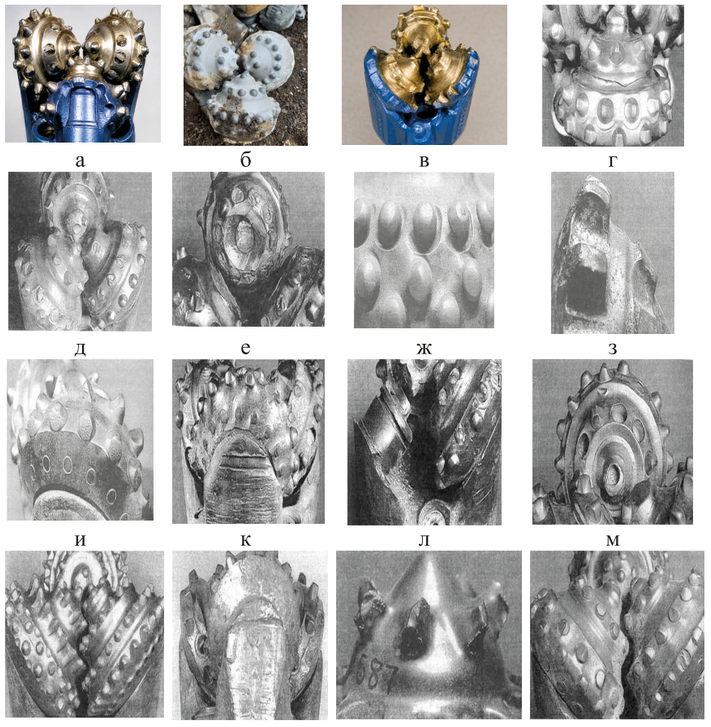
Қазіргі таңда мұндай күрделі міндеттерді жылдам шешудің бірден-бір тиімді жолы – заманауи модельдеу әдістерін қолдану арқылы жыныс бұзушы құралдарды жобалау болып табылады.

Қашау конструкциясының оңтайлы түрін жасау бұрғылау жылдамдығы, тұрақтылығы және ұзақ қызмет ету мерзімі арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етуді талап етеді, бұл бүгінгі күні күрделі мәселелердің бірі болып отыр.

Дамып келе жатқан Қазақстан жағдайында шығынды аз талап ететін әдістерді қолдана отырып, жоғары тиімді жаңа типтегі жыныс бұзушы бұрғылау құралдарын әзірлеу – ғылымның өзекті мәселесі болып табылады. Бұл мәселені шешу ірі тау-кен өнеркәсіптік кәсіпорындардың экономикалық тиімділігін арттыруға ықпал етеді [4, 77–85-бб.].

Материалдар мен әдістер

1-суретте үшшарошкалы қашаулар тістерінің негізгі тозу және бұзылу түрлері көрсетілген.



а – шарошкалардың сынуы – BC; б – тістердің сынуы – BT;
в – сальник тәрізді түзілімнің пайда болуы – BU; г – шарошкадағы жарықтар – CC; д – шарошкалардың ілінісуі – CI; е – шарошкалардың ішкі тәждерінің тозуы – CR; ж – эрозиялық тозу – ER; з – тістердің биіктігі бойынша тозуы – FC; и – температуралық жарықтар – HC;
к – металл бойынша жұмыс істеу – JD; л - шарошканың жоғалуы – LC; м – тісшелердің түсіп қалуы – LT; н – эксцентрлі тозу – OC;
п – қашаудың кептелуі – PB; р – тістердің өздігінен қайралуы – SS;
с – рейка тәрізді түзілімнің пайда болуы – TR [5, 44–45-бб.]
1-сурет – Үшшарошкалы қашаулар тістерінің негізгі тозу және бұзылу түрлері

Шарошкалардың сыну себебі (1сурет, а) тіректің тозуы (бұзылуы) салдарынан шарошкалардың ілінісіп қалуы, бұрғылау тізбегін түсіру немесе ұзарту кезінде ұңғыма қабырғасындағы кертпештерге соғылуы, ұңғыма түбіне соғылуы және металдың күкіртсутектік морттануы болуы мүмкін. Кейбір тау жыныстарында тістердің сынуы қатты қорытпалы қаруланған бар қашаулар үшін қалыпты тозу түрі болып табылады және міндетті түрде қашауды немесе бұрғылау режимін

дұрыс таңдамауды білдірмейді (1-сурет, б). Тістердің сынуы келесі жағдайларда орын алады:

– ұңғыма түбінде металл заттардың болуы;

– қашаудың шығыңқы жерлерге немесе ұңғыма түбіне соғылуы;

– қашауға шамадан тыс жүктеменің түсуі, әдетте бұл жағдайда ішкі (төбелік) және ортаңғы тәждердің тістері сынуға бейім болады;

– айналу жиілігінің шамадан тыс жоғары болуы, әдетте бұл жағдайда сыртқы (перифериялық) тәждердің тістері сынуға бейім болады;

– қашаудың дұрыс жұмысқа бейімделмеуі (дұрыс приработка жасалмауы).

Берілген қашау үшін тау жынысының шамадан тыс қатты болуы.

Шарошкаларында сальник тәрізді түзілім пайда болған қашау тістердің тозуымен сипатталады (1-сурет, в), бұл бір немесе бірнеше шарошка арасындағы кеңістіктің тау жынысы бөлшектерімен толып қалуы салдарынан олардың сырғанауынан туындайды:

– ұңғыма түбінің жеткіліксіз тазартылуы;

– жуу сұйықтығының айналымы болмаған жағдайда қашаудың жұмыс істеуі;

– жабысқақ тау жыныстарын бұрғылау [6, 1–8 бб.].

Шарошкадағы жарықтар шарошканың сынуына немесе жоғалуына әкелетін процестің бастапқы кезеңі болып табылады және көптеген себептердің салдары болуы мүмкін (1-сурет, г). Төменде жарықтардың пайда болуына әкелетін негізгі себептер келтірілген:

– ұңғыма түбінде металл заттардың болуы;

– қашаудың шығыңқы жерге немесе ұңғыма түбіне соғылуы;

– бұрғылау тізбегінің құлауы;

– күкіртсутектік морттану;

– қашаудың қызып кетуі;

– эрозиялық тозу салдарынан шарошка қабырғалары қалыңдығының азаюы;

– шарошкалардың ілінісуі [7, 251-б.].

Шарошкалардың ілінісуі (1-сурет, д) көбінесе тәжаралық ойықтардың тозуына және тістердің сынуына әкеледі, әрі кейде қате түрде тістердің тау жынысымен зақымдануы ретінде қабылданады.

Бұл жағдайда тістердің сынуы қашаудың дұрыс таңдалмағанын білдірмейді.

Шарошкалардың ішкі тәждерінің тозуы – CR (1-сурет, е) шарошкалардың ішкі (төбелік) тәждері тозған және (немесе) сынған кезде, ұңғыма түбінде керннің пайда болуымен қатар жүреді. Мұның себептері төмендегідей:

– тау жынысының абразивтілігі шарошкалардың төбелік тәждерінің тозуға төзімділігінен жоғары болуы;

– жаңа қашаудың дұрыс жұмысқа бейімделмеуі (дұрыс приработка жасалмауы);

– тісшелердің жоғалуымен қатар жүретін шарошка корпусының тозуы;

– шарошкалардың бұзылған төбелік тәждерінен ұңғыма түбіне түскен металл бөлшектерінің болуы.

Гидроабразивтік эрозия шарошка корпусы қалыңдығының азаюына немесе толық тозуына әкеледі (1-сурет, ж). Қатты қорытпалы қаруланулы бар қашауларда

бұл тісшелердің түсіп қалуына себеп болады. Төменде эрозиялық тозуға әкелетін кейбір себептер келтірілген:

– ұңғыма түбінде рейка тәрізді түзілімнің пайда болуы, қашаудың эксцентрлі айналуы немесе қашауға шамадан тыс жүктеменің түсуі салдарынан абразивті тау жыныстарының шарошка корпусымен жанасуы;

– ұңғыма түбінің жеткіліксіз жуылуы нәтижесінде тау жынысының абразивті бөлшектерімен шарошка корпусының тозуы;

– жуу сұйықтығы ағыны жылдамдығының шамадан тыс жоғары болуы;

– бұрғылау ерітіндісінің нашар тазартылуы.

Тістер өздерінің толық биіктігі бойынша, шарошка корпусына дейін тозуы мүмкін (1-сурет, з).Мұндай тозу түрі тау жынысының түрі, тістердің қапталуы (наплавка), бұрғылау режимі сияқты көптеген факторларға байланысты. Бұл тозу түрінің себебі, мысалы, жоғары айналу жиілігі кезінде қашауға түсетін жүктеменің аз болуы болуы мүмкін.

Температуралық жарықтар – HC (1-сурет, и) тау жынысы бойымен сырғанау нәтижесінде тістердің қызып кетуі және кейін жуу сұйықтығымен бірнеше рет салқындауы кезінде пайда болады.

Металл бойынша жұмыс істеу іздері қашаудың кез келген бетінде ойықтар (вмятина) түрінде анықталуы мүмкін (1-сурет, к). Металлмен жанасып жұмыс істеу тістердің сынуына, лапалардың қорғаныш бөліктерінің зақымдануына және қашаудың төзімділігінің төмендеуіне әкеледі. Мұндай жағдайларда жаңа қашауды түсірмес бұрын ұңғыма түбін тазарту қажет [8, 24–27 бб.].

Бір немесе бірнеше шарошканың жоғалуының себептері көп (1-сурет, л). Төменде олардың кейбірі келтірілген:

– қашаудың тізбекті түсіру немесе ұзарту кезінде ұңғыма түбіне немесе кертпешке соғылуы;

– бұрғылау тізбегінің құлауы;

– тіректің зақымдануы, нәтижесінде бекіту (құлыптау) құрылғысының бұзылуы;

– күкіртсутектік морттану.

Кейбір жағдайларды қоспағанда, жоғалған шарошка бұрғылауды қайта бастамас бұрын ұңғыма түбінен шығарылуы тиіс.

Қатты қорытпалы тісшелердің толық түсіп қалуы (1сурет, м) тісшелердің сынуына қарағанда қашаудың анағұрлым ауыр зақымдануына әкеледі. Тісшелердің түсіп қалуы көбінесе қашаудың металлмен жұмыс істеуіне себеп болады. Кейде тісшелердің түсуінің алдында олардың шарошка тесіктерінде бұрылып кетуі байқалады.

Эксцентрлі тозу – OC (1-сурет, н) қашау геометриялық орталығы мен ұңғыма геометриялық орталығы сәйкес келмеген кезде пайда болады. Нәтижесінде ұңғыма диаметрі ұлғаяды. Эксцентрлі тозуды шарошка корпусының тістер арасындағы тозуынан, шарошкалардың бірінің калибрлеуші бетінің күштірек тозуынан және бұрғылау жылдамдығының әдеттегіден төмен болуынан байқауға болады. Көп

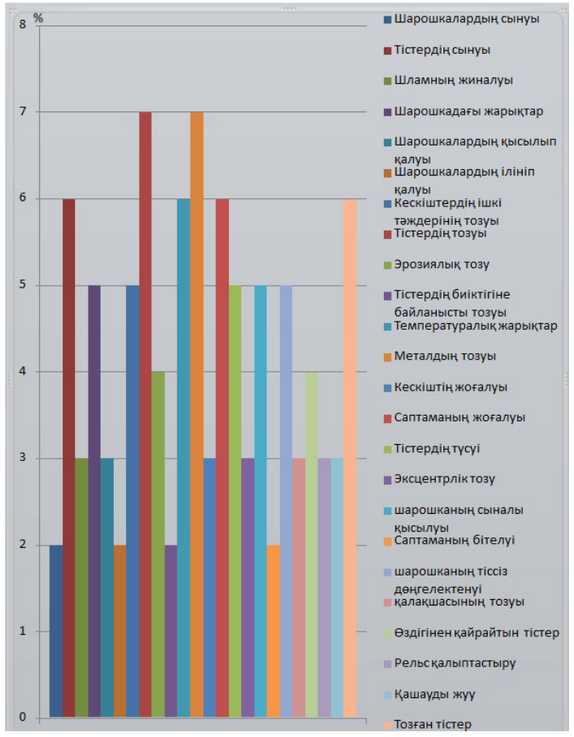
жағдайда бұл тозу түрін қашаудың түрін ауыстыру арқылы жоюға болады, бұл ұңғыма түбінде жаңа із қалдыруға мүмкіндік береді [9, 140-бб.].

Қашаудың кептелуі (1-сурет, п) оның бастапқы диаметрден кіші болып механикалық деформациялануынан туындайды. Кептелу тістердің сынығына, шарошкалардың ілінісуіне және қаруланудың басқа да көптеген зақымдану түрлеріне әкеледі.

Тістердің өздігінен қайралуы – SS (1р-суретті қараңыз), бұл тозу түрі тістер ұштарының өткір күйде сақталуымен сипатталады.

Рейка тәрізді түзілімнің пайда болуы – TR (1с-суретті қараңыз), бұл тозу түрі шарошка тістерінің тісті доңғалаққа ұқсап, ұңғыма түбінде рейка тәрізді із қалыптастыруы кезінде пайда болады. Бұл жағдайда тістердің кіретін немесе шығатын қырлары тозады, сондай-ақ тістер арасындағы шарошка корпусының тозуы байқалады. Кейбір жағдайларда рейка тәрізді түзілімнің пайда болуын жұмсақтау тау жыныстарын бұрғылауға арналған қашауларды қолдану және (немесе) ұңғыма түбіндегі гидростатикалық қысымды мүмкіндігінше төмендету арқылы болдырмауға болады [10, 77–87-бб.].

2-суретте шарошкалы қашаулардың тозу себептері көрсетілген.



2-сурет – Шарошкалы қашаулардың тозу себептері

Үшшарошкалы қашаулардың тозу тәсілдерін талдаулар нәтижесінде 100 % үлестің жоғарыда көрсетілген тозу түрлеріне байланысты ең үлкен тозулар тістердің тозуы 7 %, металдың тозуы 7 % құрайтынын көрсетеді, сонымен қатар келесі тозулар диаграммада көрсетілгендей үлестерімен орналасқан.

Практикада бұрғылау процесі динамикасының есептерін сандық модельдеу арқылы шешу үшін негізінен белгілі бір эмпирикалық модульдер қолданылады. Ортадағы аққыштық шегіндегі кернеулі-деформациялық күйді анықтау есептері деформацияның, деформация жылдамдығының және температураның функциясы түрінде есептеледі [11, 224-б.].

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \tag{1}$$

Жоғары дәлдікпен шешілетін функция әртүрлі динамикалық процестерге сәйкес келіп, бұрғылау қашауы элементтерінің тау жынысымен өзара әрекеттесу физикалық процесінің динамикасын бағалауға мүмкіндік береді.

Көп жағдайда эмпирикалық модельдердің басым бөлігінде жоғарыда көрсетілген кернеу функциясы көбейтінді түрінде қабылданады:

$$\sigma = f_1(\varepsilon) \cdot f_2(\dot{\varepsilon}) \cdot f_3(T) \tag{2}$$

мұндағы f_1, f_2, f_3 – сызықтық, дәрежелік және экспоненциалдық түрде берілген біріктірілген функциялар;

ε – деформация;

$\dot{\varepsilon}$ – деформация жылдамдығы;

T – температура [12; 77–47-бб.].

Осы эмпирикалық жолмен алынған модельдердің ішіндегі ең белгілісі – Джонсон–Кук моделі. Ол температураға тәуелді тұтқыр-пластикалық тау жынысының реакцияларын анықтауға мүмкіндік береді, мұнда үш әсер біріктірілген:

– деформациялық қатаю әсері;

– деформация жылдамдығына сезімталдық;

– температура өзгеру әсерлері.

Модельдің жалпы формуласы келесі түрде болады [13]:

$$\sigma_p = (A + B\varepsilon_p{}^n)\left(1 + C\, ln\dot{}\, \varepsilon_p\right)\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \tag{3}$$

(3) формуланың температуралық әсерді сипаттайтын бөлігін өзгерту арқылы Джонсон–Кук моделі келесі түрде де өрнектелуі мүмкін:

$$\sigma_p = (A + B\varepsilon_p{}^n)\left(1 + C\, ln\dot{}\, \varepsilon\right)[1 - D(T - T_0)] \tag{4}$$

$$\sigma_p = (A + B\varepsilon^n)\left(1 + C\,ln\,\dot{\varepsilon}^*\right) exp\left[-D\left(\frac{T - T_r}{T_m}\right)\right] \quad (5)$$

Белгілі болғандай, Тейлор қатарына сәйкес логарифмдік функция арқылы өрнектеледі $ln(x+1) = \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{x^n}{n}, \quad -1 \le x \le 1$. Егер бұл формуланы (3) модельге қолдансақ, келесі өрнек алынады:

$$\sigma_p = (A + B{\varepsilon_p}^n)\left(1 + C\left(\dot{\varepsilon}_p - 1 - \frac{(\dot{\varepsilon}_p - 1)^2}{2} + O(\dot{\varepsilon}_p^3)\right)\right)\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right], \; 0 < \dot{\varepsilon}_p \le 1 \quad (6)$$

(6) өрнек тау жынысының кернеулі-деформациялық күйін жоғары дәлдікпен есептеуге мүмкіндік береді.

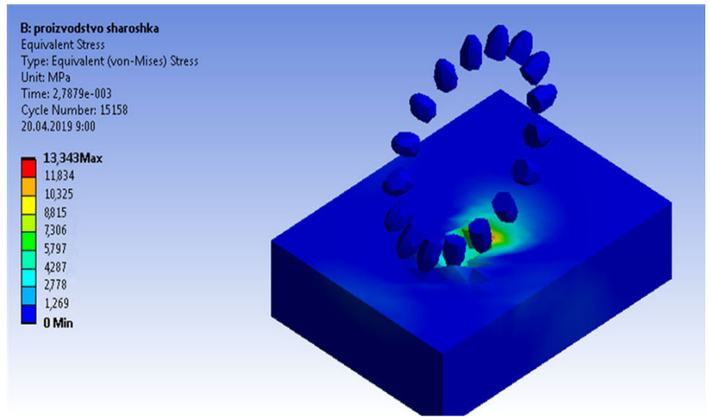
Нәтижелер және талқылау

Динамикалық кернеулі-деформациялық күйді модельде көрсету үшін ANSYS бағдарламалық кешенінде уақытқа тәуелді фон Мизес кернеуі таңдалды.

30 кН осьтік жүктеме және 100 айн/мин бұрыштық жылдамдық жағдайында сериялық қашаудың шарошка тістерінің тау жынысымен өзара әрекеттесуін қарастырайық [14, 1591–1596-бб.].

Жыныстың бұзылуы жанасу аймағына ену есебінен, яғни шарошка тістерінің жынысқа соққылы-айналмалы әсері арқылы жүзеге асады (3-сурет).

3-суретте сериялық қашаудың шарошка тістерінің жыныспен жанасу аймағындағы эквивалентті кернеу көрсетілген.



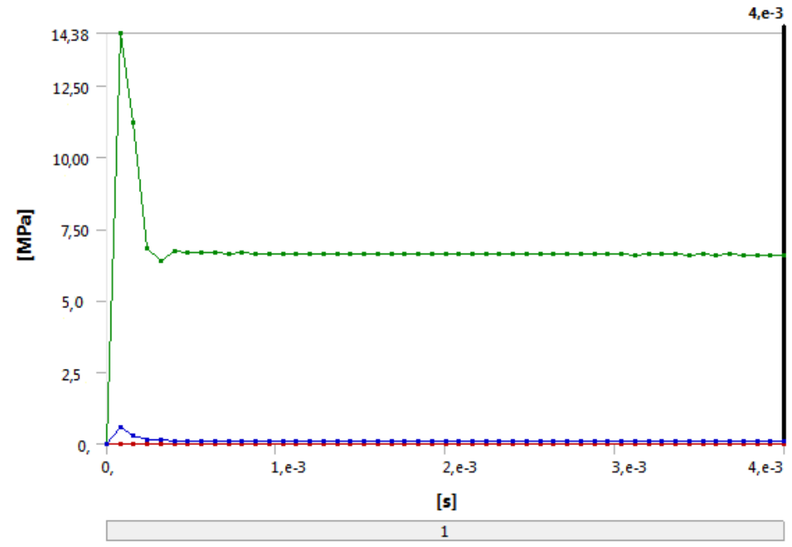
3-сурет – Сериялық қашаудың шарошка тістерінің тау жынысымен жанасу аймағындағы эквивалентті кернеу

Фрагментацияны шешім алу бағдарламасында бақылауға болады, бұл кезде тістер тау жынысына еніп, өзінің бастапқы құрылымдық қасиетін жоғалтқан соң, жыныс бұзыла бастайды.

Тістер мен жыныс арасындағы жанасу аймақтарындағы кернеулердің шамасы мен бағыты бүкіл жүйенің кернеулі-деформациялық күйін анықтайды (3-суретті қараңыз) және бағдарламаның жұмыс аймағының сол жақ бөлігіндегі түстік шкала арқылы сипатталады. Түстік гамма жанасу аймағындағы қысу күштерінің (теріс мәндер) және созылу күштерінің (оң мәндер) бар екенін көрсетеді [15, 110–116-бб.]. Бұл жағдайда тістерде де, жыныста да қысу кернеуі байқалмайды.

3-суретте сериялық қашаудың шарошка тістері тау жынысына енген кезде жыныстың бойлық бағытында созылу күштері байқалатынын көруге болады. Жыныс бетінде сары және қызыл түсті аймақтар бұл учаскелерде жыныстың созылуға ұшырап, құрылымдық беріктігін жоғалтатынын және нәтижесінде осы бөліктің бұзылуына әкелетінін көрсетеді. Көк түсті аймақ шкала бойынша жыныстың аз созылғанын және оны бұзуға жеткілікті күштің жоқ екенін білдіреді.

4-суретте кернеудің уақытқа байланысты өзгеру графигі көрсетілген.



4-сурет – Уақытқа байланысты кернеудің өзгеру графигі

Графикте (4-суретті қараңыз) симуляцияның басында кернеудің ең жоғары мәнге жететіні көрсетілген, бұл шарошканың соққылы-айналмалы қозғалыстағы тістерінің тау жынысымен алғашқы жанасу нүктесінде максималды созылу кернеуі пайда болатынын білдіреді (тістің жынысқа енуі кезінде).

Ең жоғары кернеу мәні 14,38 МПа-ға тең, ол кезде осьтік жүктеме мен соққылы-айналмалы қозғалыс әсерінен шарошка тістері жанасу аймағындағы

тау жынысын бұзады. Тіс пен жыныс арасындағы жанасу бөлігіндегі қызыл түс негізгі фрагментация процесі жүріп жатқан аймақты көрсетеді.

Эквивалентті кернеудің тербелісі шекті мәнге жеткеннен кейін де жалғасады, бірақ неғұрлым қарқынды түрде байқалады.

Қорытындылар

Үшшарошкалы қашаулардың тозу себептерін зерттеу нәтижелері көрсеткендей, көп жағдайда тозудың негізгі себептері тістердің сынуы және сынық түсуі, металл бойынша жұмыс істеу, қондырмалардың жолдарының бітелуері болып табылады.

Тау жынысының деформациясына байланысты кернеулі-деформациялық күй теңдеуін шешудің аналитикалық әдісі ұсынылды. Бұл әдіс бұрғылау қашауы элементтерінің тау жынысымен өзара әрекеттесу процесі динамикасын бағалауға арналған математикалық модельге негізделген.

Бұрғылау қашауы мен тау жынысының өзара әрекеттесу процесін кешенді талдау арқылы конструкциялық модельдің әлсіз тұстарын бастапқы жобалау кезеңінде анықтау және жою үшін сандық модельдеу әдісін қолдану ұсынылады.

Алдағы уақытта температура мен деформация жылдамдығына байланысты ортадағы кернеулі-деформациялық күйді зерттеу ғылыми және практикалық тұрғыдан қызығушылық тудырады.

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырған AP26195643 «Күрделі құрылымды кен орындарын бұрғылауға арналған бұрғылау құралдарының конструкциясын жетілдіру және тозуға төзімділігін арттыру» жобасы аясында орындалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Тошов, Ж. Б., Елемесов, К. К., Шеров, К. Т., Тошниёзов, Л. Г., Баскенбаева, Д. Д.** Моделирование энергоэффективных буровых инструментов для бурения взрывных скважин [Текст]. – Алматы : Изд-во КНТИУ имени К. Сатпаева, 2025. – 162 с.

2 **Нескоромных, В. В.** Разрушение горных пород при бурении скважин [Текст]. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2015. – 336 с.

3 **Toshov, Zh. B., Sherov, K. T., Toshov, B. R., Mazdubay, A., Nakhangov, Kh. N., Baratov, B. N., Kardybay, S., Esirkepov, A., Temirtas, Kh.** Studies Of The Stress-Strain State Of Rocks Under The Impact Of Penetrators Of Various Configurations Using The Ansys Software Package [Текст] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11.

4 **Федоров, Б. В., Хузина, Л. Б., Ратов, Б. Т., Шарауова, А. Б.** Моделирование процесса углубления скважины долотами PDC [Текст] // Нефть и газ. – Алматы, 2017. – № 4. – С. 77–85.

5 **Абатуров, В. Г.** Повышение эффективности буровых работ с помощью алмазно-твердосплавных долот [Текст] // Сборник научных трудов. – Т. 1. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2006. – С. 44–45.

6 **Пяльченков, В. А., Смолин, Н. И.** Распределение осевой нагрузки и крутящего момента по зубкам шарошечного долота [Текст] // Современные проблемы науки и образования. – Тюмень, 2015. – С. 1–8.

7 **Балаба, В. И., Бикбулатов, И. К., Вышегородцева, Г. И., Гинзбург, Э. С., Керщенбаум, В. Я., Оганов, А. С.** Буровой породоразрушающий инструмент : учебное пособие для вузов [Текст]. – М. : РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2013. – 251 с.

8 **Бронников, И. Д., Тошов, Ж. Б., Нахангов, Х. Н.** Критерии оценки работоспособности одношарошечных буровых долот [Текст] // Инженер-нефтяник. – Москва, 2016. – № 2. – С. 24–27.

9 **Закиров, Н. Н.** Технико-технологические основы долговечности работы шарошечных долот : монография [Текст]. – Тюмень : ТИУ, 2018. – 140 с.

10 **Шеров, К. Т., Ходжибергенов, Д. Т., Окимбаева, А. Е., Уралов, Б. К.** Шарошкалы бұрғылау қашауларының құрылымдарын зерттеу [Текст] // Наука и техника Казахстана. – Павлодар : Изд-во «Кереку» ПГУ им. С. Торайгырова, 2019. – № 2. – С. 77–87.

11 **Кузнецов, В. Г., Кулябин, Г. А., Долгушин, В. В., Шешукова, Г. Н.** Моделирование процессов строительства скважин [Текст]. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. – 224 с.

12 **Қанаев, А. Т., Богомолов, А. В., Қанаев, А. А.** Плазмалық орнықкан доңғалақты болаттың беріктігі мен тозуға төзімділігін арттыру [Текст] // Наука и техника Казахстана. – Павлодар : Изд-во «Кереку» ПГУ им. С. Торайгырова, 2018. – № 2. – С. 77–87.

13 **Chen, Sh.** Пат., США № 6412577 B1 от 02.07.2002 г. Roller-cone bits, systems, drilling methods, and design methods with optimization of tooth orientation [Текст].

14 Toshov, J. B., Toshniyozov, L. G. Research Into The Interaction Of Industrial Tricone Bit's Buttons With Rock During Drilling [Текст] // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2020. – Vol. 29. – No. 11s. – P. 1591–1596.

15 **Пяльченков, В. А.** Критерии работоспособности вооружения буровых шарошечных долот [Текст] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – Тюмень, 2016. – С. 110–116.

REFERENCES

1 **Toshov, Zh. B., Elemesov, K. K., Sherov, K. T., Toshniyozov, L. G., Baskenbayeva, D. D.** Modelirovanie energoeffektivnyh burovyh instrumentov dlya bureniya vzryvnyh skvazhin [Modeling of energy-efficient drilling tools for blast-hole drilling] [Text]. – Almaty : K. Satpayev KNRTU Publishing House, 2025. – 162 p.

2 **Neskoromnykh, V. V.** Razrushenie gornyh porod pri burenii skvazhin [Rock destruction during well drilling] [Text]. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2015. – 336 p.

3 T**oshov, Zh. B., Sherov, K. T., Toshov, B. R., Mazdubay, A., Nakhangov, Kh. N., Baratov, B. N., Kardybay, S., Esirkepov, A., Temirtas, Kh.** Studies of the

Stress-Strain State of Rocks Under the Impact of Penetrators of Various Configurations Using the ANSYS Software Package [Text]. In Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11.

4 **Fedorov, B. V., Khuzina, L. B., Ratov, B. T., Sharauova, A. B.** Modelirovanie processa uglubleniya skvazhiny dolotami PDC [Modeling the process of well deepening using PDC bits] [Text]. In Neft i gaz. – Almaty, 2017. – № 4. – P. 77–85.

5 **Abaturov, V. G.** Povyshenie effektivnosti burovyh rabot s pomoshchyu almazno-tverdosplavnyh dolot [Improving drilling efficiency using diamond-carbide bits] [Text]. In Collection of Scientific Papers. – Vol. 1. – Tyumen : TyumGNGU Publishing House, 2006. – P. 44–45.

6 **Pyalchenkov, V. A., Smolin, N. I.** Raspredelenie osevoi nagruzki i krutyashchego momenta po zubkam sharoshechnogo dolota [Distribution of axial load and torque among roller-cone bit teeth] [Text]. In Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – Tyumen, 2015. – P. 1–8.

7 **Balaba, V. I., Bikbulatov, I. K., Vyshegorodtseva, G. I., Ginzburg, E. S., Kershenbaum, V. Ya., Oganov, A. S.** Burovoi porodorazrushayushchii instrument : uchebnoe posobie dlya vuzov [Drilling rock-cutting tools : textbook for universities] [Text]. – Moscow : Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2013. – 251 p.

8 **Bronnikov, I. D., Toshov, Zh. B., Nakhangov, Kh. N.** Kriterii ocenki rabotosposobnosti odnosharoshechnyh burovyh dolot [Criteria for evaluating the performance of single-cone drill bits] [Text]. In Inzhener-neftyanik. – Moscow, 2016. – № 2. – P. 24–27.

9 **Zakirov, N. N.** Tehniko-tehnologicheskie osnovy dolgovechnosti raboty sharoshechnyh dolot : monografiya [Technical and technological foundations of roller-cone bit durability : monograph] [Text]. – Tyumen : Tyumen Industrial University, 2018. – 140 p.

10 **Sherov, K. T., Khodzhibergenov, D. T., Okimbayeva, A. E., Uralov, B. K.** Sharoshkaly burgylau qashaularynyng qurylymdaryn zertteu [Investigation of roller-cone drill bit structures] [Text]. In Nauka i tehnika Kazakhstana. – Pavlodar : Kereku Publishing House, S. Toraighyrov PSU, 2019. – № 2. – P. 77–87.

11 **Kuznetsov, V. G., Kulyabin, G. A., Dolgushin, V. V., Sheshukova, G. N.** Modelirovanie processov stroitelstva skvazhin [Modeling of well construction processes] [Text]. – Tyumen : TyumGNGU, 2011. – 224 p.

12 **Kanayev, A. T., Bogomolov, A. V., Kanayev, A. A.** Plazmalyq ornyqqan donggalakty bolattyng beriktigi men tozuga tozimdiligin arttiru [Increasing the strength and wear resistance of plasma-hardened wheel steel] [Text]. In Nauka i tehnika Kazakhstana. – Pavlodar : Kereku Publishing House, S. Toraighyrov PSU, 2018. – № 2. – P. 77–87.

13 **Chen, Sh.** Roller-cone bits, systems, drilling methods, and design methods with optimization of tooth orientation : Patent US No. 6,412,577 B1 dated 02.07.2002 [Text].

14 **Toshov, J. B., Toshniyozov, L. G.** Research Into The Interaction Of Industrial Tricone Bit's Buttons With Rock During Drilling [Text]. In International Journal of Advanced Science and Technology. – 2020. – Vol. 29. – № 11s. – P. 1591–1596.

15 **Pyalchenkov, V. A.** Kriterii rabotosposobnosti vooruzheniya burovyh sharoshechnyh dolot [Performance criteria of roller-cone drill bit cutting structures] [Text]. In Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Neft i gaz. – Tyumen. – 2016. – P. 110–116.

05.06.26 ж. баспаға түсті.
05.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
09.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Ж. Б. Тошов[1], К. Т. Шеров[2], *А. В. Маздубай[3], С. Қардыбай[4], Х. Б. Теміртас[5]
[1]Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, Республика Узбекистан, г. Ташкент;
[2,4]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[3,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 05.06.26.
Поступило с исправлениями 05.06.26.
Принято в печать 09.06.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ИЗНОСА ТРЁХШАРОШЕЧНЫХ БУРОВЫХ ДОЛОТ И ИХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Трёхшарошечные буровые долота – одни из самых нагруженных элементов в горной промышленности. В Казахстане доля буровых работ на открытых карьерах достигает 40 % от себестоимости добычи полезных ископаемых, поэтому изучение причин износа долот приобретает особую актуальность. В данной работе систематически рассмотрены шестнадцать типов отказов, среди которых разрушение зубьев, эрозионный износ, заклинивание шарошек, температурные трещины, наработка по металлу и эксцентричный износ. Наиболее распространёнными оказались поломка зубьев (7 %) и износ металла (7 %). Для оценки напряжённо-деформированного состояния использована модифицированная версия модели Джонсона–Кука. Эта модель одновременно учитывает деформационное упрочнение, чувствительность к скорости деформации и температурные эффекты. Численное моделирование в комплексе ANSYS выполнялось при осевой нагрузке 30 кН и угловой скорости 100 об/мин. Результаты показали, что максимальное эквивалентное напряжение (14,38 МПа) возникает именно в момент первого внедрения зуба в породу – именно в этой зоне фрагментация протекает наиболее интенсивно. Полученные данные служат непосредственной основой для выявления слабых мест конструкции, оптимизации режимов бурения и увеличения срока службы долот. Кроме того, предлагаемый подход в будущем позволит предварительно оценивать конструкцию долота для различных типов горных пород и условий

динамического нагружения, а также принимать целенаправленные решения по повышению износостойкости материалов.

Ключевые слова: трёхшарошечное долото, буровой инструмент, износ зубьев, напряжённо-деформированное состояние, численное моделирование, ANSYS, модель Джонсона–Кука, горная порода.

Zh. B. Toshov[1], K. T. Sherov[2], A. V. Mazdubay[3], S. Kardybay[4], Kh. B. Temirtas[5]
[1]Islam Karimov Tashkent State Technical University,
Republic of Uzbekistan, Tashkent;
[2,4]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[3,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 05.06.26.
Received in revised form 05.06.25.
Accepted for publication 09.06.26.

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF WEAR OF TRICONE DRILL BITS AND THEIR DYNAMIC STRESS-STRAIN STATE

Tricone drill bits are one of the most heavily loaded elements in the mining industry. In Kazakhstan, the share of drilling operations in open quarries reaches 40% of the cost of mineral extraction, so the study of the causes of chisel wear is especially relevant. In this work, sixteen types of defects were systematically considered, such as tooth breakage, erosive wear, clutch of gears, temperature cracks, work on metal and eccentric wear. The most common of these are tooth breakage (7 %) and metal wear (7 %). A modified version of the Johnson-Cook model was used to assess the stress–strain state. This model takes into account deformation hardening, sensitivity to deformation rates and temperature effects at the same time. Numerical modeling in the ANSYS complex was performed under conditions of 30 KN axial load and 100 rpm. The results showed that the highest equivalent voltage (14.38 MPA) occurs at the moment when the tooth first enters the rock – it is in this area that fragmentation occurs most intensively. The data obtained serve as a direct basis for identifying design vulnerabilities, optimizing drilling modes and extending the service life of bits. In addition, the proposed approach will allow in the future to evaluate the chisel design in advance for various rock and dynamic load conditions and make targeted decisions to increase the wear resistance of materials.

Keywords: tricone drill bit, drilling tool, wear mechanisms, stress-strain state, numerical simulation, ANSYS, Johnson–Cook model, rock fragmentation.

SRSTI 55.29.31
https://doi.org/10.48081/BGQF2230

T. T. Sharatbekov[1], B. N. Absadykov[2], E. S. Askarov[3]
[1,2]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]International Transport and Humanitarian University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5101-6933
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7829-0958
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4487-4458
*e-mail: sharatbekov.t@stud.satbayev.university

MAIN DESIGN FEATURES AND CONCEPTUAL JUSTIFICATION OF CAM-SCREW MECHANICAL PRESSES

This paper presents a review and conceptual design justification of a mechanical press with a combined cam-screw actuator and a bottom-mounted drive. A comparative analysis of existing press equipment is conducted in order to identify the limitations of traditional crank, screw, toggle, and eccentric press designs. Based on this analysis, a conceptual layout of a cam-screw mechanical press with a lower drive arrangement is proposed as a promising direction for further engineering development.

The paper discusses the possibility of using a cam profile to provide smoother tool approach to the workpiece and to reduce impact interaction during the initial stage of deformation. The proposed approach is considered at the conceptual level and forms the basis for further development of a detailed kinematic and dynamic model. Preliminary conceptual analysis indicates that a cam-screw press with a bottom-mounted drive may provide improved maintenance conditions, reduced impact loads, and better dynamic stability due to the lower location of the main drive components. The bottom-mounted drive is a strategic design solution that increases stability (vibration resistance), improves maintenance (drive units are within easy reach), and keeps the work area clean, as gearbox oil does not spill onto the workpiece. The proposed layout may contribute to reducing the overall press height and metal consumption; however, quantitative confirmation of these advantages requires further engineering calculations, numerical simulation, and experimental validation.

The research results can be used in the design of next-generation high-precision cam-and-screw equipment, particularly for precision blanking, calibration, and micro-stamping equipment.

Keywords: mechanical press, cam-screw mechanism, bottom drive, press design, kinematics, cam profile, dynamic stability, shock-free engagement.

Introduction

Modern mechanical engineering places increasingly stringent demands on the precision and quality of parts produced by metal forming methods. Traditional

crank and screw presses, despite their reliability, suffer from a number of inherent kinematic shortcomings: a fixed ram speed in the workpiece and high vibration levels. With the transition to digital manufacturing and micro-stamping, there is an urgent need for equipment capable of ensuring «soft» tool-to-workpiece contact and high dynamic stability [1].

One of the main problems with the operation of powerful mechanical presses is the occurrence of shock loads at the onset of deformation. This leads to premature wear of expensive dies and reduced accuracy of finished products. Furthermore, the overhead location of heavy drive components (flywheel, motor, gearbox) raises the center of gravity of the machine bed, which negatively impacts the system's vibration resistance at high operating speeds. This paper examines an alternative approach to the design of pressing equipment-the use of a combined cam-screw mechanism with a bottom-mounted drive. This solution allows for:

1 Use the cam profile to control the ram's motion, eliminating harsh impacts.

2 Use the screw pair to generate significant process forces.

3 Shift the equipment's center of mass downward, ensuring rigidity and vibration resistance of the frame.

The objective of this study is to provide a review and conceptual justification of the main design features of a cam-screw mechanical press with a bottom-mounted drive. The paper focuses on the analysis of conventional press mechanisms, identification of their design limitations, and formulation of a promising structural concept for further engineering development [2].

The present work should be considered as the initial stage of a broader research program. Detailed strength calculations, kinematic and dynamic modelling, stress-strain analysis, numerical simulation, and experimental validation will be performed in subsequent studies.

Kinematic and dynamic characteristics of cam-screw pressing machines with bottom-mounted actuators.

Materials and methods

In modern forging and pressing machinery, crank and screw mechanisms predominate. However, crank presses have a fixed sinusoidal speed, resulting in a harsh impact upon contact with the metal. Screw presses are limited in stroke frequency due to thread heating. The proposed cam-screw design with a bottom drive is designed to eliminate these drawbacks by separating the high-speed stroke (cam) and the force-loading (screw pair) functions.

Crank presses are widely used in forging and stamping production due to their stable cycle and high productivity (Figure 1). However, their rigid kinematic scheme causes a fixed ram motion law, which may lead to high ram velocity at the moment of contact with the workpiece[3]. This results in impact loads, vibration, increased die wear, and reduced accuracy during precision forming operations. These limitations justify the search for alternative press mechanisms with controlled ram motion [4].

Figure 1 – Crank press

Screw presses are characterized by the ability to generate high working forces and provide a relatively soft impact mode, since they do not have a strictly fixed bottom dead center [5]. However, the screw-nut pair is subject to thermal wear, and the stroke frequency is limited by the need to reverse or restart the flywheel after each working stroke (Figure 2). Therefore, screw presses are not always suitable for high-speed precision stamping operations [6].

Figure 2 – Screw press

Toggle presses are effective for short-stroke operations requiring high specific pressure, such as coining, calibration, and fine forming (Figure 3). Their main advantage is the low ram velocity near the end of the stroke. However, the mechanism is sensitive to adjustment errors and contains many loaded joints, which increases design complexity and maintenance requirements [7].

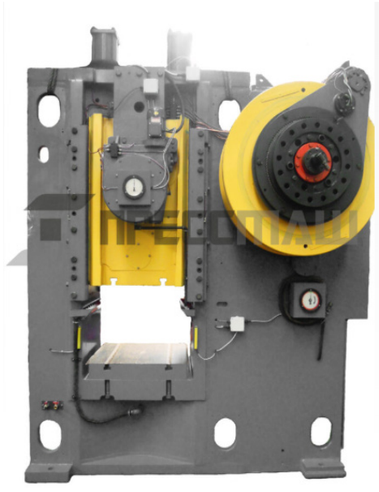


Figure 3 – Toggle press

Eccentric presses are widely used due to their high productivity, stable stroke depth, and suitability for mass production of small and medium-sized parts (Figure 4). However, their application is limited when a flexible ram motion law or longer controlled working stroke is required [8]. This limitation is especially important for precision forming operations where smooth tool entry into the workpiece is necessary [9].

Figure 4 – Eccentric press

Scope and limitations of the study.

This article is a review and conceptual design study. Its purpose is to formulate the main structural features of a cam-screw mechanical press with a bottom-mounted drive and to justify the relevance of this layout at the conceptual level. The paper does not aim to present a completed prototype, full-scale experimental testing, finite element analysis, or detailed dynamic modelling. These tasks are planned as the next stage of research and will be considered in a separate study.

Results and discussion

Cam mechanisms stand out from other mechanisms due to the ability to design any ram motion profile [10].

However, pure cam mechanisms are rarely used to generate high forces due to the high contact stresses in the cam-roller pair. This is where hybrid designs, such as the cam-screw mechanism, become necessary.

A cam-screw press combines the dynamics of a cam drive with the power of a screw drive.

The expected advantages of the proposed cam-screw press concept can be summarized as follows:

1 Controlled motion and force transmission: the cam mechanism can be used to control the feed and return motion of the ram, while the screw section may provide the required working force in the deformation zone.

2 Potential reduction of dynamic impacts: the cam mechanism may provide smoother tool approach to the workpiece before the beginning of active deformation [11].

3 Potential energy efficiency: optimization of the cam profile may contribute to reducing peak loads on the electric motor; however, this assumption requires further computational verification.

Traditionally, the drive is located in the upper part of the bed (crosshead). Moving the drive downwards is a strategic design solution with several advantages:

-Increased stability (vibration resistance): The press's center of gravity is shifted downwards. This reduces the amplitude of bed vibrations during impacts, which is critical for stamping accuracy.

-Improved maintenance conditions: Drive units, flywheels, and motors are located within easy reach. High ramps for repair and lubrication are not required.

-Clean work area: Oil drips from gearboxes and bearings are prevented from getting onto the workpiece and die, as all friction points are located under the work table [12].

-Compact upper section: The massive upper crossbar is replaced with a lighter design, simplifying press installation in workshops with limited ceiling height. A qualitative comparison of the expected structural and dynamic characteristics of upper and lower drive configurations is presented in Table 1.

The location of the drive radically changes the vector of forces acting on the frame and foundation.

Methodology for calculating a cam profile for a non-impact entry

The main problem with mechanical presses is the harsh impact of the tool on the workpiece. A cam mechanism avoids this by creating a "sinusoidal" or "polynomial" velocity law [13].

Profile design steps:

Determining phase angles:

φ1 – fast approach.

φ2 – working stroke (entry into metal).

φ3 – return.

Impact-free condition:

At the point of contact with the workpiece, the acceleration a should not have infinite discontinuities. It is recommended to use a sinusoidal velocity variation law (Mayer's law) or a fifth-degree polynomial.

Table 1 – Qualitative comparison of upper and lower drive configurations

Load parameter	Top location	Bottom location
Center of gravity	High (vibration instability)	Low (high dynamic stability)
Reaction to the foundation	Transmitted through the entire frame (tension)	Closes at the bottom (base compression)
Bending moment	High due to drive mass lever	Minimum (drive mass at base)
Vibrations (f_{rez})	Lower, higher risk of frame resonance	Above, the design is more «rigid»
Axle loads	Load the upper crossbar	Load the table and the bottom plate

Mathematical model of the entry section:

The cam profile in the working stroke is described by an equation that ensures a smooth decrease in velocity V:

$$R(\varphi) = R_{start} + h \cdot \left[\frac{\varphi}{\Phi} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi\varphi}{\Phi} \right) \right] \quad (1)$$

Where:

h – working height of stroke;

Φ – the angle of rotation of the cam at which the working stroke is completed.

Checking the pressure angle:

To prevent mechanism jamming, the pressure angle α at any point in the profile must not exceed 30°...35°.

The presented conceptual analysis suggests that a cam-screw press with a bottom-mounted drive may be more convenient for maintenance and may provide improved dynamic stability compared with traditional upper-drive layouts. However, further finite element analysis, vibration modelling, and experimental verification are required to quantitatively confirm these advantages [14].

Based on the reviewed design limitations of conventional press systems, a conceptual layout of a cam-screw mechanical press with a bottom-mounted drive is proposed. The drive is located in the press table beneath the work platform where the workpiece is processed. The lower drive position may contribute to reducing the overall height and weight of the press due to the more compact arrangement of the upper frame structure. The lower arrangement of the drive components is expected to improve the dynamic stability of the press by lowering the center of gravity and reducing the influence of heavy rotating elements on the upper part of the frame.

Figure 5 shows the new press design. Shaft 1 is mounted in the press body, and cylinder 2 is mounted on it. Cylinder 2 has a conical helical surface 5, which contacts a concave surface on ram 3. Ram 3 is mounted on a movable platen 4, connected to four cylindrical rods 9, which can move vertically within the press body. A plate 10 is attached to the rods 9 on top of which the press tool (punch 14) is mounted. Return springs 8 are mounted on the rods 9. The press tool (die 15), on which the workpiece is placed, is mounted on the press worktable 7. The press is powered by a motor 12, which rotates a flywheel 11 via a belt 13. The press cycle is activated by actuation mechanism 6. Preliminary design considerations indicate that the proposed layout can provide a more compact press structure; however, the final dimensions must be confirmed by detailed engineering calculations. Press shaft 1 is positioned perpendicular to the work area where the worker is located. Flywheel 11 is located behind the work area, which increases press safety [15].

The press operates as follows. The worker activates the press via mechanism 6, which drives cylinder 2 with a conical helical surface 5. This engages the cam clutch. Cylinder 2 begins to rotate and conical surface 5 presses on the concave surface on slider 3. Slider 3 moves downwards together with movable plate 4, four rods 9, plate 10 and tool – punch 14. Punch 14 interacts with matrix 15, which stands on press table 7. The workpiece is processed. After a complete rotation, the conical helical surface jumps off the concave surface of slider 3. The cam clutch of the press opens and slider

3, plate 4, rods 9, plate 10 and punch 14 return to their original upper position under the action of springs 8.

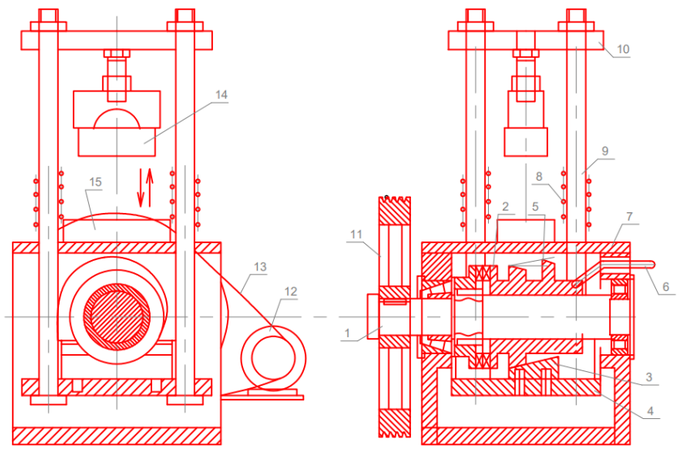


Figure 5 – Conceptual layout of a cam-screw mechanical press with a bottom-mounted drive

Conclusions

This article presents a review and conceptual justification of a cam-screw mechanical press with a bottom-mounted drive. The proposed design combines the advantages of cam-controlled ram motion and screw-based force generation, while the lower position of the drive system may contribute to improved dynamic stability, easier maintenance, and a more compact upper frame structure.

Based on the comparative analysis of conventional crank, screw, toggle, and eccentric presses, it was shown that existing mechanisms have several limitations related to impact loads, vibration, adjustment complexity, and limited flexibility of ram motion. The proposed cam-screw layout is considered as a promising direction for the development of precision forging and stamping equipment.

The scientific novelty of the work lies in the conceptual formulation of a combined cam-screw press scheme with a bottom-mounted drive, where the cam mechanism is intended to control the motion law of the ram and the screw mechanism is intended to generate the working force.

At the same time, the present study is limited to review and conceptual design analysis. Detailed strength calculations, kinematic and dynamic modelling, stress-strain analysis, finite element simulation, experimental validation, and quantitative comparison with industrial analogues are required for the complete engineering substantiation of the proposed design. These tasks will be addressed in further research.

Future research will focus on the development of a detailed mathematical model of the cam-screw mechanism, calculation of the cam profile and pressure angle, strength analysis of the main structural elements, finite element modelling of the stress-strain state, and experimental verification of the dynamic stability of the proposed press.

REFERENCES

1 **Артоболевский, И. И.** Механизмы в современной технике. В 7 т. Т. 2. Кулачковые и фрикционные механизмы. Механизмы с гибкими звеньями. – М. : Наука, 2019. – С. 98–102.

2 **Аскаров, Е. С.** Механический пресс на базе кулачкового механизма с увеличенным пятном контакта // Вестник машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 1–8.

3 **Askarov, E. S., Zhankeldi, A., Absadykov, B. N., Smailova, G. A.** Design features of a cam-screw press with a large effort // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2018. – Vol. 5. – № 431. – P. 192–200.

4 **Askarov, E. S., Zhauyt, A., Abilkaiyr, Zh., Zhankeldi, A.** New type cfm screw mechanical press // Engineering for Rural Development. – 2017. – №. 16. – P. 36–41.

5 **Банкетов, А. Н., Бочаров, Ю. А., Добринский, Н. С. И др.** Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник / Под ред. А. Н. Банкетова. – 2–е изд. – М. : Машиностроение, 1982. – 116 с.

6 **Банкетов, А. Н., Ланский, Е. Н.** Кузнечно-штамповочное оборудование. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 19–22.

7 **Бочаров, Ю. А.** Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М. : Академия, 2008. – С. 10–14.

8 **Дубовик, В. А., Замятин, В. М.** Статическая балансировка кривошипно-ползунного механизма // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 96–97.

9 **Евстратов, В. А.** Теория обработки металлов давлением. – М. : Вища школа, 1981. – С. 11–16.

10 **Игнатов, А. А.** Кривошипные кузнечно-штамповочные машины. – М. : Машиностроение, 1987. – С. 65–69.

11 **Складчиков, Е. Н.** Моделирование приводных систем кузнечно-прессовых машин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 47–51.

12 **Власов, В. И.** Система автоматизированного проектирования кузнечно-штамповочных машин. – М. : Машиностроение, 1985. – С. 32–37.

13 **Wang, Z. G.** Design and kinematic analysis of high-speed precision cam-linkage mechanisms // Journal of Mechanical Design. – 2017. – Vol. 139. – №. 5. – P. 9–15.

14 **Живов, Л. И., Тишаев, В. В., Роганов, Л. Л.** Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник. – М. : Высшая школа, 2006. – С. 37–42.

15 **Аскаров, Е. С.** Новый кулачково-винтовой механический пресс: Монография. – 2–е изд. – Алматы, 2025. – С. 55–57.

REFERENCES

1 **Artobolevskiy, I. I.** Mekhanizmy v sovremennoy tekhnike. V 7 t. T. 2. Kulachkovye i friktsionnye mekhanizmy. Mekhanizmy s gibkimi zven'yami [Mechanisms in modern technology. In 7 vol. Vol. 2. Cam and friction mechanisms. Mechanisms with flexible links]. M. : Nauka, 2019. – P. 98–102.

2 **Askarov, E. S.** Mekhanicheskiy press na baze kulachkovogo mekhanizma s uvelichennym pyatnom kontakta [Mechanical press based on a cam mechanism with an increased contact patch] // Vestnik mashinostroeniya [Herald of Mechanical Engineering]. – 2003. – № 1. – P. 1–8.

3 **Askarov, E. S., Zhankeldi, A., Absadykov, B. N., Smailova, G. A.** Design features of a cam-screw press with a large effort // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2018. – Vol. 5. – № 431. – P. 192–200.

4 **Askarov, E. S., Zhauyt, A., Abilkaiyr, Zh., Zhankeldi, A.** New type cfm screw mechanical press // Engineering for Rural Development. – 2017. – №. 16. – P. 36–41.

5 **Banketov, A. N., Bocharov, Yu. A., Dobrinskiy, N. S. [et al].** Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie: Uchebnik [Forging and stamping equipment: Textbook / Ed. by A. N. Banketov]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 116 p.

6 **Banketov, A. N., Lanskiy, E. N.** Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie [Forging and stamping equipment]. – M. : Mashinostroenie. – 1982. – P. 19–22.

7 **Bocharov, Yu. A.** Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie: Uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy [Forging and stamping equipment: Textbook for university students]. Moscow: Akademiya, 2008, pp. 10–14.

8 **Dubovik, V. A., Zamyatin, V. M.** Staticheskaya balansirovka krivoshipno-polzunnogo mekhanizma [Static balancing of the crank-slider mechanism]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. – 2003. – Vol. 306. – № 5. – P. 96–97.

9 **Evstratov, V. A.** Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]. Moscow: Vishcha shkola. – 1981. – P. 11–16.

10 **Ignatov, A. A.** Krivoshipnye kuznechno-shtampovochnye mashiny [Crank forging and stamping machines]. Moscow: Mashinostroenie. – 1987. – P. 65–69.

11 **Skladchikov, E. N.** Modelirovanie privodnykh sistem kuznechno-pressovykh mashin [Modeling of drive systems for forging and pressing machines]. Moscow: Izd-vo MGTU named after N. E. Baumana. – 2011. – P. 47–51.

12 **Vlasov, V. I.** Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya kuznechno-shtampovochnykh mashin [Computer-aided design system for forging and stamping machines]. Moscow: Mashinostroenie. – 1985. – P. 32–37.

13 **Wang, Z. G.** Design and kinematic analysis of high-speed precision cam-linkage mechanisms // Journal of Mechanical Design. – 2017. – Vol. 139. – №. 5. – P. 9–15.

14 **Zhivov, L. I., Tishaev, V. V., Roganov, L. L.** Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie: Uchebnik [Forging and stamping equipment: Textbook]. – M. : Vysshaya shkola. – 2006. – P. 37–42.

15 **Askarov, E. S.** Novyy kulachkovo-vintovoy mekhanicheskiy press: Monografiya [New cam-screw mechanical press: Monograph]. 2nd ed. Almaty. – 2025. – P. 55–57.

Received 24.02.26.
Received in revised form 27.04.26.
Accepted for publication 31.05.26.

Т. Т. Шаратбеков[1], Б. Н. Абсадыков[2], Е. С. Аскаров[3]
[1,2]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Халықаралық көлік және гуманитарлық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
24.02.26 ж. баспаға түсті.
27.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖҰДЫРЫҚШАЛЫ-БҰРАНДАЛЫ МЕХАНИКАЛЫҚ ПРЕССТЕРДІҢ НЕГІЗГІ ЖОБАЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ ЖӘНЕ ТҰЖЫРЫМДЫҚ НЕГІЗДЕУІ

Бұл мақалада біріктірілген жұдырықшалы-бұрандалы жетек және төменгі жетек бар механикалық престің шолуы және тұжырымдамалық жобалау негіздемесі ұсынылған. Дәстүрлі иінді, бұрандалы, ауыстырып-қосқыш және эксцентрикалық прес конструкцияларының шектеулерін анықтау үшін қолданыстағы прес жабдықтарының салыстырмалы талдауы жүргізілді. Осы талдау негізінде төменгі жетек орналасуы бар жұдырықшалы-бұрандалы механикалық престің тұжырымдамалық орналасуы одан әрі инженерлік дамудың перспективалы бағыты ретінде ұсынылады.

Мақалада дайындамаға тегіс құрал тәсілін қамтамасыз ету және деформацияның бастапқы кезеңінде соққы өзара әрекеттесуін азайту үшін жұдырықшалы профильді пайдалану мүмкіндігі талқыланады. Ұсынылған тәсіл тұжырымдамалық деңгейде қарастырылады және егжей-тегжейлі кинематикалық және динамикалық модельді одан әрі әзірлеу үшін негіз болып табылады. Алдын ала тұжырымдамалық талдау төменгі жетегі бар жұдырықшалы-бұрандалы прес негізгі жетек компоненттерінің төменгі орналасуына байланысты техникалық қызмет көрсету жағдайларын жақсартуды, соққы жүктемелерін азайтуды және динамикалық тұрақтылықты жақсартуды қамтамасыз ете алатынын көрсетеді. Төменгі жетек - бұл тұрақтылықты арттыратын (дірілге төзімділікті), техникалық қызмет көрсетуді жақсартатын (жетек блоктары оңай қол жетімді жерде) және жұмыс аймағын таза ұстайтын стратегиялық жобалау шешімі, себебі беріліс қорабының майы дайындамаға төгілмейді. Ұсынылған орналасу жалпы

прес биіктігін және металл шығынын азайтуға ықпал етуі мумкін; дегенмен, бұл артықшылықтарды сандық растау үшін қосымша инженерлік есептеулер, сандық модельдеу және эксперименттік тексеру қажет.

Зерттеу нәтижелерін келесі буын жоғары дәлдіктегі жұдырықшалы және бұрандалы жабдықтарды жобалауда, әсіресе дәлдікпен бланкілеу, калибрлеу және микроштамптау жабдықтары үшін пайдалануға болады.

Кілтті сөздер: механикалық пресс, жұдырық-бұранда механизмі, төменгі жетек, престің дизайны, кинематика, жұдырық профилі, динамикалық тұрақтылық, соққысыз кіру.

***Т. Т. Шаратбеков[1], Б. Н. Абсадыков[2], Е. С. Аскаров[3]**

[1,2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

[3]Международный транспортно-гуманитарный университет, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 24.02.26.
Поступило с исправлениями 27.04.26.
Принято в печать 31.05.26.

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КУЛАЧКОВО-ВИНТОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

В данной статье представлен обзор и обоснование концептуальной конструкции механического пресса с комбинированным кулачково-винтовым приводом и нижним расположением привода. Проведен сравнительный анализ существующего прессового оборудования для выявления ограничений традиционных конструкций кривошипно-винтовых, рычажных и эксцентриковых прессов. На основе этого анализа предложена концептуальная компоновка кулачково-винтового механического пресса с нижним расположением привода как перспективное направление для дальнейшего инженерного развития.

В статье обсуждается возможность использования профиля кулачка для обеспечения более плавного приближения инструмента к заготовке и уменьшения ударного воздействия на начальной стадии деформации. Предложенный подход рассматривается на концептуальном уровне и служит основой для дальнейшей разработки подробной кинематической и динамической модели. Предварительный концептуальный анализ показывает, что кулачково-винтовой пресс с нижним расположением привода может обеспечить улучшенные условия технического обслуживания, снижение ударных нагрузок и лучшую динамическую стабильность благодаря более низкому расположению основных компонентов привода. Нижнее расположение привода - это стратегическое конструктивное решение, повышающее устойчивость (вибрационную стойкость), упрощающее техническое обслуживание (приводные узлы находятся в пределах легкой досягаемости) и поддерживающее чистоту рабочей зоны, поскольку масло из редуктора не

попадает на заготовку. Предложенная компоновка может способствовать снижению общей высоты пресса и расхода металла; однако для количественного подтверждения этих преимуществ необходимы дальнейшие инженерные расчеты, численное моделирование и экспериментальная проверка.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании высокоточного кулачково-винтового оборудования следующего поколения, в частности, для прецизионной вырубки, калибровки и микроштамповки.

Ключевые слова: механический пресс, кулачково-винтовой механизм, нижний привод, проектирование прессов, кинематика, профиль кулачка, динамическая устойчивость, безударный вход.

МЕТАЛЛУРГИЯ

МРНТИ 53.49.21

https://doi.org/10.48081/BGQF2231

И. К. Абижанова[1], С. А. Абдулина[2], Д. Б. Буйткенов[3], М. Рутковска-Горчица[4], *А. Е. Кусайнов[5]

[1,2,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Восточно-Казахстанский Университет имени С. Аманжолова, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[4]Вроцлавский университет науки и технологии, Республика Польша, г. Вроцлав.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3218-7246
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6328-8652
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0239-5849
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2712-5914
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4623-4681
*e-mail: arys20055@gmail.com

РОЛЬ ДАВЛЕНИЙ ГАЗОВ В ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НАНЕСЁННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Низкая твёрдость медных сплавов, используемых в качестве материала для кристаллизаторов непрерывной разливки, приводит к их склонности к пластической деформации, износу и высокотемпературному окислению. Это вызывает преждевременное разрушение рабочих поверхностей и формирование дефектов на поверхности слитков.

В данной работе исследованы микроструктура, фазовый состав, механические и трибологические свойства покрытий Cr_3C_2–NiCr, нанесённых методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) на медные подложки, применяемые в кристаллизаторах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью увеличения ресурса медных кристаллизаторов в процессах непрерывной разливки стали.

Установлено, что параметры HVOF-напыления существенно влияют на пористость, толщину слоя, микротвёрдость и трибологическое поведение покрытий в условиях, моделирующих контакт слитка с рабочей поверхностью кристаллизатора. Среди исследованных режимов покрытие, полученное при давлении пропана 3.8 бар и давление кислорода 4 бар, сформировало наиболее плотную ламеллярную структуру и продемонстрировало максимальную микротвёрдость. Трибологические испытания показали, что данное покрытие обладает наименьшим коэффициентом трения, тогда как остальные образцы отличались большей пористостью и худшей износостойкостью.

Полученные результаты подчёркивают важность оптимизации параметров HVOF-напыления для разработки износостойких защитных покрытий, способных эффективно работать на медных кристаллизаторах, испытывающих экстремальные термомеханические нагрузки в процессе разливки стали.

Ключевые слова: HVOF, Cr_3C_2–NiCr, медный кристаллизатор, машина непрерывной разливки, покрытия, трибология.

Введение

Кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является одним из ключевых звеньев металлургического процесса, поскольку в нём формируется непрерывная заготовка заданного сечения и обеспечивается её первичное затвердевание за счёт интенсивного отвода тепла [1]. В условиях непрерывной разливки стали состояние медных стенок кристаллизатора определяет устойчивость кристаллизации, равномерность структуры заготовки и, как следствие, качество конечного продукта [2; 3; 4].

Эксплуатация кристаллизаторов связана с рядом проблем: низкая твёрдость меди, накопление остаточных деформаций, интенсивное изнашивание, захват частиц меди расплавом и образование поверхностных дефектов. Особенно сильному износу подвержена нижняя часть кристаллизатора, где заготовка при скольжении контактирует со стенками [5; 6].

Для повышения ресурса кристаллизаторов применяют различные методы упрочнения, включая нанесение защитных покрытий [2]. Однако традиционные гальванические покрытия на основе хрома или никеля имеют ряд ограничений: склонность к отслаиванию, недостаточную износостойкость, высокие энергозатраты и значительное загрязнение окружающей среды при эксплуатации гальванических ванн [7].

Покрытия для кристаллизаторов должны обеспечивать высокую износостойкость при сохранении сопротивления деформациям, обладать низкой пористостью, стабильной микроструктурой, коррозионной стойкостью и не ухудшать теплопроводность медной основы. Важными требованиями также являются возможность локального ремонта и экономическая эффективность [8].

Одним из наиболее эффективных методов упрочнения медных стенок кристаллизатора является высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF). В установках HVOF горение смеси топлива и кислорода в камере высокого давления формирует поток горячих газов, выходящий через сопло на высокой скорости. Частицы порошка вводятся в этот поток, нагреваются и разгоняются до высоких скоростей, осаждаясь на поверхность медного основания [9]. В отличие от других технологий термического напыления, HVOF оказывает меньший тепловой эффект на подложку, снижая риск деформации и изменений микроструктуры.

Для нанесения покрытий методом HVOF применяются различные материалы – карбиды вольфрама, карбиды хрома, никелевые и кобальтовые сплавы – обладающие высокой твёрдостью и стойкостью к износу [10].

Наиболее перспективными считаются хромкарбидные покрытия Cr_3C_2–NiCr, которые характеризуются низкой пористостью и высокой стойкостью к окислению и изнашиванию. Это критически важно, поскольку поры уменьшают эффективную теплопроводность, удлиняют путь теплового потока, создают каналы проникновения агрессивных сред и способствуют накоплению продуктов коррозии, ускоряя деградацию материала [11]. Поэтому снижение пористости является одним из ключевых факторов повышения эксплуатационной стойкости таких покрытий.

Как показывают исследования, параметры напыления — давление газов — в решающей степени определяют формирование структуры покрытия. Ali Raza и соавт. показали, что уменьшение пористости возможно при оптимизации скорости струи и температуры пламени [12]. Точное регулирование давления топлива и кислорода позволяет контролировать температуру и динамику факела, степень плавления частиц, что влияет на плотность, адгезию, твёрдость, пористость и фазовый состав покрытия [13].

Корректная экспериментальная настройка параметров HVOF имеет принципиальное значение. Исследования позволяют определить причины дефектов — таких как пористость, трещины и расслоения — и оптимизировать режимы напыления для их устранения. В отличие от работ, анализирующих отдельные свойства покрытий, наше исследование направлено на комплексный анализ взаимосвязи параметров процесса, микроструктуры и трибологических характеристик Cr_3C_2–NiCr покрытий, полученных при специально подобранных режимах HVOF для медных подложек. Таким образом, научная новизна работы заключается не в моделировании условий эксплуатации кристаллизатора, а в установлении ясных структурно-параметрических корреляций, которые могут служить научной основой для перехода к опытно-промышленным и промышленным испытаниям.

Материалы и методы

В данном исследовании для нанесения покрытия использовался порошок Cr_3C_2–NiCr (75/25) марки AMPERIT® 584.054 (H.C. Starck) с размером частиц 15–45 мкм. В качестве подложек применялись медные образцы из сплава CuCrZr размерами 25 × 25 × 10 мм. Перед напылением поверхности подложек шлифовали наждачной бумагой MIRKA с последовательной изменяемой зернистостью от 100 до 2500, чтобы обеспечить равномерную и гладкую поверхность. Затем выполняли пескоструйную обработку на установке Nordberg NS3 с использованием электрокорунда для формирования шероховатости и улучшения адгезии покрытия к подложке.

В качестве оборудования для напыления применялась система HVOF LH-5000 (Zhengzhou Lijia Thermal Spray Machinery Co., Ltd.).

Подробные параметры процесса напыления представлены в таблице 1.

Таблица 1

№	Дистанция, мм	Давление пропана, бар	Давление кислорода, бар
HVOF-1	200	3,6	4
HVOF-2		3.8	4
HVOF-3		4	4

Для определения фазового состава покрытий был проведён рентгеновский дифракционный анализ (РФА). Исследования выполняли на дифрактометре X'PertPro (Philips Corporation, Эйндховен, Нидерланды), оснащённом анодом Cu-Kα (λ = 0,154 нм). Съёмка проводилась при напряжении 40 кВ и токе 30 мА. Обработка дифрактограмм осуществлялась в программе HighScore с использованием базы данных PDF-4. Сканирование выполняли в диапазоне углов 2θ = 20–90° с шагом 0,02° и временем накопления 1 с на шаг. Микроструктуру покрытий анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 LMH (Чехия). Пористость оценивали металлографическим методом с использованием микроскопа Olympus BX53M. Анализ проводили согласно ASTM E2109 с применением программного обеспечения ImageJ (NIH, США). Для каждого покрытия исследовали поперечные сечения, определяя среднюю пористость и стандартное отклонение на основе пяти репрезентативных областей размером примерно 20 × 20 мкм².

Параметр шероховатости (Ra) определяли профилометром SSR300+, выполняя пять измерений на каждом образце.

Механические свойства покрытий оценивали методом инструментального индентирования на установке FISCHERSCOPE HM2000 (Helmut Fischer GmbH, Германия) при нагрузке 150 мН и выдержке под нагрузкой 15 с. Трибологические испытания проводили на трибометре TRB3 (Anton Paar Srl, Пезё, Швейцария) по методике «шарик–диск» в соответствии со стандартом ASTM G99. Контртело представляло собой шарик из стали 100Cr6; испытания выполнялись при нагрузке 6 Н и длине пути трения 100 м.

Выбранный трибологический режим (нагрузка 6 Н и расстояние скольжения 100 м) соответствует типичным лабораторным условиям, которые применяются для сравнительной оценки защитных покрытий Cr_3C_2–NiCr, нанесённых методом HVOF [14; 15; 16; 17]. Данные параметры обеспечивают устойчивый контакт пары трения и воспроизводимые результаты, не вызывая повреждений медной подложки. Следует отметить, что полученные результаты отражают лабораторные характеристики покрытий и не предназначены для прямого переноса на реальные условия эксплуатации кристаллизаторов МНЛЗ.

Результаты и обсуждение

3.1. Микроструктура порошка и покрытии

Морфология порошка Cr_3C_2–NiCr была изучена методом СЭМ. Частицы порошка представляют собой агломерированные образования неправильной формы с выраженной поверхностной шероховатостью и средним размером 15–45 мкм (рис. 1a,b). Согласно литературным данным, светло-серые участки

соответствуют никелевой связующей фазе, объединяющей более тёмные зерна карбида хрома.

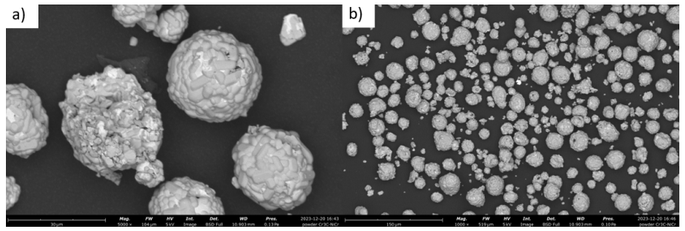


Рисунок 1 – Морфология порошка Cr_3C_2–NiCr: a) 5000x; b) 1000x

Рентгенофазовый анализ порошка (рис. 5) показывает наличие двух доминирующих фаз: прочной и пластичной связки $CrNi_3$, обеспечивающей сцепление частиц, и твёрдой фазы Cr_3C_2, ответственной за высокую твёрдость и износостойкость материала.

Микроструктурные изображения поперечных сечений покрытий, полученных методом HVOF при различных режимах давлении газов, демонстрируют заметные различия в плотности, пористости и качестве контакта с подложкой.

Изменение давления газов приводит к значительным различиям в морфологии покрытия. В образце HVOF-1 (рис. 2a) фиксируется высокая пористость и наличие непроплавленных включений, что связано с недостатком тепла при пониженном расходе пропана. В случае HVOF-3 (рис. 2c) структура остаётся неоднородной, поры увеличиваются в размере, что указывает на перегрев и возможное испарение отдельных компонентов порошка при избытке тепловой энергии.

Наиболее оптимальная структура получена в покрытии HVOF-2 (рис. 2b). Оно характеризуется плотной ламеллярной морфологией, минимальной пористостью и хорошо сплющенными частицами, равномерно размещёнными в объёме покрытия. Наблюдаемые линии течения связующей фазы NiCr свидетельствуют о её пластическом деформировании в момент удара расплавленных частиц о поверхность. Сбалансированное соотношение пропана и кислорода обеспечивает качественное плавление и осаждение частиц без их перегрева.

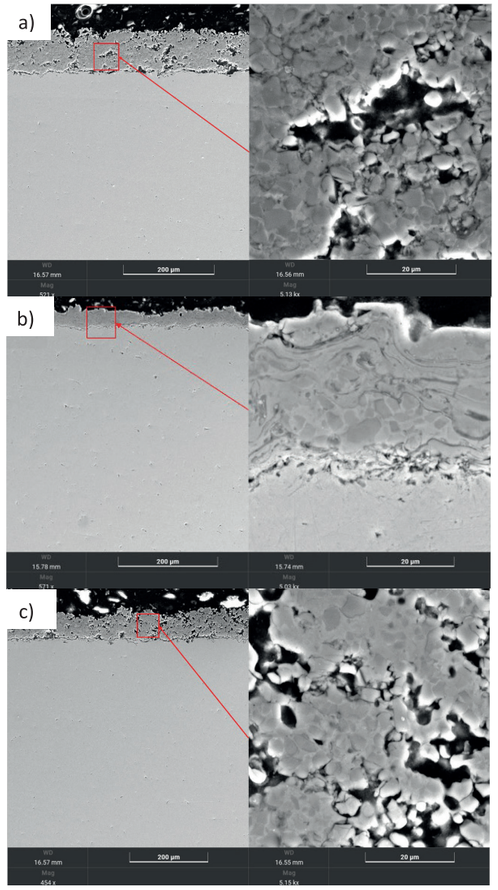


Рисунок 2 – СЭМ-изображения поперечных сечений образцов:
(a) HVOF-1; (b) HVOF-2; (c) HVOF-3

Несмотря на то что некоторые образцы имели большую толщину покрытия, лучшие микроструктурные характеристики были получены для образца HVOF-2. Он демонстрировал минимальную пористость (0,2 %) при средней толщине слоя (Рисунок 3). Это указывает на оптимальное соотношение тепловой энергии и скорости частиц, обеспечивающее их достаточное расплавление и формирование плотной ламеллярной структуры с равномерным межламеллярным сцеплением, что подтверждено результатами СЭМ-анализа.

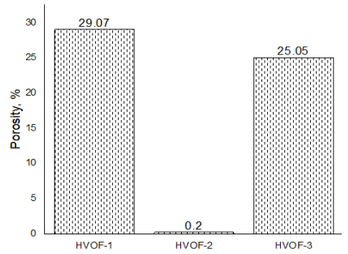


Рисунок 3 – Зависимость пористости покрытия от давления газа

В отличие от него, покрытия, сформированные при пониженных или повышенных давлениях газов, характеризовались неравномерным затвердеванием частиц и повышенной пористостью (25,05–29,1 %). Это обусловлено либо неполным расплавлением частиц, либо их частичным окислением. Таким образом, чрезмерное увеличение расхода газа сокращает время пребывания частиц в пламени, а слишком низкие значения приводят к перегреву – оба фактора снижают плотность и целостность слоя.

Следовательно, увеличение толщины покрытия не всегда означает улучшение его качества. В данном случае более тонкий слой, полученный в данном режиме оказался более однородным, плотным и структурно стабильным. Это связано с оптимальным сочетанием теплового воздействия и кинетической энергии частиц, что способствует полноценному расплавлению и уплотнению покрытия в процессе напыления (Рисунок 4).

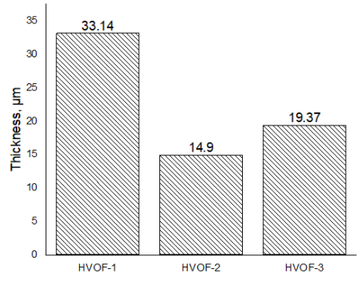


Рисунок 4 – Зависимость толщины покрытия от давления газа

Во всех образцах были выявлены карбидные фазы Cr_3C_2, $Cr_{23}C_6$ и Cr_7C_3, а также интерметаллическая фаза Ni_3Cr. Рентгеновская дифрактограмма покрытия Cr_3C_2–25NiCr представлена на рисунке 5. В ней присутствуют пики, соответствующие карбиду Cr_3C_2 и металлической связке NiCr, что совпадает с результатами для исходного порошка. Дополнительно в покрытии обнаружены фазы Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$, образование которых, вероятно, связано с декарбюризацией Cr_3C_2 в процессе термического напыления. Появление этих фаз также может быть обусловлено

частичным разрушением карбидных частиц или их отскоком от поверхности подложки при ударе, что приводит к уменьшению содержания исходного карбида в структуре покрытия.

При сравнении всех покрытий выявлено наличие широкого пика около 43°, характерного для аморфной составляющей. После напыления пики на дифрактограммах расширялись, а особенно широкий пик возле 43° наблюдался практически во всех покрытиях.

У образцов HVOF-1, HVOF-3, пики были более размытыми и менее выраженными, что может указывать на пониженную степень кристалличности покрытия. Появление широкой дифракционной линии связано с высокой скоростью охлаждения частиц, приводящей к формированию аморфной фазы. Различия в фазовом составе и интенсивности пиков подтверждают высокую чувствительность покрытия к изменению параметров напыления.

Наиболее отчётливую и кристалличную дифрактограмму демонстрирует образец HVOF-2, что указывает на более оптимальные условия напыления. Для этого образца характерны более узкие и чёткие пики, свидетельствующие о повышенной кристалличности и меньшем содержании аморфной составляющей. Одним из факторов такой структуры могло стать уменьшенное время пребывания частиц в пламени при данном режиме напыления.

Повышенное содержание Cr_3C_2 в сочетании с узкими рентгеновскими пиками указывает на сохранение первичной карбидной фазы, меньшую степень декарбюризации и более выраженную кристалличность связки. Такая фазовая комбинация формирует более жёсткий несущий каркас и уменьшает долю пластичной матрицы, склонной к сдвигу, что повышает микротвёрдость и снижает вероятность локального пластического течения и микрорезания. При низкой пористости и высоком межламеллярном сцеплении эти свойства обеспечивают стабильное трибологическое поведение покрытия.

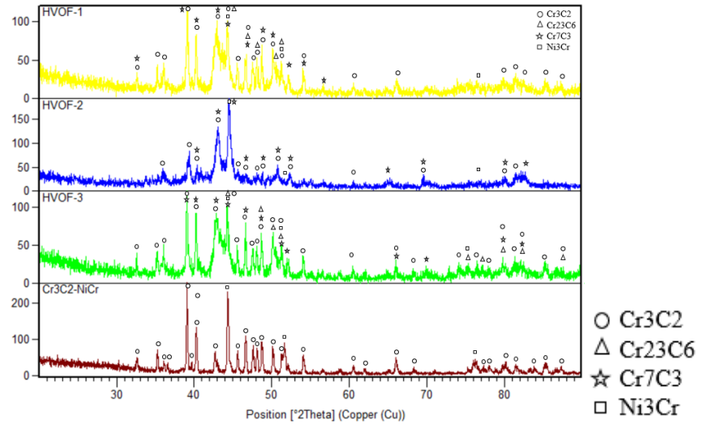


Рисунок 5 – Результаты рентгенофазового анализа покрытий Cr_3C_2–NiCr, полученных методом HVOF

Одним из важнейших параметров, определяющих эксплуатационные свойства покрытия, является его поверхностная шероховатость. Для исследованных образцов значения Ra находились в пределах 2,03–2,42 мкм (Рисунок 6). Покрытие HVOF-2 продемонстрировало минимальную шероховатость — 2,034 мкм, что указывает на более ровную и однородную поверхность. Такая поверхность требует меньшего объёма последующей механической обработки после напыления.

Чрезмерно высокие значения Ra уменьшают реальную площадь контакта между стенкой кристаллизатора и формирующейся корочкой металла. Это снижает эффективность теплопередачи и может привести к появлению дефектов поверхности слитка, таких как волнистость или трещины. В то же время оптимально гладкая, но умеренно текстурированная поверхность способствует равномерному затвердеванию и улучшает условия смазки.

Таким образом, уточнённый текст демонстрирует взаимосвязь между измеренными значениями шероховатости, процессом затвердевания и качеством поверхности заготовки, подчёркивая практическую значимость полученных данных.

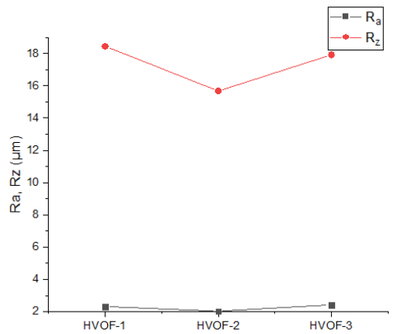


Рисунок 6 – Значения параметров шероховатости поверхности Ra и Rz образцов

Твёрдость покрытия оценивали путём измерения микротвёрдости на поперечном сечении образцов. Различия в микроструктурных характеристиках, включая размер и распределение пор, рассмотренные ранее, могли оказать влияние на полученные значения. Повышенная твёрдость покрытия, в свою очередь, способствует снижению износа при эксплуатации.

Покрытие HVOF-2 продемонстрировало несколько более высокие значения микротвёрдости по сравнению с остальными образцами, что связано с большим количеством расплавленного материала при напылении (рисунок 2). Измеренные значения для образцов составили: HVOF-1 — 420,7 HV0.3 и HVOF-3 — 744,02 HV0.3 (рисунок 7). При этом микротвёрдость покрытия HVOF-2 достигла 1050 HV0.3, что превышает типичный диапазон для покрытий Cr_3C_2–NiCr, нанесённых методом HVOF (обычно 800–1000 HV0.3).

Полученное значение также выше твёрдости гальванического хромового покрытия (примерно 700–900 HV), которое традиционно применяется в промышленности. Подробные результаты, методика измерений и статистическая обработка данных приведены в таблице 3.

Повышенная твёрдость покрытия HVOF-2 объясняется высоким содержанием карбида хрома (Cr_3C_2), обеспечивающим устойчивость к абразивному и механическому воздействию, а также лучшей степенью расплавления частиц, более прочным межламеллярным сцеплением и низкой пористостью, достигнутыми благодаря оптимальному подбору скорости подачи порошка и параметров газового потока.

Стойкость к износу тесно связана с механическими свойствами, прежде всего с твёрдостью материала. Различия в микротвёрдости, выявленные между образцами, вероятно, обусловили соответствующие различия в износостойкости, которые подробно рассмотрены в следующем разделе.

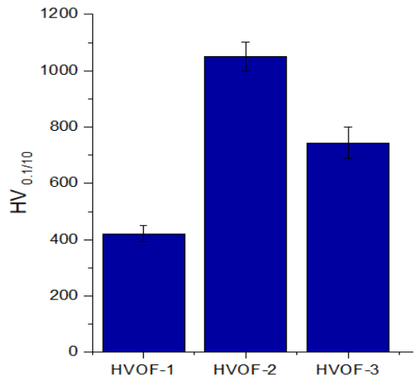


Таблица 7 – Результаты микротвёрдости по Виккерсу: среднее значение, стандартное отклонение и процентная погрешность

С точки зрения механизмов изнашивания, высокая твёрдость увеличивает несущую способность покрытия, однако реальная скорость износа в значительной степени определяется коэффициентом трения.

Зависимость коэффициента трения от пути скольжения для исследованных покрытий представлена на рисунке 8а. Показано, что изменение параметров напыления приводит к широкому разбросу значений коэффициента трения — от 0,245 до 0,719. Для образца HVOF-2 после достижения значения 0,245 коэффициент оставался практически неизменным до завершения испытания. Покрытия Cr_3C_2–NiCr, полученные методом HVOF, характеризуются низким коэффициентом трения, тогда как гальваническое хромирование обычно показывает значения порядка 0,60–0,80 при лабораторных условиях сухого трения. Как правило, покрытия с меньшим коэффициентом трения демонстрируют более низкую скорость износ.

Повышенные трибологические характеристики композитных покрытий Cr_3C_2–NiCr объясняются формированием в структуре высокопрочных фаз, таких как Cr_3C_2 и $CrNi_3$. Это подчёркивает значимость химического состава и структурной организации слоя в процессах трения и изнашивания. Важную роль играет также морфология поверхностного слоя, поскольку она определяет характер деформации в зоне контакта и, следовательно, влияет на коэффициент трения. При этом структура, обеспечивающая максимальную износостойкость, не всегда совпадает со структурой, обеспечивающей максимальную твёрдость, что связано со сложным взаимодействием химического состава, фазовых компонентов и механических свойств покрытий.

На рисунке 8b представлены СЭМ- и ЭДС-изображения поверхностей после трибологических испытаний. В центральной части износной дорожки обнаружено присутствие железа – элемента, изначально отсутствующего в составе покрытия. Появление обогащённых Fe и O участков связано с переносом материала со стального контртела и формированием оксидной трибоплёнки, что указывает на наличие адгезионно-окислительного компонента изнашивания.

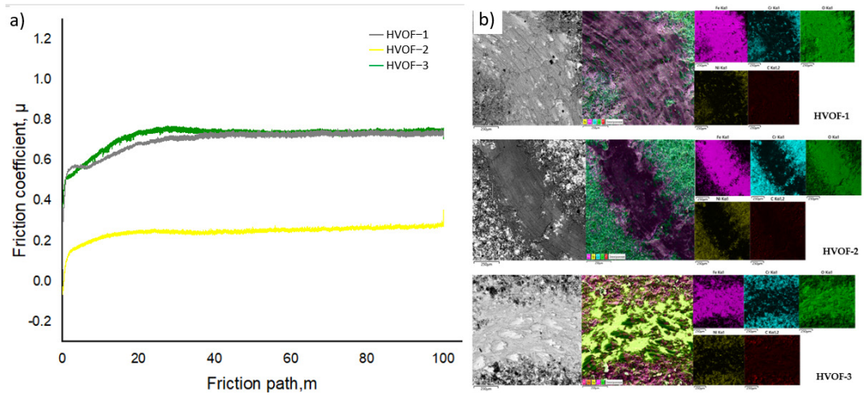


Рисунок 8 – a) Зависимость коэффициента трения покрытий от пути скольжения; b) СЭМ-микрофотографии поверхности износа и результаты ЭДС изношенных дорожек после трибологических испытаний для покрытий, полученных методом HVOF: HVOF-1, HVOF-2, HVOF-3

Зафиксированное содержание кислорода свидетельствует о развитии окислительных процессов и образовании тонкой трибооксидной плёнки (Fe_3O_4, Cr_2O_3). Одновременно наличие продольных борозд и следов микрорезания подтверждает вклад абразивного износа. Области, обогащённые Ni и Cr, соответствуют матричной фазе исходного покрытия.

Таким образом, механизм изнашивания носит смешанный характер и может быть охарактеризован как абразивно-адгезионно-окислительный.

Условия проведённых трибологических испытаний соответствуют лабораторному формату и не воспроизводят реальные режимы работы

кристаллизатора МНЛЗ. Поэтому полученные значения не могут напрямую использоваться для оценки фактического ресурса оборудования и должны рассматриваться лишь как относительные показатели, позволяющие сравнивать механизмы износа.

Совокупность выявленных факторов – высокая плотность микроструктуры, оптимальное распределение карбидной фазы и минимальные термохимические изменения частиц – обеспечила покрытию HVOF-2 низкий коэффициент трения и менее выраженное проявление абразивных, адгезионных и окислительных механизмов износа.

Информация о финансировании

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства Науки и Высшего Образования Республики Казахстан (Грант № BR24992854).

Выводы

Изменение скорости подачи порошка и давления газов в процессе HVOF-напыления существенно влияет на пористость, морфологию и адгезию покрытий Cr_3C_2–NiCr. Даже небольшие отклонения в параметрах приводили к заметным изменениям качества сформированного слоя. Во всех покрытиях были обнаружены карбидные фазы (Cr_3C_2, Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$) и интерметаллид Ni_3Cr. Частичная декарбюризация Cr_3C_2, происходящая при напылении, сказывалась на твёрдости и износостойкости покрытий.

Минимальная шероховатость поверхности (Ra = 2,034 мкм) обеспечила более гладкий и однородный рельеф по сравнению с другими образцами. Наибольшее значение микротвёрдости (1050 HV0,3) было зафиксировано для покрытия HVOF-2, что значительно превышает показатели остальных образцов (420–950 HV0,3). Покрытие HVOF-2 также показало самый низкий и стабильный коэффициент трения (0,245), тогда как для других покрытий значения находились в диапазоне 0,3–0,7. Данные СЭМ и ЭДС указывают на комбинированный механизм износа, включающий абразивную, адгезионную и окислительную составляющие.

Оптимальное сочетание толщины, твёрдости и коэффициента трения было достигнуто при давлениях пропана и кислорода 3,8 и 4 бар соответственно, что делает данный режим наиболее эффективным для получения высококачественных Cr_3C_2–NiCr покрытий.

В дальнейших исследованиях планируется провести испытания на высокотемпературное окисление, чтобы более полно оценить эксплуатационные характеристики этих покрытий в условиях, максимально приближенных к работе медных кристаллизаторов машин непрерывной разливки стали.

REFERENCES

1 **Wang, S., Xu, P., Zhou, Y., Duan, H., Chen, D., and Long, M.** «The Effect of Mold Structure and Cooling Parameters on Heat Transfer during Billet High-Speed Continuous Casting». – Materials. – Vol. 16. – № 9. – P. 3361. – Apr. 2023. – https://doi.org/10.3390/ma16093361.

2 **Meng, F. et al.** «Development and Research Status of Wear-Resistant Coatings on Copper and Its Alloys: Review». – Crystals. – Vol. 15. – № 3. – P. 204. – Feb. 2025. – https://doi.org/10.3390/cryst15030204.

3 **Vlasov, A. E.** «Repair and restoration of crystallizers of continuous casting machines». South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, MET. – Vol. 16. – № 03. – P. 143–148. – 2016. – https://doi.org/10.14529/met160321.

4 **Yu, J. et al.** «Research and Application of High-Velocity Oxygen Fuel Coatings». Coatings. – Vol. 12. – № 6. – P. 828. – Jun. 2022. – https://doi.org/10.3390/coatings12060828.

5 **Barella, S., Gruttadauria, A., Mapelli, C., and Mombelli, D.** «Investigation of failure and damages on a continuous casting copper mould». Engineering Failure Analysis. – Vol. 36. – P. 432–438. – Jan. 2014. – https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.11.004.

6 **Gupta, A., Singh, R. K., Paul, A., and Kumar, S.** «Effect of mould geometry, coating, and plate thickness on the thermal profile of continuous casting moulds». J. S. Afr. Inst. Min. Metall. – Vol. 118. – № 5. – 2018. – https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n5a7.

7 **Okonkwo, B. O., Jeong, C., and Jang, C.** «Advances on Cr and Ni Electrodeposition for Industrial Applications – A Review». Coatings. – Vol. 12. – № 10. – P. 1555. – Oct. 2022. – https://doi.org/10.3390/coatings12101555.

8 **Meng, X. and Zhu, M.** «Effect of cooling structure on thermal behavior of copper plates of slab continuous casting mold». J. Cent. South Univ. – Vol. 20. – № 2. – P. 318–325. – Feb. 2013. – https://doi.org/10.1007/s11771-013-1490-2.

9 **Li, M. and Christofides, P. D.** «Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review». J Therm Spray Tech. – Vol. 18. – № 5–6. – P. 753–768. – Dec. 2009. – https://doi.org/10.1007/s11666-009-9309-2.

10 **Xie, M., Zhang, S., and Li, M.** «Comparative investigation on HVOF sprayed carbide-based coatings». Applied Surface Science. – Vol. 273. – P. 799–805. – May 2013. – https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.03.010.

11 **Yao, H., Zhou, Z., Wang, L., Tan, Z., He, D., and Zhao, L.** «Thermal Conductivity and Wear Behavior of HVOF-Sprayed Fe-Based Amorphous Coatings». Coatings. – Vol. 7. – № 10. – P. 173. – Oct. 2017. – https://doi.org/10.3390/coatings7100173.

12 **Raza, A., Ahmad, F., Badri, T. M., Raza, M. R., and Malik, K.** «An Influence of Oxygen Flow Rate and Spray Distance on the Porosity of HVOF Coating and Its Effects on Corrosion – A Review». Materials. – Vol. 15. – № 18. – P. 6329. – Sep. 2022. – https://doi.org/10.3390/ma15186329.

13 **Rakhadilov, B., Muktanova, N., Seitkhanova, A., Kakimzhanov, D., and Dautbekov, M.** «Investigation of the Influence of the Oxygen Flow Rate on the Mechanical, Structural and Operational Properties of 86WC-10Co-4Cr Coatings, as Determined Using the High-Velocity Oxyfuel Spraying Method». Coatings. – Vol. 14. – № 10. – P. 1275. – Oct. 2024. – https://doi.org/10.3390/coatings14101275.

14 **Poirier, D., Legoux, J.-G., and Lima, R. S.** «Engineering HVOF-Sprayed Cr3C2-NiCr Coatings: The Effect of Particle Morphology and Spraying Parameters on the Microstructure, Properties, and High Temperature Wear Performance». – J Therm Spray Tech. – Vol. 22. – № 2–3. – P. 280–289. – Mar. 2013. – https://doi.org/10.1007/s11666-012-9833-3.

15 **Prudenziati, M., Gazzadi, G. C., Medici, M., Dalbagni, G., and Caliari, M.** «Cr3C2-NiCr HVOF-Sprayed Coatings: Microstructure and Properties Versus Powder Characteristics and Process Parameters». J Therm Spray Tech. – Vol. 19. – № 3. – P. 541–550. – Mar. 2010. – https://doi.org/10.1007/s11666-009-9458-3.

16 **Seitov, B. et al.** «Review of Physical and Mechanical Properties, Morphology, and Phase Structure in Cr3C2-NiCr Composite Coatings Sprayed by HVOF Method». Coatings. – Vol. 15. – № 4. – P. 479. – Apr. 2025. – https://doi.org/10.3390/coatings15040479.

17 **Ksiazek, M. and Łyp-Wrońska, K.** «An HVOF-Sprayed (Cr3C2-NiCr+Co) Composite Coating on Ductile Cast Iron: Microstructure, Mechanical Properties, and Scratch Resistance». Materials. – Vol. 17. – № 7. – P. 1484. – Mar. 2024. – https://doi.org/10.3390/ma17071484.

Поступило в редакцию 04.12.25.
Поступило с исправлениями 27.02.26.
Принято в печать 20.05.26.

И. К. Абижанова[1], С. А. Абдулина[2], Д. Б. Буйткенов[3], М. Рутковска-Горчица[4], *А. Е. Кусайнов[5]
[1,2,5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[4]Вроцлав ғылым және технология университеті, Польша Республикасы, Вроцлав қ.
Поступило в редакцию 04.12.25.
Поступило с исправлениями 27.02.26.
Принято в печать 20.05.26.

ГАЗ ҚЫСЫМЫНЫҢ ГАЗДЫҚ-ЖЫЛУЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН ЖАБЫНДАР ҚАСИЕТТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДАҒЫ РӨЛІ

Тұрақты құю машиналарының кристаллизаторларында қолданылатын мыс қорытпаларының төмен қаттылығы олардың пластикалық деформацияға, тозуға және жоғары температуралық тотығуға бейімділігін арттырады. Бұл жұмыс беттерінің мерзімінен бұрын бұзылуына және құймаларда ақаулардың пайда болуына әкеледі.

Осы зерттеуде HVOF (жоғары жылдамдықты оттегі-отынмен напыление) әдісімен кристаллизаторларда қолданылатын мыс негіздеріне жағылған Cr_3C_2–NiCr жабындарының микроструктурасы, фазалық құрамы, механикалық және трибологиялық қасиеттері зерттелді. Зерттеудің өзектілігі — болатты үздіксіз құю үдерісінде мыс кристаллизаторларының жұмыс ресурсын арттыру қажеттілігімен байланысты.

HVOF-процесінің параметрлері жабындардың кеуектілігіне, қалыңдығына, микротверділігіне және трибологиялық мінез-құлқына айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Зерттелген режимдердің ішінде ұнтақ берілісі 11,39 м/с болған жағдайда алынған жабын ең тығыз ламеллярлы құрылым түзді және ең жоғары микротверділік көрсетті. Трибологиялық сынақтар бұл жабынның үйкеліс коэффициенті ең төмен екенін көрсетті, ал қалған үлгілер жоғары кеуектілікпен және төмен тозуға төзімділікпен сипатталды.

Алынған нәтижелер HVOF-процесінің параметрлерін оңтайландырудың маңыздылығын дәлелдейді, себебі бұл болатты үздіксіз құю кезінде экстремалды термомеханикалық жүктемелерге төтеп бере алатын тозуға төзімді қорғаныш жабындарын әзірлеуге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: HVOF, Cr_3C_2–NiCr, мыс кристаллизаторы, үздіксіз құю машинасы, жабындар, трибология.

I. K. Abizhanova[1], S. A. Abdulina[2], D. B. Buitkenov[3], M. Rutkowska-Gorczyca[4], *A.E. Kussainov[5]
[1,2,5]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[4]Wrocław University of Science and Technology, Republic of Poland, Wrocław.
Received 04.12.25.
Received in revised form 27.02.26.
Accepted for publication 20.05.26.

THE ROLE OF GAS PRESSURE IN FORMING THE PROPERTIES OF COATINGS DEPOSITED BY THERMAL SPRAYING

The low hardness of copper alloys used as the material for continuous casting molds makes them susceptible to plastic deformation, wear, and high-temperature oxidation. This leads to premature degradation of working surfaces and the formation of defects on the cast billets.

In this study, the microstructure, phase composition, mechanical, and tribological properties of Cr_3C_2–NiCr coatings deposited by high-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying onto copper substrates used in casting molds were investigated. The relevance of this research is driven by the need to increase the service life of copper molds in continuous steel casting processes.

It was established that the HVOF spraying parameters significantly affect porosity, coating thickness, microhardness, and the tribological behavior of the coatings under conditions simulating contact between the billet and the working surface of the mold. Among the investigated regimes, the coating deposited at a powder feed rate of 11.39 m/s formed the densest lamellar structure and demonstrated the highest microhardness. Tribological tests showed that this coating exhibited the lowest coefficient of friction, whereas the other samples were characterized by higher porosity and poorer wear resistance.

The obtained results highlight the importance of optimizing HVOF spraying parameters for the development of wear-resistant protective coatings capable of operating effectively on copper molds subjected to severe thermomechanical loads during steel casting.

Keywords: HVOF, Cr_3C_2–NiCr, copper mold, continuous casting machine, coatings, tribology.

SRSTI 53.31.19

https://doi.org/10.48081/BGQF2232

M. K. Jundibayev[1], K. S. Bilyalov[2], E. Kobegen[3],
****A. S. Jundibayeva[4], A. A. Mazhit[5]***
[1]Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[2]ERG Research and Development LLP, Republic of Kazakhstan, Astana;
[3]National Scientific and Practical Center «Til-Kazyna» named after
Shaisultan Shayakhmetov, Republic of Kazakhstan, Astana;
[4]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[5]Ekibastuz Engineering and Technical Institute named after Academician K. Satpayev,
Republic of Kazakhstan, Ekibastuz.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2915-378X
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1583-4220
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8790-7470
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5244-3497
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8645-6408
*e-mail: Dzhundibayeva.as@students.tou.edu.kz

PROCESSING OF IRON-MANGANESE ORE TO PRODUCE RICH MANGANESE SLAG

With the deteriorating quality of manganese raw materials and the predominance of iron-manganese ore in Kazakhstan's resource base (up to 70 % of total reserves), the development of effective processing technologies is particularly relevant. This paper presents the results of laboratory studies on the selective extraction of iron and the production of rich manganese slag from iron-manganese ores via a carbothermic method using screened special coke as a reducing agent. It was found that, under optimal process parameters, effective separation of iron and manganese is achieved, forming a metallic phase containing up to 93.2 % Fe. This process produces manganese slag with a Mn content of up to 38.3 % and Fe of 0.68 %. The resulting rich manganese slags are characterized by a high Mn/Fe ratio (12–66), indicating their suitability for subsequent use in the production of manganese ferroalloys. This approach ensures the comprehensive use of iron-manganese ores through the simultaneous production of an iron-containing product and manganese slag and can be considered as a promising direction for increasing the efficiency of processing iron-manganese raw materials in Kazakhstan.

Key words: iron-manganese ore, selective reduction, reducing agent, rich manganese slag, ferroalloy.

Introduction

Manganese is considered one of the critical raw materials required for manufacturing high-grade steels. The expanding demand for steel products, particularly in emerging economies, continues to drive the need for manganese ore resources. A notable

characteristic of manganese is its capacity to dissolve in iron and form solid solutions without creating stable intermetallic compounds, which is highly significant for metallurgical applications. Both manganese-based alloys and their chemical compounds are extensively employed across numerous industrial sectors. Among these applications, manganese ferroalloys are especially important for steelmaking, with the iron and steel industry accounting for nearly 90 % of total global manganese consumption [1]. The addition of manganese to steel significantly improves its mechanical properties by enhancing its strength, impact resistance, hardness, wear resistance, and weldability. These improved properties make manganese-containing steels widely used in construction, engineering, and infrastructure applications [2; 3]. In addition, manganese is widely used as a deoxidizer and desulfurizer in metallurgical processes [4;5].

According to data reported by the U.S. Geological Survey (USGS) [6], the world market is currently experiencing a deficit of manganese resources. Although manganese is relatively common in the Earth's crust, it ranks fourteenth among all metals in terms of abundance and is second only to iron among heavy metals. Nevertheless, economically viable production is constrained by the small number of large high-grade deposits suitable for commercial mining. The major sources of such reserves are concentrated mainly in Brazil, India, and several African countries.

Kazakhstan is among the countries possessing some of the largest manganese ore reserves in the world. The principal manganese resources of the Republic are located in Central Kazakhstan and are linked to the Atasu ore district. Major deposits within this region include West and East Karazhal, Dalniy Vostok, Zhomart, Ushkatyn-I, Ushkatyn-III, Bolshoy Kitay, Tur, as well as West and East Kamys [7]. At present, mining and processing activities are focused mainly on oxidized manganese ores occurring in the near-surface zones of deposits, since these materials can be extracted and benefited at comparatively low cost. However, such ores account for only about 4 % of the total explored reserves [8].

The observed decline in the quality of manganese raw materials exacerbates the problem of supplying ferroalloy enterprises in Kazakhstan in the future. Although the country possesses substantial manganese-bearing resources, a large proportion of these ores is unsuitable for the production of conventional manganese ferroalloys because of their low manganese grades and elevated iron content. Conventional ferromanganese smelting processes are designed for high-quality feedstocks with an Mn/Fe ratio of at least 6–8, while for most iron-manganese ores in Kazakhstan this indicator generally remains within the range of 2–3 [9].

Iron-manganese ores constitute nearly 70 % of the total manganese-bearing reserves, whereas the other 30 % are represented by oxidized ores and refractory primary manganese raw materials [10].

The majority of Kazakhstan's manganese ore deposits are classified as primary sedimentary formations. Braunite, pyrolusite, and hausmannite are the predominant manganese-bearing minerals in these ores. From the standpoint of grade distribution, a significant share of the reserves consists of low- and medium-grade material: around 60 % contains 10–20 % Mn, about 32 % falls within the range of 20–30 % Mn, and only

roughly 11 % of the reserves exceed 30 % Mn. At the same time, Kazakhstan manganese ores generally contain relatively low concentrations of detrimental impurities, especially phosphorus (0.02–0.08 %) and sulfur (0.1–0.3 %) [11].

Currently, iron-manganese ores are practically not involved in ferroalloy production processes and are primarily stored in waste heaps due to the lack of effective and cost-effective processing technologies.

Various approaches to preparing manganese raw materials are used worldwide to improve their quality: enrichment using gravity, magnetic, and flotation methods, as well as thermal processing with phase separation-oxidation-reduction processes - to produce manganese-rich products [12; 13]. However, existing technologies have a number of serious drawbacks [14; 15]:

– High energy consumption of the roasting and reduction processes (up to 1400–1500 °C);

– The need to use expensive reducing agents (coke, petroleum coke, graphite);

– Limited efficiency of separating the manganese and iron phases;

– Significant emissions of CO and dust products into the atmosphere;

– Low level of comprehensive manganese recovery (60–70 %).

The most well-known industrial methods for processing manganese and iron-manganese ores, such as those developed by Nippon Denko, Eramet, South32 and Samancor Manganese, focus on producing metallic ferromanganese or silicomanganese from high-grade ores or concentrates. For low-grade iron-manganese ores, such approaches are economically impractical. Attempts at preliminary heat treatment (for example, the Premaferro process) and partial metallization of manganese oxides in such ores have not yielded sustainable industrial results due to the complexity of phase separation of Mn-Fe systems and limited selectivity of reduction [16].

Given the increasing demand for raw materials in the manganese ferroalloy and steelmaking industries, research into the development of rational technological solutions for processing iron-manganese ores and their integration into metallurgical processes is particularly relevant.

Therefore, the objective of this study is the thermal processing of iron-manganese ore with selective iron reduction and an increase in the manganese concentration in slag – a semi-finished product for the production of manganese ferroalloys.

Materials and methods

For laboratory studies, iron-manganese ore was used, the chemical composition of the main elements of which is given in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of iron-manganese ore

Material	Content, %					
	Mn_{gen}	Fe_{gen}	SiO_2	CaO	MgO	LOI
Iron-manganese ore	30.3	19.0	10.5	11.35	0.43	8.8

Special coke screenings were used as the reducing agent, the technical composition of which is presented in Table 2.

Table 2 – Technical composition of the reducing agent

Material	Content, %					
	A	V	W	C	S	P
Special coke screenings	5.0	6.3	6.9	81.5	0.28	0.018

The batch composition was calculated based on 700 g of iron-manganese ore.

The amount of reducing agent was determined based on the stoichiometric requirements for the complete reduction of iron oxides to metallic iron according to the following reaction:

$$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO_g \quad (1)$$

The change in Gibbs free energy (ΔG, kJ) was calculated using the «Chemistry 5.0» software package, «Reaction Equations» module. The results showed that the thermodynamic reduction of hematite becomes possible at a temperature of approximately 650 °C. Meanwhile, the reduction of manganese oxide by the reaction:

$$Mn_2O_3 + 3C \rightarrow 2Mn + 3CO_g \quad (2)$$

begins at a higher temperature of T = 920 °C (Figure 1). Thus, from a thermodynamic point of view, the reduction of iron occurs at lower temperatures and, therefore, occurs earlier, with subsequent transition to the metal composition. According to a number of studies [17; 18], complete melting of the charge materials occurs at temperatures of 1250–1350 °C.

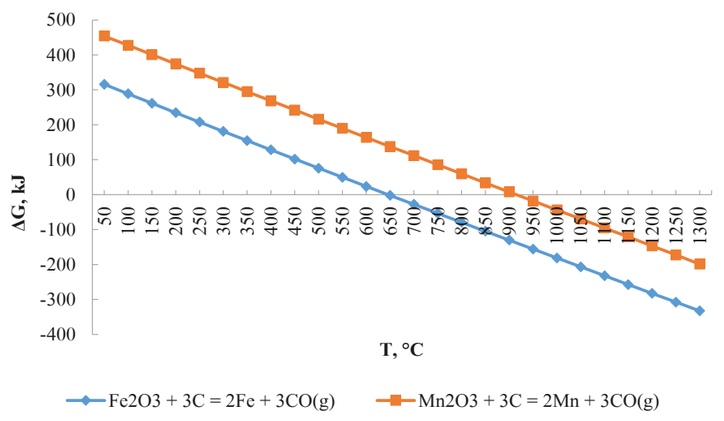


Figure 1 – Changes in the Gibbs energy (ΔG) of iron and manganese depending on temperature changes

A distinctive feature of the electrothermal method is the need to increase the silica content in the manganese slag to 28–35 %. This is necessary to improve the slag's

fluidity by forming a more easily fusible tephroite ($2MnO \cdot SiO_2$), which has a melting point of 1300 °C, and, as a consequence, to improve the conditions for separating the manganese slag and associated metal particles by density [19; 20]. To ensure the required silica level in the slag phase, quartzite screenings containing more than 97 % SiO_2 were introduced into the charge. In each experiment, 90 g of quartzite additive was used for every 700 g of ore.

Thus, from a thermodynamic perspective, to selectively reduce iron and minimize manganese conversion to metal, laboratory melting temperatures were set at T – 1300 °C.

To determine the maximum iron recovery, the reducing agent was specified in three variations: stoichiometry, 10 % excess, and 20 % excess.

All charge materials were ground using a hammer mill. After grinding, the charge materials were sieved through a 5 mm mesh screen using a vibrating sifter with a vibration amplitude of 1.5 and a sifting time of 60 s.

The melting was carried out in a KEP25/1400 laboratory furnace (Aravana, Chelyabinsk, Russia) (Fig. 2a), which allows experiments to be conducted in an oxidizing atmosphere with a programmable heating rate up to 1400 °C. Before the experimental melting, the charge materials were weighed, averaged, and loaded into a magnesite crucible (Fig. 2b).

(**a**) (**b**)

Figure 2 - (a) Laboratory furnace KEP 25/1400;
(b) Magnesite crucible with charge installed in the furnace

The process of smelting iron-manganese ore with a reducing agent and flux was carried out as follows: the furnace heating parameters were set using a pre-programmed sequence. First, the crucible with the charge was loaded into the furnace, and the heating program was activated. Over the first 30 minutes, the furnace heated to 250 °C. Then, the furnace was heated to 1300 °C at a rate of 650 °C/h, followed by a 30-minute hold at this temperature. Upon completion of the smelting process, the crucibles were removed from the furnace, and metal and slag samples were collected for chemical analysis.

Result and discussion

As a result of the experiments, metal and slag samples were obtained (Fig. 3). In all three experiments, complete melting of the charge occurred, with separation of the metal and slag.

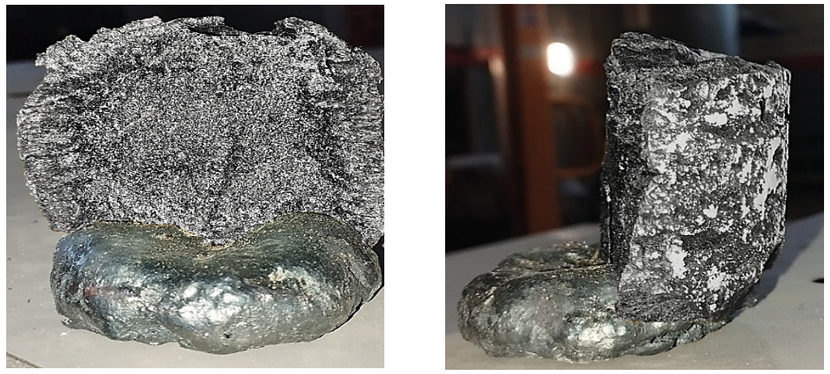


Figure 3 – Melting products with a clear separation of the slag and metal parts

The chemical composition of the resulting metal and slag was determined using a Rigaku X-ray fluorescence spectrometer. Tables 3 and 4 present the chemical compositions of the resulting metal and slag.

Table 3 – Chemical composition of the metal

№	Amount of reducing agent	Content, %	
		Fe_{gen}	Mn_{gen}
1	By stoichiometry	90.3	2.1
2	Excess 10%	93.2	2.8
3	Excess 20%	91.4	4.5

Table 4 – Chemical composition of slag

№	Amount of reducing agent	Content, %					
		Mn_{gen}	Fe_{gen}	SiO_2	CaO	MgO	Mn/Fe
1	By stoichiometry	36.9	1.37	30.2	12.52	2.54	26.9
2	Excess 10%	38.3	0.68	32.8	10.94	2.28	66.0
3	Excess 20%	34.9	2.91	29.8	10.68	3.71	12.0

Table 3 shows that the iron oxides contained in the iron-manganese ore were almost completely reduced and converted to the metallic phase. Chemical analysis results show that in all three experiments, the resulting metal was characterized by a high iron content (90.3–93.2 %) and a low manganese content (2.1–4.5 %).

According to Table 4, manganese predominantly converted to the slag phase. The total manganese content in the resulting slags was 34.9–38.3 %.

Laboratory tests demonstrated the feasibility of selective iron extraction, producing metal and a rich manganese slag. When smelting with a stoichiometric reducing agent

ratio, the iron recovery rate was 90.4 %, likely due to insufficient carbon for complete reduction of the iron-containing phases. With a limited reducing agent content, some iron oxides remain unreduced and pass into the slag, as evidenced by the presence of residual iron in the slag phase of up to 1.37 %. The resulting slag contained 36.9 % manganese. Manganese recovery in the slag was 88.2 %. The Mn/Fe ratio increased to 26.9.

Increasing the reducing agent content by 10 % increased the iron content in the metal to 93.2 % and the iron recovery rate to 97.0 %, indicating sufficient carbon to complete the reduction reactions. At the same time, a decrease in the iron content of the slag (to 0.68 %) and an increase in the manganese content to 38.3 % were observed. The Mn/Fe ratio in the slag also increased significantly to 66, indicating more efficient phase separation and increased selectivity of iron reduction.

A further increase in the excess reducing agent to 20 % leads to a change in the nature of the process: iron recovery decreases to 86.3 %, and a significant increase in the manganese content in the metallic phase (to 4.5 %) is observed. This is due to the fact that with excess carbon and appropriate thermodynamic conditions, partial reduction of manganese oxides begins, accompanied by the conversion of manganese to metal. The resulting slag is characterized by an Mn/Fe ratio of 12.

Financing information

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992882).

Conclusions

In laboratory conditions, metal and rich manganese slag were obtained for the subsequent production of manganese ferroalloys. The results showed that under optimal process conditions - a melting temperature of 1300 °C, a holding time at 1300 °C for 30 min – it is possible to obtain a metal of the following composition: total Fe content – 93.2 %, total Mn content – 2.9 %, as well as a manganese slag: total Mn content – 38.3 %, total Fe content – 0.68 %, SiO_2 – 32.8 %, and CaO – 10.94 %, MgO – 2.28, with a Mn/Fe ratio of 66.

The fundamental possibility of obtaining a rich manganese slag by the carbothermal method using special coke screenings as a reducing agent was demonstrated with the following technical composition (%): A – 5.0, V – 6.3, C – 81.5, S – 0.28 and P – 0.018, with a consumption The reducing agent was used in the stoichiometry and with an excess of 10 and 20 %. Optimal iron reduction conditions were found to be achieved with a 10 % excess of reducing agent, resulting in a metal containing 93.2 % Fe and 2.9% Mn, with iron and manganese recovery reaching 96.9 % and 1.9 %, respectively, as well as a rich manganese slag containing 38.3 % Mn. A further increase in reducing agent consumption with an excess of 20 % resulted in an increase in the manganese content in the metal, reaching 4.5 %.

The resulting rich manganese slags are characterized by high Mn/Fe ratios (>12), indicating their suitability for subsequent use in the production of standard manganese ferroalloys.

Thus, the laboratory experiments demonstrated the feasibility of producing iron-containing metal and rich manganese slag from iron-manganese ore. The most optimal regime is the use of a reducing agent with a 10 % excess, which achieves maximum iron recovery (97 %). This approach not only increases manganese recovery but also enables the efficient use of iron-containing components, enabling comprehensive utilization of mineral resources, including:

– processing up to 20 million tons of iron-manganese ores previously unused in industry;

– stimulating the development of new production capacities in the Republic of Kazakhstan;

– improving the environmental situation by reducing the volume of iron-manganese ores stored.

REFERENCES

1 **Zhang, W., Cheng, C. Y.** Manganese Metallurgy Review. Part I: Leaching of Ores/Secondary Materials and Recovery of Electrolytic/Chemical Manganese Dioxide // Hydrometallurgy. – 2007. – 89. – P. 137–159.

2 **Hu, J., Du, L. X., Xu, W., Zhai, J. H., Dong, Y., Liu, Y. J., Misra, R. D. K.** Ensuring Combination of Strength, Ductility and Toughness in Medium-Manganese Steel through Optimization of Nano-Scale Metastable Austenite // Materials Characterization. – 2018. – 136. P. 20–28.

3 **Singh, M. K., Verma, A. K., Kumar, A.** Microstructure and Mechanical Properties of Medium Manganese Steels // Materials Today : Proceedings. – 2022. – 56. – P. 356–367.

4 **Zhuniskaliyev, T., Benzesik, K., Sultanov, M., Tushyev, T., Abdirashit, A.** Study of Deoxidizing Properties of Fe Si Mn Al Complex Alloy // Acta Metallurgica Slovaca. – 2024. – 30(4). P. 167–170.

5 **Song, T., Wang, Z., Bao, Y., Gu, C., Zhang, Z.** Effect of Silicon-Manganese Deoxidation on Oxygen Content and Inclusions in Molten Steel // Processes. – 2024. – 12(4). – 767.

6 U.S. Geological Survey (USGS). Manganese. In Mineral Commodity Summaries 2024; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA. – 2024. – P. 106–107. – Available online: https://doi.org/10.3133/mcs2024

7 **Сиргетаева, Г. Е.** Разработка и исследование технологии обжигмагнитной переработки железомарганцевой руды Западный Камыс // Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD). Караганды. – 2016.

8 **Исагулов, А. З., Батышев, К. А., Мусин, А. М., Сиргетаева, Г. Е., Аринова, С. К.** Обзор существующих методов обогащения бедных марганцевых руд // Труды университета. Карагандинский государственный технический университет. – 2016. – 2 (63). – P. 26–28.

9 **Kosdauletov, N., Nurumgaliyev, A., Zhautikov, B., Suleimen, B., Adilov, G., Kelamanov, B., Smirnov, K., Zhuniskaliyev, T., Kuatbay, Y., Abdirashit, A.** Selective Reduction of Iron from Iron-Manganese Ore of the Keregetas Deposit Using Hydrogen // Metals. – 2025. – 15. – 691.

10 **Мухамбетгалиев, Е. К.** Теоретические и технологические основы получения алюмосиликомарганца из высококремнистой марганцевой руды и высокозольных углей // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Челябинск, Россия. – 2017.

11 **Есенгалиев, Д. А.** Разработка технологии выплавки рафинированного ферромарганца с использованием высокоосновных марганцевых руд и специальных комплексных сплавов // Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD). Караганды. – 2020.

12 **Lei, M., Li, G., Jiang, T., Zhang, Y., Huang, Z.** A Process for Beneficiation of Low-Grade Manganese Ore Using Acid Leaching and Valorization // Hydrometallurgy. – 2021. – 201. – 105573.

13 **Samuratov, Y., Baisanov, A., Tolymbekov, M.** Complex Processing of Iron-Manganese Ore of Central Kazakhstan // Proceedings of the 12th International Ferroalloys Congress (INFACON XII). – Helsinki, Finland. – 2010. – P. 517–520.

14 **Nurumgaliev, A., Makhambetov, Ye., Kuatbay, Ye., Yerekeyeva, G., Abdirashit, A., Mynzhassar, Ye.** Study of Softening Temperatures of Manganese Ores in Central Kazakhstan // Metalurgija. – 2023. – 62. – P. 268–270.

15 **Safarov, R. Z., Kargin, D. B., Zhandildenova, A., Kamatov, R.** Study of the Phase Composition of Kazakhstani Manganese Ores in the Sintering Process // Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series. – 2021. – Vol. 135. – № 2. – P. 41–60.

16 **Кубекова, Ш. Н., Капралова, В. И., Раимбекова, А. С., Мотовилов, И. Ю., Ибраимова, Г. Т., Ихсан, Н. А., Кузнецов, В. Е.** Исследование возможности вовлечения отходов обогащения марганцевых руд в производство неорганических материалов // Химический журнал Казахстана. – 2024. – № 4. – P. 46–56.

17 **Самуратов, Е. К., Серикбаев, Е. У.** Исследование возможности получения марганецсодержащего чугуна из бедной железомарганцевой руды // Молодой ученый. – 2016. – № 112. – С. 49–53.

18 C**ui, G., Zhang, X., Xu, Y., Ma, G., Zheng, D., Xu, J.** Study on the Kinetics of Carbothermic Reduction of Manganese Oxides // Metals. – 2025, 15, 835.

19 **Roghani, G., Jak, E., Hayes, P.** Phase Equilibria Studies in the $MnO-Al_2O_3-SiO_2$ System // Metallurgical and Materials Transactions. – 2002. – Vol. 33. – P. 827–838.

20 **Yessengaliyev, D. A., Baisanov, A. S., Sariyev, O. T., Kuatbay, E. S., Zhuniskaliyev, T. B.** Thermophysical Properties of Slags in the $FeO-MnO-CaO-Al_2O_3-SiO_2$ System // Complex Use of Mineral Resources. – 2022. – 323(4): P. 38–45.

REFERENCES

1 **Zhang, W., Cheng, C. Y.** Manganese Metallurgy Review. Part I: Leaching of Ores/Secondary Materials and Recovery of Electrolytic/Chemical Manganese Dioxide // Hydrometallurgy. – 2007. – 89. – P. 137–159.

2 **Hu, J., Du, L. X., Xu, W., Zhai, J. H., Dong, Y., Liu, Y. J., Misra, R. D. K.** Ensuring Combination of Strength, Ductility and Toughness in Medium-Manganese Steel through Optimization of Nano-Scale Metastable Austenite // Materials Characterization. – 2018. – 136. P. 20–28.

3 **Singh, M. K., Verma, A. K., Kumar, A.** Microstructure and Mechanical Properties of Medium Manganese Steels // Materials Today : Proceedings. – 2022. – 56. – P. 356–367.

4 **Zhuniskaliyev, T., Benzesik, K., Sultanov, M., Tushyev, T., Abdirashit, A.** Study of Deoxidizing Properties of Fe Si Mn Al Complex Alloy // Acta Metallurgica Slovaca. – 2024. – 30(4). P. 167–170.

5 **Song, T., Wang, Z., Bao, Y., Gu, C., Zhang, Z.** Effect of Silicon-Manganese Deoxidation on Oxygen Content and Inclusions in Molten Steel // Processes. – 2024. – 12(4). – 767.

6 U.S. Geological Survey (USGS). Manganese. In Mineral Commodity Summaries 2024; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA. – 2024. – P. 106–107. – Available online: https://doi.org/10.3133/mcs2024

7 **Sirgetaeva, G. E.** Razrabotka i issledovanie texnologii obzhigmagnitnoj pererabotki zhelezomargancevoj rudy` Zapadny`j Kamy`s [Development and research of technology for roasting-magnetic processing of ferromanganese ore Western Kamys] [Text] // PhD. Thesis. Karaganda. – 2016.

8 **Isagulov, A. Z., Batyshev, K. A., Musin, A. M., Sirgetaeva, G. E., Arinova, S. K.** Obzor sushhestvuyushhix metodov obogashheniya bedny`x margancevy`x rud [Review of existing methods for enrichment of low-grade manganese ores] [Text] // Proceedings of the University. Karaganda State Technical University. – 2016. – 2 (63). – P. 26–28.

9 **Kosdauletov, N., Nurumgaliyev, A., Zhautikov, B., Suleimen, B., Adilov, G., Kelamanov, B., Smirnov, K., Zhuniskaliyev, T., Kuatbay, Y., Abdirashit, A.** Selective Reduction of Iron from Iron-Manganese Ore of the Keregetas Deposit Using Hydrogen // Metals. – 2025. – 15. – 691.

10 **Mukhambetgaliev, E. K.** Teoreticheskie i texnologicheskie osnovy` polucheniya alyumosilikomargancza iz vy`sokokremnistoj margancevoj rudy` i vy`sokozol`ny`x uglej [Theoretical and technological principles of obtaining aluminosilicomanganese from high-silicon manganese ore and high-ash coals] [Text] // Candidate of Technical Sciences Thesis. Chelyabinsk, Russia. – 2017.

11 **Yessengaliyev, D. A.** Razrabotka texnologii vy`plavki rafinirovannogo ferromargancza s ispol`zovaniem vy`sokoosnovny`x margancevy`x rud i special`ny`x kompleksny`x splavov [Development of Technology for Smelting Refined

Ferromanganese Using High-Basicity Manganese Ores and Special Complex Alloys] [Text] // Ph.D. Thesis. Karaganda. – 2020.

12 **Lei, M., Li, G., Jiang, T., Zhang, Y., Huang, Z.** A Process for Beneficiation of Low-Grade Manganese Ore Using Acid Leaching and Valorization // Hydrometallurgy. – 2021. – 201. – 105573.

13 **Samuratov, Y., Baisanov, A., Tolymbekov, M.** Complex Processing of Iron-Manganese Ore of Central Kazakhstan // Proceedings of the 12th International Ferroalloys Congress (INFACON XII). – Helsinki, Finland. – 2010. – P. 517–520.

14 **Nurumgaliev, A., Makhambetov, Ye., Kuatbay, Ye., Yerekeyeva, G., Abdirashit, A., Mynzhassar, Ye.** Study of Softening Temperatures of Manganese Ores in Central Kazakhstan // Metalurgija. – 2023. – 62. – P. 268–270.

15 **Safarov, R. Z., Kargin, D. B., Zhandildenova, A., Kamatov, R.** Study of the Phase Composition of Kazakhstani Manganese Ores in the Sintering Process // Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series. – 2021. – Vol. 135. – № 2. – P. 41–60.

16 **Kubekova, Sh. N., Kapralova, V. I., Raimbekova, A. S., Motovilov, I. Yu., Ibraimova, G. T., Ikhsan, N. A., Kuznetsov, V. E.** Issledovanie vozmozhnosti vovlecheniya otxodov obogashheniya margancevy`x rud v proizvodstvo neorganicheskix materialov [Investigation of possibility of manganese ore concentration wastes involvement in inorganic materials production] [Text] // Chemical Journal of Kazakhstan. – 2024. – № 4. – P. 46–56.

17 **Samuratov, E. K., Serikbaev, E. U.** Issledovanie vozmozhnosti polucheniya marganeczsoderzhashhego chuguna iz bednoj zhelezomargancevoj rudy` [Study on the Possibility of Producing Manganese-Containing Pig Iron from Low-Grade Iron-Manganese Ore] [Text] // Molodoy Uchenyy. – 2016. – № 112. – P. 49–53

18 C**ui, G., Zhang, X., Xu, Y., Ma, G., Zheng, D., Xu, J.** Study on the Kinetics of Carbothermic Reduction of Manganese Oxides // Metals. – 2025, 15, 835.

19 **Roghani, G., Jak, E., Hayes, P.** Phase Equilibria Studies in the $MnO-Al_2O_3-SiO_2$ System // Metallurgical and Materials Transactions. – 2002. – Vol. 33. – P. 827–838.

20 **Yessengaliyev, D. A., Baisanov, A. S., Sariyev, O. T., Kuatbay, E. S., Zhuniskaliyev, T. B.** Thermophysical Properties of Slags in the $FeO-MnO-CaO-Al_2O_3-SiO_2$ System // Complex Use of Mineral Resources. – 2022. – 323(4): P. 38–45.

Received 14.05.26.
Received in revised form 16.05.25.
Accepted for publication 03.06.26.

М. К. Джундибаев[1], К. С. Билялов[2], Е. Көбеген[3],
****А. С. Джундибаева[4], А. А. Мажит[5]***
[1]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[2]ERG Research and Development ЖШС, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3]Шайсұлтан Шаяхметов атындағы «Тіл-Қазына» ұлттық ғылыми-практикалық орталығы, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[5]Академик Қ. Сәтпаев атындағы Екібастұз инженерлік-техникалық институты, Қазақстан Республикасы, Екібастұз қ.
14.05.26 ж. баспаға түсті.
16.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖОҒАРЫ САПАЛЫ МАРГАНЕЦ ҚОЖЫН АЛУ ҮШІН ТЕМІР-МАРГАНЕЦ КЕНІН ӨҢДЕУ

Марганец шикізатының сапасының нашарлауымен және Қазақстанның ресурстық базасында темір-марганец кендерінің басым болуына байланысты (жалпы қордың 70%-ға дейін) оларды тиімді өңдеу технологияларын әзірлеу өзекті мәселе болып табылады. Бұл мақалада темірді селективті түрде тотықсыздандыру және темір-марганец кендерінен карботермиялық әдіспен жоғары сапалы марганец қожын өндіру бойынша зертханалық зерттеулердің нәтижелері ұсынылған, ол тотықсыздандырғыш ретінде арнайы кокстың електен өткен ұсақ қалдықтарын қолдана отырып жүзеге асырылады. Оңтайлы үрдіс параметрлері кезінде темір мен марганецті тиімді бөлуге қол жеткізіліп, құрамында 93,2 %-ға дейін Fe бар металл фазасы түзілетіні анықталды. Сонымен қатар құрамында Mn мөлшері 38,3%-ға дейін және Fe 0,68%-ға дейін болатын марганец қожын алуға мүмкіндік береді. Алынған жоғары сапалы марганец қожы Mn/Fe жоғары қатынасымен (12÷66) сипатталады, бұл олардың марганец ферроқорытпаларын өндіруде кейіннен қолдануға жарамдылығын көрсетеді. Бұл тәсіл темір құрамдас өнім мен марганец қожын бір мезгілде өндіру арқылы темір-марганец кендерін кешенді пайдалануды қамтамасыз етеді және Қазақстанда темір-марганец шикізатын өңдеу тиімділігін арттырудың болашақ бағыты ретінде қарастырылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: темір-марганец кені, селективті тотықсыздану, тотықсыздандырғыш, жоғары сапалы марганец қожы, ферроқорытпа.

М. К. Джундибаев[1], К. С. Билялов[2], Е. Кобеген[3],
****А. С. Джундибаева[4], А. А. Мажит[5]***
[1]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Актобе;
[2]ТОО ERG Research and Development, Республика Казахстан, г. Астана;
[3]Национальный научно-практический центр «Тіл-Қазына» имени Шайсултана Шаяхметова», Республика Казахстан, г. Астана;
[4]Торайгыров университет», Республика Казахстан, г. Павлодар;
[5]Екибастузский инженерно-технический институт имени академика К. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Экибастуз.
Поступило в редакцию 14.05.26.
Поступило с исправлениями 16.05.26.
Принято в печать 03.06.26.

ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВОЙ РУДЫ С ПОЛУЧЕНИЕМ БОГАТОГО МАРГАНЦОВИСТОГО ШЛАКА

В условиях ухудшения качества марганцевого сырья и преобладания железомарганцевых руд в сырьевой базе Казахстана (до 70 % от общих запасов) особую актуальность приобретает разработка эффективных технологий их переработки. В работе представлены результаты лабораторных исследований по селективному извлечению железа и получению богатого марганцевого шлака из железомарганцевых руд карботермическим методом с использованием отсева спецкокса в качестве восстановителя. Установлено, что при оптимальных параметрах процесса достигается эффективное разделение железа и марганца с образованием металлической фазы, содержащей до 93,2% Fe. При этом формируется марганцовистый шлак с содержанием Mn до 38,3% и Fe-0,68%. Полученные богатые марганцовистые шлаки характеризуются высоким отношением Mn/Fe (12÷66), что свидетельствует об их пригодности для последующего использования в производстве марганцевых ферросплавов. Этот подход обеспечивает комплексное использование железомарганцевых руд за счет одновременного получения железосодержащего продукта и марганцевистого шлака и может рассматриваться как перспективное направление повышения эффективности переработки железомарганцевого сырья Казахстана.

Ключевые слова: железомарганцевая руда, селективное восстановление, восстановитель, богатый марганцевистый шлак, ферросплав.

SRSTI 53.31.21
https://doi.org/10.48081/BGQF2233

****A. Zhakan[1]***
[1]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3810-0528
*e-mail: armat.medetuly@gmail.com

MICROSTRUCTURAL FEATURES OF TECHNOGENIC RAW MATERIALS INTENDED FOR FE-CR-MN-SI ALLOY PRODUCTION

This study presents a comparative SEM/EDS investigation of three technogenic materials generated in ferrous metallurgy: chromium-bearing aspiration dust, iron-manganese ore fines, and coal sludge. Unlike conventional studies that mainly consider these materials separately for recycling and agglomeration applications, the present work evaluates their microstructural compatibility and potential combined utilization in Fe-Cr-Mn-Si alloy production. The objective was to determine their morphological characteristics and elemental distribution in order to assess their suitability as secondary metallurgical raw materials. The samples were examined using scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS). The results revealed pronounced structural and chemical heterogeneity in all investigated materials. Chromium-containing dust consists of fine agglomerated particles and contains oxide, silicate, and Cr-Fe spinel-type phases enriched with Mg and Al. Iron-manganese ore fines exhibit alternating oxide and silicate regions, with Fe and Mn predominantly occurring as oxide phases, while Si and Al are associated with aluminosilicates. Coal sludge demonstrates a mixed structure composed of carbon-rich organic matter and mineral inclusions represented by aluminosilicate, quartz, and carbonate phases containing Si, Al, Mg, Ca, Fe. The obtained results indicate that these technogenic materials are multiphase and chemically complex systems. After appropriate preparation and agglomeration treatment, they may be considered promising secondary raw materials for Fe-Cr-Mn-Si alloy production.

Keywords: technogenic wastes, chromium-bearing aspiration dust, iron-manganese ore fines; coal sludge; microstructure; scanning electron microscopy (SEM); waste utilization; ferroalloys.

Introduction

Ferrous metallurgy is a major sector of heavy industry, forming the raw material base for steel and a wide range of ferroalloys used in engineering and construction. The intensification of metallurgical production is accompanied by the formation of significant amounts of technogenic by-products, making their utilization both an environmental and technological issue. Steelmaking and ferroalloy plants generate large volumes of dust, sludges, slags, and fine fractions of ore and carbon materials that require further processing or safe disposal [1-3].

Fine-dispersed technogenic materials, including chromium-bearing aspiration dust, coal sludges, and iron-manganese ore fines, are of particular interest. Despite containing

significant amounts of valuable elements (Fe, Mn, Cr, Si, and C), their industrial reuse is limited by unfavorable granulometry, high moisture content, gangue components, and low mechanical strength. Consequently, a substantial share of these materials is stored on industrial sites, forming technogenic deposits that generate secondary dust emissions and create potential risks of soil and water contamination [4–6].

The processing of metallurgical wastes offers both environmental and economic advantages, as it reduces technogenic stockpiles while returning metal-bearing components to production. Among the available approaches, agglomeration methods-mainly briquetting and pelletizing - are widely applied to transform fine materials into mechanically stable products. The resulting agglomerates can be used as furnace charge components, enabling the recycling of previously underutilized raw materials.

Previous studies have mainly focused on the separate utilization of metallurgical dusts, sludges, and ore fines through briquetting, pelletizing, or direct recycling into ferroalloy and steelmaking processes [7–10]. Chromium-containing dusts have been investigated primarily as secondary chromium sources, while manganese ore fines have been studied as charge components for ferromanganese production. Coal sludges were mainly considered as carbon-containing reducing materials or auxiliary fuel components. In most reported studies, however, these technogenic materials were examined individually, with limited attention given to their combined utilization and microstructural compatibility in complex Fe-Cr-Mn-Si systems.

The investigation of the chemical composition, phase structure, and processing potential of ferrous metallurgy wastes is of both scientific and practical importance. Advancing this area supports more efficient use of primary raw materials, reduces production costs, and helps decrease the environmental impact of metallurgical operations [11].

An essential step in developing recycling strategies is the detailed characterization of the microstructure and morphology of metallurgical wastes. Scanning electron microscopy combined with energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS) enables the evaluation of particle shape, surface features, and local elemental distribution. These data are important for assessing material reactivity, selecting binders for agglomeration, and predicting phase transformations during high-temperature processing. Therefore, SEM/EDS analysis is a practical tool for determining the suitability of secondary raw materials for ferroalloy production.

These studies are particularly relevant to the development of Fe-Cr-Mn-Si alloys. Interest in this alloy system has increased due to the possibility of achieving a balanced combination of alloying elements and the required performance characteristics of steels. The use of technogenic materials as feedstock for their production can also improve resource efficiency and reduce the environmental impact associated with conventional metallurgical routes [12–15].

Materials and methods

Chromium-bearing aspiration dust is a fine particulate by-product collected in gas-cleaning systems during high-carbon ferrochrome production. It consists mainly

of fragmented chromium-containing mineral particles, with chromite spinel as the dominant phase. Chemically, the material is largely composed of Cr-, Mg-, Al-, and Fe-rich oxides, while the content of minor elements depends on furnace operating conditions and gas-cleaning efficiency.

As a by-product of ferrochrome smelting, aspiration dust is typically divided into several grades (e.g., HShP-01, HShP-02), depending on the conditions of formation and the stage of gas cleaning at which it is collected. In industrial practice, the material is captured in cyclones, electrostatic precipitators, and fabric filters installed on smelting furnaces.

The chemical composition of the investigated materials was determined using the wet chemical analysis method. The chemical composition of the chromium-bearing dust studied in this work is presented in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of chromium-bearing aspiration dust, wt.%

$Cr_{general}$	$Fe_{general}$	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	$S_{general}$	$P_{general}$
18.00-20.00	5.00-8.00	13.00-19.00	2.00-8.00	28.00-30.00	5.50-7.00	0.80-2.70	0.01-0.04

Iron-manganese ore fines are formed as a small-size fraction during mining, beneficiation, and screening of ore materials. They generally consist of particles below 10 mm and retain the main mineralogical features of the original ore. However, their high degree of fragmentation affects physical and mechanical properties, leading to increased dusting, lower strength, and reduced permeability compared to lump ore. The chemical composition of the fines examined in this study is given in Table 2.

Table 2 – Chemical composition of iron-manganese ore fines, wt.%

$Mn_{general}$	$Fe_{general}$	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	$S_{general}$	$P_{general}$
15.00-17.00	11.00-14.00	30.00-34.00	4.00-5.00	0.50-2.00	5.00-7.00	0.10-0.20	0.05-0.06

Coal sludge is a fine technogenic by-product formed during coal mining and preparation, mainly at the final stages of beneficiation such as flotation and hydraulic classification. It is typically obtained as a water-rich suspension composed of ultrafine coal particles (mostly <0.5 mm) mixed with mineral impurities and clay components, and is characterized by high inherent moisture.

The material originates from wet processing operations aimed at removing mineral matter and improving coal quality. During crushing, washing, and hydraulic separation, fine low-density coal particles are carried with the aqueous phase, while heavier mineral constituents settle. As a result, the finest fraction accumulates as a water-saturated sediment referred to as sludge.

In addition to organic carbon, coal sludge contains a mineral fraction represented by clay minerals, quartz, feldspars, and occasionally sulfide phases.

The technical analysis of coal sludge (ash content, moisture, volatile matter content and carbon solid) was carried out in accordance with the standard methodology. The

proximate analysis of coal sludge (moisture, ash, volatile matter, and fixed carbon) was carried out in accordance with the standard procedure. Moisture was determined by drying the sample to constant weight at 105 ± 5 ◦C. Ash content was obtained by combustion in a muffle furnace at 815 ± 10 ◦C to constant mass. Volatile matter was determined by heating the sample at 900 ± 10 ◦C for 7 min in a closed crucible without air access. The carbon solid content was calculated by difference: Csolid = 100%− (W + A + V), where W–moisture, A–ash, V–volatile matter. The methodology complies with the requirements of relevant standards (GOST 11014-2001 [16], GOST 11022-95 [17], GOST 6382-2001 [18]. The technical and chemical composition of the material studied in this work is presented in Table 3.

Table 3 – Technical and chemical composition of coal sludge, wt.%

Technical composition					Chemical composition					
A	W	V	S	C_{solid}	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	$P_{general}$
35.00-40.00	1.00-2.00	15.00-20.00	0.30-0.50	43.50-45.00	57.00-60.00	1.00-2.00	1.50-2.50	3.50-5.00	34.00-38.00	0.05-0.06

Microstructural analysis was performed using a ZEPTOOLS ZEM-20 scanning electron microscope (ZEPTOOLS, China). The instrument provides magnification up to 3.6 × 105 and a spatial resolution of ~5 nm at 20 kV. For poorly conductive samples, an internal beam deceleration mode was applied to minimize surface charging.

Elemental composition was determined by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) using an Oxford Instruments Ultim Max system with a silicon drift detector, operated via AZtecLive software. Spectra were acquired at accelerating voltages of 15–20 kV, ensuring reliable detection of major and minor elements.

Prior to analysis, samples were mechanically prepared, cleaned, and mounted on conductive holders. Low-conductivity materials were coated with a thin carbon layer to improve image stability. The EDS system was calibrated using certified reference standards.

The results are presented as secondary electron (SE) and backscattered electron (BSE) images, EDS spectra, and elemental maps processed in AZtec software. The combined SEM/EDS approach enabled the assessment of particle morphology together with local chemical composition.

Results and discussion

Figure 1 presents the morphology and elemental distribution of the chromium-bearing aspiration dust. SEM images at 100× magnification show a highly dispersed material composed of irregular particles with a porous surface. Particle sizes range from a few micrometers to several hundred micrometers, with fine fractions predominating.

The presence of loose agglomerates and clustered particles suggests that dust formation was associated with both mechanical entrainment and high-temperature condensation followed by secondary agglomeration in the furnace gas flow.

EDS mapping reveals pronounced chemical heterogeneity. The main elements identified are Cr, Si, Al, Mg, Fe, and O, indicating a multicomponent composition.

Metal-bearing regions coexist with oxide- and silicate-rich areas, reflecting the complex phase structure of ferrochrome aspiration dust. Such heterogeneity should be considered in subsequent processing and agglomeration stages.

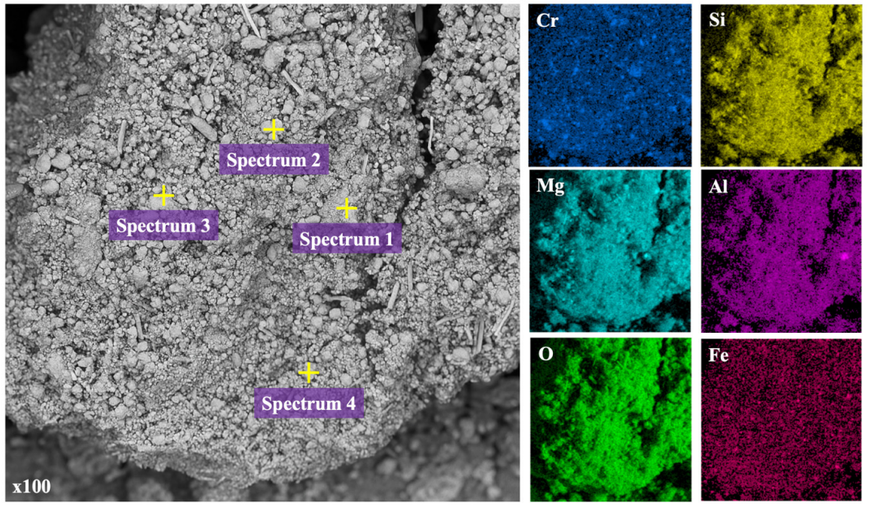


Figure 1 – SEM image and EDS elemental distribution maps of chromium-containing aspiration dust

EDS elemental maps further illustrate the phase heterogeneity of the chromium-bearing dust. Chromium is distributed relatively uniformly, indicating its presence mainly in oxide and spinel phases such as Cr2O3 and FeCr2O4. Silicon is concentrated in localized regions associated with silicate phases. Its spatial correlation with aluminum may indicate the presence of aluminosilicate phases, while magnesium-rich zones may be associated with Mg-containing silicates and spinel-like structures, which is consistent with previously reported studies on ferroalloy technogenic materials [3]. Iron is fairly evenly distributed and frequently overlaps with chromium-enriched areas, pointing to Fe-Cr oxide and spinel compounds as the main Fe-bearing phases. The atomic composition of the selected spectra is given in Table 4.

Table 4 – Atomic composition of each spectrum, %

Spectrum	Cr	Fe	Si	Mg	Al	O
1	13.35	0.61	2.82	17.16	2.18	63.86
2	3.75	9.58	8.11	21.87	1.13	55.57
3	24.72	9.65	9.19	23.25	1.27	31.91
4	4.12	0.23	1.37	28.75	0.65	64.88

According to the data presented in the table, Spectrum 1 indicates the presence of magnesium-chromium oxides. Spectrum 2 reflects the occurrence of silicate and aluminosilicate phases. In Spectrum 3, chromium reaches the highest concentration, while magnesium and iron make a significant contribution, suggesting the predominance of mixed Cr-Fe-Mg oxide phases. Spectrum 4 is characterized by elevated Mg and O contents, which confirms the dominance of oxide phases in this region.

Figure 2 presents the morphology and elemental composition of the iron-manganese ore fines.

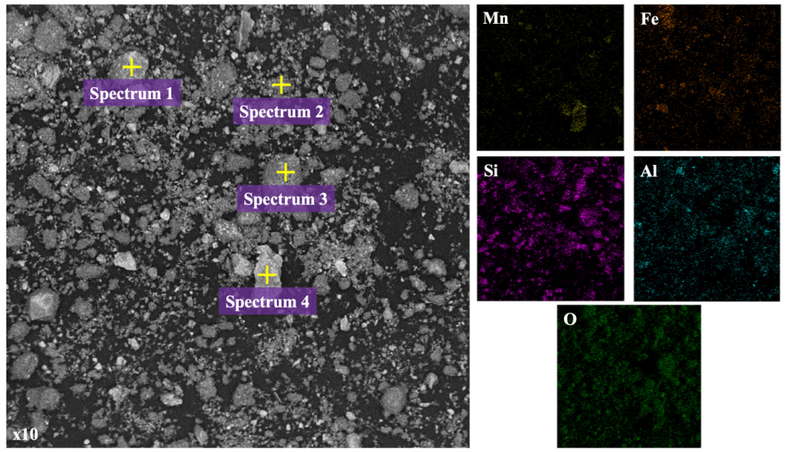


Figure 2 – SEM image and EDS elemental distribution maps of the iron-manganese ore fines

Figure 2 shows SEM images and EDS elemental maps of the iron-manganese ore fines. The material exhibits pronounced microstructural heterogeneity, with particles differing in size and shape. Fine grains dominate the surface, while larger angular aggregates are also present. Particle sizes range from a few to several tens of micrometers, reflecting intensive fragmentation during ore processing.

Elemental mapping confirms the mineralogical complexity of the fines. Iron and manganese are relatively uniformly distributed and represent the main ore-forming components, indicating the predominance of Fe-Mn oxide phases. Silicon and aluminum occur in localized regions associated with silicate inclusions. The strong oxygen signal across the mapped area confirms that oxide and silicate phases dominate the material. The atomic compositions of the selected spectra are given in Table 5.

Table 5 – Atomic composition of each spectrum, %

Spectrum	Mn	Fe	Si	Al	O
1	4.14	20.65	6.15	4.07	64.90
2	5.57	4.53	12.90	9.30	67.69
3	4.48	1.35	27.53	2.79	62.89

4	33.83	1.25	1.27	1.27	62.09

The EDS data presented in the table reflect the chemical composition of individual surface regions of the iron-manganese ore fines (-10 mm fraction). Spectrum 1 is characterized by a predominance of iron with moderate amounts of manganese and silicon. The high oxygen content indicates the formation of Fe-Mn oxide phases, likely hematite-type or mixed oxides. Spectrum 2 shows lower concentrations of iron and manganese, while silicon and aluminum are significantly higher, suggesting the presence of aluminosilicate phases. Spectrum 3 is enriched in silicon with minor amounts of iron and manganese, indicating the predominance of silica-rich phases such as quartz or secondary silicates. Spectrum 4 is distinguished by a clear predominance of manganese and a lower iron content; the elevated oxygen level confirms the formation of manganese oxide phases.

Figure 3 presents the morphology and elemental distribution of the coal sludge sample. SEM images show a heterogeneous structure with a wide particle size range, where coarse aggregates coexist with fine particles, indicating the presence of components with different physical properties.

Elemental mapping reveals that carbon and oxygen dominate, while Si, Al, Mg, and Fe are also detected. This confirms the complex composition of coal sludge, consisting of carbon-rich organic matter together with mineral and oxide phases.

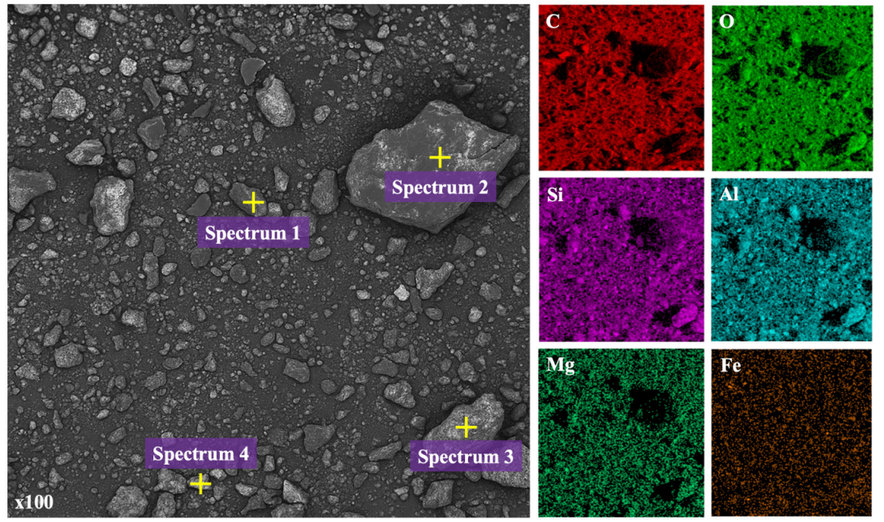


Figure 3 – SEM image and EDS elemental distribution maps of the coal sludge

Elemental maps further illustrate the distribution of mineral phases in the coal sludge. Carbon is mainly associated with organic coal matter, whereas oxygen, silicon, and aluminum correspond to the inorganic fraction, primarily aluminosilicate minerals such

as quartz and related silicates. Magnesium occur in silicate regions. Iron is concentrated in individual mineral grains and is mainly linked to iron oxide phases (Fe2O3, Fe3O4). The atomic compositions of the analyzed spectra are presented in Table 6.

Table 6 – Atomic composition of each spectrum, %

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	Fe
1	74.00	22.67	0.06	1.22	1.80	0.11
2	82.55	13.14	0.03	1.00	1.88	0.22
3	39.25	47.15	0.24	3.30	9.72	0.21
4	30.39	51.27	1.11	6.06	9.56	1.71

According to the compositional data, Spectrum 1 is characterized by a clear predominance of carbon, indicating the dominance of the organic carbon phase. Minor amounts of Al and Si suggest the presence of mineral impurities. Spectrum 2 is also dominated by the organic component. Spectrum 3 is distinguished by a more pronounced mineral composition: carbon and oxygen are present in comparable amounts, while the occurrence of Si and Al indicates aluminosilicate phases. Spectrum 4 shows a predominance of oxygen- and aluminosilicate-rich phases, with a relatively lower carbon content.

Overall, the coal sludge consists of two principal components: a carbon-rich organic phase and a quartz-aluminosilicate mineral phase containing Si, Al, Mg, and Fe.

Conclusions

A comparative SEM/EDS analysis was conducted for chromium-bearing aspiration dust, iron-manganese ore fines, and coal sludge. All materials exhibit pronounced morphological and chemical heterogeneity, confirming their multicomponent nature. The chromium-containing dust consists mainly of fine agglomerated particles with Cr-Fe spinel and oxide-silicate phases. Iron-manganese ore fines demonstrate a multiphase structure with Fe-Mn oxides associated with siliceous and aluminosilicate inclusions. Coal sludge is composed of carbon-rich organic matter intergrown with mineral phases containing Si, Al, Mg, and Fe.

The identified microstructural characteristics suggest that these technogenic materials may serve as promising secondary raw resources for metallurgical processing. Similar approaches have been widely reported for the recycling of fine ferroalloy dusts, metallurgical sludges, and ore fines through agglomeration methods such as briquetting and pelletizing, followed by their utilization in submerged arc furnaces and other pyrometallurgical units. In particular, chromium-bearing dusts are considered valuable sources of Cr and Fe, while manganese ore fines can partially substitute natural manganese-containing raw materials in alloy production. Coal sludge containing residual carbon may additionally act as a reducing agent and energy-bearing component during smelting processes. The complex mineral composition and fine particle size of the studied materials indicate the feasibility of their integrated utilization in the production of Fe-Cr-Mn-Si alloys after appropriate preparation and agglomeration treatment. Such an approach contributes to waste recycling, reduction of raw material losses, and improvement of resource efficiency in ferroalloy production.

REFERENCES

1 **Zhuchkov, V. I. et al.** The Using of Technogenic Waste from Ferroalloy Production. In Proceedings of the IV Congress «Fundamental Research and Applied Developing of Recycling and Utilization Processes of Technogenic Formations» (TECHNOGEN 2019), Ekaterinburg, Russia, 2020; Knowledge E: Ekaterinburg, Russia, 2020. – P. 451–455.

2 **Makhambetov, Y., Zhakan, A., Gabdullin, S., Akhmetov, A., Burumbayev, A., Zhunusov, A.** Study on the Synthesis of FeCrMnSi Ferroalloy Using Technogenic Raw Materials. Acta Metall. Slovaca 2025. – 31(2). – P. 113–118. – https://doi.org/10.36547/ams.31.2.2137

3 **Sariyev, O., Abdirashit, A., Almagambetov, M., Nurgali, N., Kelamanov, B., Yessengaliyev, D., Mukhambetkaliyev, A.** Assessment of Physicochemical Properties of Dust from Crushing High-Carbon Ferrochrome: Methods for Agglomeration. Materials 2025. – 18. – 903. – https://doi.org/10.3390/ma18040903

4 **Pereira C., Tavares R.** Utilization of ferrochrome dust in ferroalloy production // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 176. – P. 1160–1168.

5 **Kumar A., Singh R.** Recovery of manganese from low-grade ores and waste fines: a review // Hydrometallurgy. – 2019. – Vol. 187. – P. 105–122.

6 **Zhou Y., Li J., Wang X.** Coal slurry waste as alternative raw material for metallurgical and construction applications // Fuel Processing Technology. – 2017. –Vol. 161. -– P. 105–115.

7 **Sariyev, O., Almagambetov, M., Nurgali, N., Bilyalov, K., Kelamanov, B., Yessengaliyev, D., Abdirashit, A.** Briquetting and Remelting of Aspiration Dust Generated During High-Carbon Ferrochrome Crushing in Direct Current Electric Arc Furnaces. Materials 2026. – 19. – 1149. – https://doi.org/10.3390/ma19061149

8 **Sariyev, O., Almagambetov, M., Nurgali, N., Abikenova, G., Kelamanov, B., Yessengaliyev, D., Abdirashit, A.** Development of a Briquetting Method for Dust from High-Carbon Ferrochrome (HC FeCr) Crushing Using Vibropressing on an Industrial Scale and Its Subsequent Remelting. Materials 2025. – 18. – 2608. – https://doi.org/10.3390/ma18112608

9 **Sane, R.** Beneficiation and Agglomeration of Manganese Ore Fines (An Area So Important and Yet So Ignored). IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – 285. – 012033. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/285/1/012033

10 **van Netten, K., Moreno-Atanasio, R., Galvin, K. P.** A Kinetic Study of a Modified Fine Coal Agglomeration Process. Procedia Eng. – 2015. – 102. – P. 508–516. – https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.201

11 **Druinsky M. I., Zhuchkov V. I.** Poluchenie kompleksny`x ferrosplavov iz mineral`nogo sy`r`ya Kazaxstana [Production of complex ferroalloys from mineral raw materials of Kazakhstan]. – Alma-Ata : Nauka. – 1988. – 208 P. (In Russian)

12 **Makhambetov, Y.; Gabdullin, S.; Zhakan, A.; Saulebek, Zh.; Akhmetov, A.; Zulhan, Z.; Mukanov, S.** Production of Complex Fe-Si-Mn-Cr Ferroalloy Using High-Ash Coal: A Sustainable Metallurgical Approach. Mater. Res. Express. – 2024. – https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad4f58

13 **Bennett, A.** The Outlook for Ferro-Manganese, Silico-Manganese and Ferro-Chrome. In Proceedings of INFACON VIII. – 1998. – P. 23–28.

14 **Tleugabulov, S. M., Tazhiev, E. B.** E`nergosberegayushhaya texnologiya proizvodstva ferrosplavov [Energy-saving ferroalloy production technology] // Steel. – 2017. – № 10. – P. 13–18. (In Russian)

15 **Kozhamuratov, R. U. and others.** Utilizaciya otxodov ferrosplavnogo proizvodstva [Waste disposal of ferroalloy production] // Materials of the international scientific conference "Global science and innovations. – 2017. – P. 207–213. (In Russian)

16 GOST 11014-2001. Ugli. Metody` opredeleniya vlagi, zoly`, vy`xoda letuchix veshhestv i neletuchego ostatka. [Coals. Methods for determination of moisture, ash, volatile matter and non-volatile residue.] – M. : Gosstandart, 2001. (In Russian)

17 GOST 11022-95. Ugol` i produkty` ego pererabotki. Obshhie texnicheskie trebovaniya. [Coal and products of its processing. General technical requirements.]. – M. : Gosstandart, 1995. (In Russian)

18 GOST 6382-2001. Ugli. Metody` texnicheskogo analiza. [Coals. Methods of proximate analysis.] – M. : Gosstandart, 2001. (In Russian)

Received 28.04.26.
Received in revised form 28.04.25.
Accepted for publication 02.06.26.

***А. М. Жақан**[1]
[1]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
28.04.26 ж. баспаға түсті.
28.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

FE-CR-MN-SI ҚОРЫТПАЛАРЫН ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН ТЕХНОГЕНДІ ШИКІЗАТТЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Осы зерттеуде қара металлургия саласынан алынған үш түрлі техногенді материалдың – хромқұрамдас аспирациялық шаңның, темір-марганец кенінің ұсақ фракциясы және көмірлі шламның микроқұрылымы зерттелді. Жұмыстың мақсаты аталған материалдардың морфологиялық ерекшеліктері мен элементтік құрамын анықтап, оларды металлургиялық үрдістерде пайдалану мүмкіндігін бағалау болып табылады. Үлгілер сканерлеуші электрондық микроскопия және энергиядисперсиялық рентгендік талдау (SEM-EDS) әдістерімен зерттелді. Нәтижелер барлық материалдарда айқын құрылымдық және химиялық әртектіліктің бар екенін көрсетті. Хромқұрамдас шаң ұсақ агломерацияланған бөлшектерден тұрады және құрамында Mg және Al қатысуымен түзілген Cr-Fe типті шпинельді, сондай-ақ оксидті және силикатты фазалар бар. Темір-марганец кенінің ұсақ фракциясында оксидті және силикатты аймақтардың кезектесуі байқалады, мұнда Fe мен Mn негізінен оксидтер түрінде кездеседі, ал Si мен Al алюмосиликатты фазалармен байланысқан. Көмірлі шлам көміртекке бай органикалық фазадан және құрамында Si, Al, Mg, Ca, Fe және K бар алюмосиликатты, кварцты және карбонатты минералдық фазалардан тұратын аралас құрылымға ие. Алынған нәтижелер зерттелген материалдардың көпфазалы және химиялық тұрғыдан күрделі екенін көрсетеді. Тиісті алдын ала дайындаудан кейін оларды Fe-Cr-Mn-Si жүйесіндегі қорытпаларды өндіруде екіншілік шикізат ретінде қарастыруға болады.

Кілтті сөздер: техногендік қалдықтар; хромқұрамдас аспирациялық шаң; темір-марганец кенінің қалдықтары; көмірлі шлам; микроқұрылым; сканирлеуші электрондық микроскоп (СЭМ); қалдықтарды кәдеге жарату; ферроқорытпалар.

***А. М. Жақан**[1]
[1]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 28.04.26.
Поступило с исправлениями 28.04.26.
Принято в печать 02.06.26.

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СПЛАВОВ FE-CR-MN-SI

Внастоящемисследованииизученамикроструктуратрёхвидовтехногенных материалов чёрной металлургии: хромсодержащей аспирационной пыли, мелочи железомарганцевой руды и угольного шлама. Целью работы являлось определение морфологических особенностей и элементного состава данных материалов для оценки их потенциала использования в металлургических процессах. Образцы исследованы методами сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализом (SEM-EDS). Результаты показали выраженную структурную и химическую неоднородность всех исследованных материалов. Хромсодержащая пыль представлена мелкими агломерированными частицами и включает оксидные, силикатные и шпинельные фазы типа Cr-Fe с участием Mg и Al. Мелочь железомарганцевой руды характеризуется чередованием оксидных и силикатных областей, при этом Fe и Mn преимущественно присутствуют в форме оксидов, а Si и Al связаны с алюмосиликатными фазами. Угольный шлам имеет смешанную структуру, состоящую из углеродсодержащей органической фазы и минеральных включений, представленных алюмосиликатными, кварцевыми и карбонатными фазами, содержащими Si, Al, Mg, Ca, Fe и K. Полученные результаты свидетельствуют о многофазном и химически сложном составе исследованных материалов. После соответствующей

подготовки они могут рассматриваться в качестве вторичного сырья для производства сплавов системы Fe-Cr-Mn-Si.

Ключевые слова: техногенные отходы; хромсодержащая аспирационная пыль; отсевы железо-марганцевой руды; угольный шлам; микроструктура; сканирующий электронный микроскоп (СЭМ); утилизация отходов; ферросплавы.

SRSTI 53.03.05

https://doi.org/10.48081/BGQF2234

A. Zhunusov[1], *R. Tyulyubayev[2], *A. Zhunusova[3], A. Bakirov[4], Onuralp Yucel[5]

[1,2,3,4]Toraighyrov University, Republic of Kazahkstan, Pavlodar;

[6]Istanbul Technical University, Turkey, Istanbul.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3742-3467

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

*e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz

LARGE-LABORATORY SMELTING OF FERROSILICON IN AN ORE-THERMAL FURNACE

This paper presents the results of large-scale laboratory ferrosilicon smelting in an 80 kVA ore-thermal furnace using recycled man-made materials. The possibility of partially replacing steel chips with iron ore agglomerate obtained from ferrous sands of alumina production, as well as the use of aluminum slag-based pellets, is investigated. The influence of the chemical composition of the charge components on the physicochemical and electrical characteristics of the smelting process is determined. It is shown that increased SiO_2 and Al_2O_3 contents in the pellets promote the formation of silicate melts, stabilization of the slag phase, and improved conditions for silicon reduction. The identified kinetic patterns allow for temperature optimization. The developed technology also contributes to a significant reduction in energy consumption. It is determined that the use of recycled resources reduces the content of harmful impurities in the alloy and reduces production costs. The obtained results confirm the technological efficiency and environmental feasibility of using complex man-made materials in ferrosilicon smelting.

Keywords: Ferrosilicon, ore-thermal furnace, man-made waste, iron ore agglomerate, ferrous sands, electrical resistancee.

Introduction

Steel production has traditionally occupied a key position in the structure of the metallurgical industry and plays a decisive role in the development of the global economy [1; 2; 3]. Steel is a basic structural material widely used in construction, mechanical engineering, energy, and other industries, which accounts for the steady growth of its production volumes [4; 5].

Over the past 20–30 years, there has been a significant increase in global steel production, driven by industrialization and growing consumption in developing countries [6]. However, such intensive development of the ferrous metallurgy industry is accompanied by an increase in anthropogenic pressure on the environment. The attention of the scientific community and industrial experts is increasingly focused on

the environmental aspects of metallurgical plants, including air pollutant emissions, wastewater discharges, and the generation of significant volumes of solid waste [7; 8].

Of particular relevance is the accumulation of metallurgical waste, such as slag, dust, sludge, and iron-containing by-products, the volumes of which reach millions of tons annually [9; 10]. Their storage in waste dumps and sludge ponds leads to land degradation, contamination of soil and water resources, and the loss of valuable components that could otherwise be recycled. Therefore, the development of effective technologies for processing and recycling metallurgical waste is a priority for modern metallurgical science and practice, aimed at increasing resource efficiency and reducing environmental impacts [11].

This research paper proposes an approach based on the integrated integration of secondary resources into metallurgical production. Recycled iron-containing material in the form of iron ore agglomerate obtained from industrial waste (ferrous sands from alumina production) is used as the feedstock [12]. Additionally, aluminum slags, pre-processed and agglomerated into pellets, are added to the batch [13]. The proposed technology is focused on the production of ferrosilicon using exclusively recycled materials, eliminating the need for natural raw materials. This approach not only facilitates the recycling of accumulated waste, but also the formation of a closed recycling cycle, which reduces the environmental impact and increases the economic efficiency of metallurgical production.

Materials and methods

Large-scale laboratory smelting of ferrosilicon was conducted in the Ferroalloys and Recovery Processes Laboratory of the Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute (Karaganda) in an 80 kVA ore-thermal furnace using iron ore agglomerate obtained from ferruginous sands – a waste product of alumina production – as a charge. The chemical composition of the materials is presented in Table 1.

In large-scale laboratory tests, quartzite, dry coke, and steel turnings mixed with iron ore agglomerate were used as charge mixtures. The smelting process was characterized by a stable current regime, and the technological process was carried out in standard mode. Uniform gas evolution was observed over the entire surface of the furnace throat, the electrode seating in the charge was deep and stable, and the electrode load was also stable. After tapping the metal, processing the furnace throat, and loading a new batch of charge, the current load leveled out.

Table 1 – Chemical composition of charge materials, %

Material	Chemical composition, %						
	Fe_{gen}	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	S	P
Iron ore agglomerate	55,6	6,58	16,5	3,62	13,28	0,86	0,13
Quartzite	-	-	-	-	97,2	-	-
Pellets	5,05	25,6	0,57	0,50	68,2	0,01	0,02

Figure 1 shows an 80 kVA ore-thermal furnace installed in the Ferroalloys and Recovery Processes laboratory of the Zh. Abishev Chemical Institute (Karaganda).

Figure 1 – 80 kVA ore-thermal furnace

Results and Discussion

The modern development of metallurgy is accompanied by the generation of significant volumes of finely dispersed man-made waste – dust, sludge, filter cakes, and metal oxides – occurring at all stages of ferroalloy and steel production. This is particularly characteristic of valuable alloys such as high-carbon ferrochrome, whose production results in significant metal losses in the form of crushed dust and gas cleaning waste [14].

Direct remelting of finely dispersed waste, despite its apparent simplicity, is associated with high losses due to particle entrainment by ascending gas and heat flows, as well as process difficulties in the melting zone. At the same time, agglomeration of such materials is a more efficient processing method, as it allows the formation of strong and heat-resistant agglomerates suitable for reloading into smelting units [15]. At the same time, despite the presence of developed infrastructure and equipment at ferroalloy plants in Kazakhstan, a comprehensive approach to processing mixed waste, such as aspiration dust, coal slurry, and ore fines, remains lacking. Most existing solutions are limited to highly specialized recycling schemes for individual waste types without ensuring their full integration into core smelting processes.

When using iron ore sinter instead of steel turnings, the differences in the mechanisms of metallic phase formation must be taken into account. With steel turnings, the iron is already in metallic form and is ready to dissolve silicon. When using sinter, the processes of iron reduction from oxides and melting of the silicate components of the charge occur in parallel. The theoretical temperature for silicon reduction by carbon is 1669 °C, while the eutectic temperature in the $FeO–SiO_2$ system is only 1178 °C. Therefore, it is critical to control the furnace›s electrical conditions to prevent premature slag formation and drainage before the main reduction reactions are complete.

The theoretical analysis of silicon reduction in the presence of iron is based on the thermodynamic principles of the Fe-Si system. Considering that the ferrosilicon production process involves a whole range of competing reactions, an analysis was performed using the phase diagram of the Fe-Si system (Figure 2).

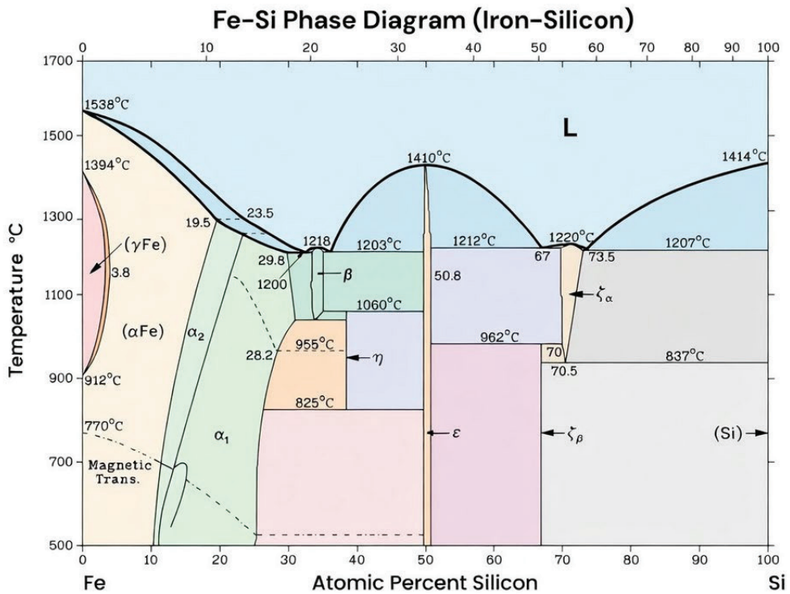


Figure 2 – Equilibrium state diagram of the Fe-Si system

According to Figure 2, silicon is a ferrite-forming element, which leads to a narrowing of the γ-Fe region. The maximum solubility of silicon in γ-Fe is 1,63 % silicon. The two-phase region (α + γ) extends to 1,94 % silicon. Several silicides are present in the Fi-Si system: Fe_3Si (14,2 % silicon), Fe_2Si (20,0 % silicon), Fe_5Si_3 (23.1 % silicon), FeSi (33,4 % silicon), and $FeSi_2$ (50,1 % silicon). Silicide $FeSi_2$ exists in two modifications: high-temperature in the range of 937–1220 °C and low-temperature, existing at temperatures below 937 °C. The high-temperature modification is a non-stoichiometric compound existing in a certain range of silicon concentrations. Disilicide, in turn, is a compound deficient in iron atoms, which at 937 °C undergoes a eutectoid transformation into the steochiometric silicide $FeSi_2$ and silicon [16].

Silicon and iron form thermodynamically stable compounds – silicides in the solid state and associates in the liquid state – which reduces silicon activity in industrial ferrosilicon and improves the thermodynamic conditions for its reduction from silica with carbon in the presence of iron. Iron ore agglomerate mixed with steel turnings at a ratio of 50 % is used as the starting material.

Ferrosilicon is produced by reducing silicon from quartzite. Metallurgical coke with added steel turnings is used as the reducing agent. The addition of iron ore agglomerate to the batch can result in oxygen-containing iron compounds reacting with SiO_2 at relatively low temperatures, forming silicate solutions [17].

The theoretical temperature for the reduction of silicon by carbon according to the reaction

$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$$

The eutectic temperature in the FeO-SiO_2 system is 1669 °C, while the eutectic temperature in the FeO-SiO_2 system is 1178 °C.

When using iron ore sinter in the ferrosilicon smelting charge, the melting of the charge, rather than its reduction, will be the primary process. Melting processes lead to the formation of silicates in the furnace bath, where the electrical resistance of the charge decreases, the components separate, and silicate slag accumulates, leading to furnace malfunction. However, studies of the electrical resistance of the charge did not reveal these drawbacks.

Figure 3 shows that at temperatures up to 950 °C, the resistance of the experimental mixture with sinter is lower than that of the traditional mixture with chips. This is explained by the presence of a small amount of low-melting iron compounds, such as fayalite (Fe_2SiO_4), in the sinter.

After iron reduction above 1000 °C, the resistance values of the experimental and comparative mixtures become comparable. This confirms the feasibility of replacing scarce steel chips with iron ore sinter, which will reduce its consumption in the ferroalloy industry.

It should be noted that this advantage cannot be explained by the higher resistivity of sinter. As shown in Figure 4, its resistance is higher only in the 700–960 °C range compared to ferrous sand and unfluxed sinter. The electrical resistance of the mixtures as a whole is significantly affected not only by the resistivity of the individual components, but also by the ratio of the conductive (reducing agents) to non-conductive (sinter, quartzite) components.

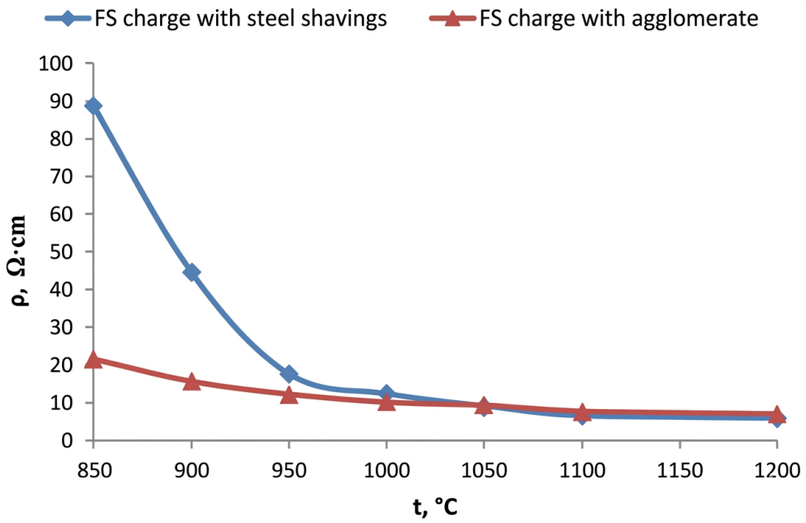


Figure 3 – Dependence of specific electrical resistance on temperature of comparative and experimental mixtures for smelting ferrosilicon

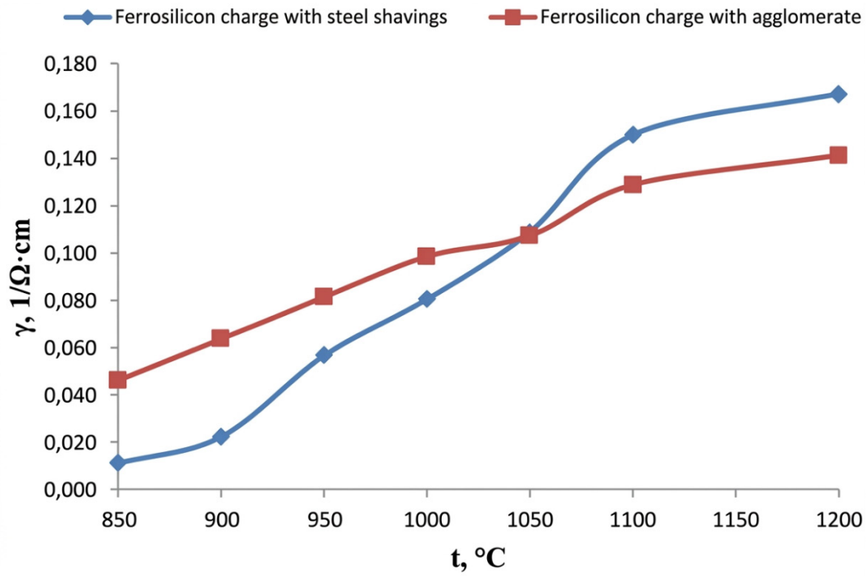


Figure 4 – Dependence of specific electrical conductivity on temperature of comparative and experimental mixtures for smelting ferrosilicon

The presence of up to 15–25 % of the total amount of silicon and aluminum oxides in the agglomerate obtained from alumina production waste will not have a significant negative impact on the ferrosilicon smelting process, as they are the main components of the batch.

The chemical composition of the pellets, containing 68,2 % SiO_2 and 25,6 % Al_2O_3, has a particular impact on the ferrosilicon smelting process. A high silica content increases the total amount of silicon-containing components in the batch, which intensifies the carbothermic reduction of silicon. At the same time, the presence of aluminum oxide promotes the formation of more viscous aluminosilicate slags, which affects the rheological properties of the melt and can slow mass transfer processes.

The presence of Al_2O_3 in the system also alters the reduction mechanism, as aluminum can partially participate in reduction reactions, reducing oxygen activity in the melt. This facilitates more complete silicon extraction and increases its content in the alloy. However, increasing the proportion of the aluminosilicate phase requires more precise temperature control, as the slag liquidus temperature rises.

Furthermore, the low content of harmful impurities (S and P) in the pellets has a positive effect on the quality of the ferrosilicon, reducing the likelihood of alloy contamination. Thus, the chemical composition of the pellets has a complex effect on the thermodynamics, reduction kinetics, and physical properties of the slag-metal system.

The chemical composition of the resulting experimental ferrosilicon with aluminum is presented in Table 2.

Table 2 – Chemical composition of ferrosilicon, %

Name of the alloy	Si	Al	Ca	C	Mn	P
Ferrosilicon (FS-45 l)	47,8	2,5	1,50	0,20	1,30	0,04

Thus, it should be emphasized that steel turnings contain 1.5–2.5 % manganese, chromium, and non-ferrous metals, which will completely become part of the smelted ferrosilicon. The experimental iron ore and sinter are virtually free of these elements, so the resulting ferrosilicon will be pure.

Large-scale laboratory tests conducted at the Zh. Abishev Chemical Mechanical Institute (Karaganda) confirmed the feasibility of producing ferrosilicon using iron ore sinter obtained from ferrous sands – a waste product of alumina production – as a supplementary feedstock to steel turnings. Partially replacing steel turnings with 50 % iron ore sinter reduces the cost of ferrosilicon.

Financing information

The research was carried out within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the competition for grant funding for scientific and (or) scientific and technical projects for 2024–2026 under the project AP23488812 «Development and research of technology for smelting ferrosilicon with high aluminum content using substandard ashes and aluminum slags».

Conclusions

Based on the conducted research and large-scale laboratory testing, the following conclusions can be drawn:

1 The technical feasibility and technological efficiency of smelting ferrosilicon (FS-45l) using up to 50 % iron ore agglomerate from alumina production waste has been proven;

2 It has been established that at temperatures above 1000 °C, the electrical resistance of the experimental charge is comparable to that of a traditional charge, ensuring a stable electrothermal smelting regime;

3 It has been shown that the chemical composition of aluminum slag-based pellets (high SiO_2 and Al_2O_3 content) has a significant impact on the smelting process: it promotes the formation of aluminosilicate slags, stabilizes the melt, and improves the conditions for silicon reduction;

4 It has been established that the presence of Al2O3 affects slag viscosity and requires temperature optimization, but simultaneously contributes to an increase in silicon extraction;

5 The use of man-made materials allows for the production of ferrosilicon with a higher purity of impurities (Mn, Cr, S, P);

6 The use of complex secondary raw materials reduces production costs and the environmental impact, implementing the principles of resource conservation and «green metallurgy».

REFERENCES

1 Pyrometallurgical Technology for Extracting Iron and Zinc from Electric Arc Furnace Dust [Text] / N. V. Nemchinova [et al.] //Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 10. – P. 6204. – https://doi.org/10.3390/app13106204.

2 **Maia, T. A. C.** Survey on the electric arc furnace and ladle furnace electric system [Text] / T.A.C Maia [et al.] // Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications. – 2022. – Vol.49. – P. 976–994. – https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2128550.

3 **Amarjeet, S.** Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations—A Review [Text] / S. Amarjeet [et al.] // International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). 2017. – Vol.4. – P.22–41. – https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.4.4.

4 **Kantemirov, V. D.** The main trends of development of the iron ore industry in Russia [Text] / V.D. Kantemirov [et al.] // News News of the Ural State Mining University. – 2019. – Vol. 2. – P. 80–86. – https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-80-86.

5 **Zhang, Q.** Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry [Text] / Q. Zhang [et al.] //Applied Energy. – 2017. – Vol. 191. – P. 502–520. – https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.072.

6 **Olmez, G. M.** The environmental impacts of iron and steel industry: A life cycle assessment study [Text] / G. M. Olmez [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 130. – P. 195–201. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.139.

7 **Tian, S.** Inherent potential of steelmaking to contribute to decarbonisation targets via industrial carbon capture and storage [Text] / S.Tian [et al.] // Nature Communications. – 2018. – Vol. 9. – P. 4422. – https://doi.org/10.1038/s41467-018-06886-8.

8 **Chen, Q.** Assessment of low-carbon iron and steel production with CO2 recycling and utilization technologies: A case study in China [Text] / Q. Chen [et al.] // Applied Energy. – 2018. – Vol. 220. – P.192–207. – https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.043.

9 **Sheshukov, O. Y.** Wasteless Joint Processing of Ladle Furnace and Electric Arc Furnace Slags [Text] / O. Y. Sheshukov, D. K. Egiazar'yan, D. A. Lobanov // Steel in Translation. – 2021. – Vol. 51. – P. 156–162. – https://doi.org/10.3103/S0967091221030116.

10 **Belskii, S. S.** Current state of steelmaking slag processing [Text] / S. S. Belskii, A. A. Zaitseva, A. A. Tyutrin, Z. Z. Ismoilov, N. A. Baranov, Y. V. Sokolnikova // iPolytech Jornal. – 2021. – Vol. 25. – P. 782–794. – https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794.

11 **Aziz, I. H.** Recent Developments in Steelmaking Industry and Potential Alkali Activated Based Steel Waste: A Comprehensive Review [Text] / I. H. Aziz [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 1948. – https://doi.org/10.3390/ma15051948.

12 **Zhunusova, A. K.** Issledovaniya fiziko-khimicheskikh svoystv zhelezorudnogo aglomerata [Research of physical and chemical properties of iron ore agglomerate] [Text] / A.K. Zhunusova [et al.] // Science and technology of Kazakhstan. – 2024. – № 1. – P. 154–163. – https://doi.org/10.48081/RPJE8094.

13 **Zhunusov, A. K.** Study of physical and chemical properties of granules obtained from aluminum slags [Text] / A. K. Zhunusov [et al.] // Science and technology of Kazakhstan. – 2025. – 4. – P. 262–274. – https://doi.org/10.48081/MMQL5744.

14 **Makhambetov, Y.** Resource-Efficient Smelting Technology for FeCrMnSi Ferroalloy Production from Technogenic Wastes in an Ore-Thermal Furnace [Text] / Y. Makhambetov [et al.] // Metals. – 2025. – Vol. 15. – P. 1318. – https://doi.org/10.3390/met15121318.

15 **Makhambetov, Y. N.** Research on the Possibility of Obtaining Medium-Carbon Ferromanganese from the Djezdinskoe Deposit [Text] / Y.N. Makhambetov [et al.] // Kompleks. Ispolz. Miner. Syra (Complex Use Miner. Resour.) – 2024. – Vol. 331. – P.101–108. – https://doi.org/10.31643/2024/6445.43.

16 **Makhambetov, Y.** Modeling the Ferrosilicomanganese Smelting Process Using Manganese-Rich Slag [Text] / Y. N. Makhambetov [et al.] // Acta Metallgica Slovaca. – 2024. – Vol. 30. – P. 29–33. – https://doi.org/10.36547/ams.30.1.1998.

17 **Yessengaliyev, D.** Application of a complex Si–Al–Fe reducing agent for the production of a nickel-containing alloy [Text] / Yessengaliyev, D. [et al.] // Scientific Reports. – 2026. – https://doi.org/10.1038/s41598-026-45605-y.

Received 13.04.26.
Received in revised form 14.04.26.
Accepted for publication 21.05.26.

А. Жунусов[1], *Р. Тюлюбаев[2], *А. Жунусова[3], А. Бакиров[4], Onuralp Yucel[5]
[1,2,3,4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[5]Стамбул техникалық университеті, Түркия Республикасы, Стамбул қ.
13.04.26 ж. баспаға түсті.
14.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
21.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КЕНДІ ТЕРМИЯЛЫҚ ПЕШТЕ ФЕРРОСИЛИЦИЙДІ ІРІ ЗЕРТХАНАЛЫҚ БАЛҚЫТУ

Бұл мақалада қайта өңделген жасанды материалдарды пайдалана отырып, 80 кВА кен-термиялық пеште ірі көлемді зертханалық ферросилиций балқыту нәтижелері ұсынылған. Болат жонуларын алюминий оксидін өндірудің темір құмдарынан алынған темір кені агломератымен ішінара ауыстыру мүмкіндігі, сондай-ақ алюминий шлак негізіндегі түйіршіктерді пайдалану зерттелген. Шихта компоненттерінің химиялық құрамының балқыту процесінің физика-химиялық және электрлік сипаттамаларына әсері анықталған. Түйіршіктерде SiO_2 және Al_2O_3 мөлшерінің жоғарылауы силикат балқымаларының пайда болуына, шлак фазасының тұрақтануына және кремнийдің тотықсыздану жағдайларының жақсаруына ықпал ететіні көрсетілген. Анықталған кинетикалық үлгілер температураны оңтайландыруға мүмкіндік береді. Әзірленген технология энергияны тұтынуды айтарлықтай азайтуға да ықпал етеді. Қайта өңделген ресурстарды пайдалану қорытпадағы зиянды қоспалардың мөлшерін азайтып, өндіріс шығындарын азайтатыны анықталған. Алынған нәтижелер ферросилиций балқытуда күрделі жасанды материалдарды қолданудың технологиялық тиімділігі мен экологиялық мүмкіндігін растайды.

Кілтті сөздер: Ферросилиций, кен-термиялық пеш, техногендік қалдықтар, темір кенінің агломерат, қара құмдар, электр кедергісі.

А. Жунусов[1], *Р. Тюлюбаев[2], *А. Жунусова[3], А. Бакиров[4], Onuralp Yucel[5]
[1,2,3,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[5]Стамбульский технический университет, Турция, г. Стамбул.
Поступило в редакцию 13.04.26.
Поступило с исправлениями 14.04.26.
Принято в печать 21.05.26.

КРУПНО-ЛАБОРАТОРНЫЕ ПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ В РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

В работе представлены результаты крупно-лабораторных плавок ферросилиция в рудно-термической печи мощностью 80 кВА с использованием вторичных техногенных материалов. Исследована возможность частичной замены стальной стружки железорудным агломератом, полученным из железистых песков глиноземного производства, а также применения окатышей на основе алюминиевых шлаков. Установлено влияние химического состава шихтовых компонентов на физико-химические и электрические характеристики процесса плавки. Показано, что повышенное содержание SiO2 и Al2O3 в окатышах способствует формированию силикатных расплавов, стабилизации шлаковой фазы и улучшению условий восстановления кремния. Выявленные кинетические закономерности позволяют оптимизировать температурный режим. Разработанная технология также способствует существенному сокращению энергозатра. Определено, что использование вторичных ресурсов обеспечивает снижение содержания вредных примесей в сплаве и уменьшение себестоимости производства. Полученные результаты подтверждают технологическую эффективность и экологическую целесообразность применения комплексных техногенных материалов при выплавке ферросилиция.

Ключевые слова: Ферросилиций, рудно-термическая печь, техногенные отходы, железорудный агломерат, железистые пески, электросопротивление.

МРНТИ 53.31.21

https://doi.org/10.48081/BGQF2235

А. З. Исагулов[1], Е. Н. Махамбетов[2], *Ж. Қ. Сәулебек[3], Р. Т. Төлеуқадыр[4], Е. У. Жумагалиев[5]

[1,3]Карагандинский Технический университет имени А.Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;

[2,4]Химико-металлургический институт имени Ж.Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда;

[5]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республика Казахстан, г. Актобе.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3852-7513

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7191-8893

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

*e-mail: zhalgas.sauelebek@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНОГО ХРОМОВОГО СЫРЬЯ

Вданнойработепредставленокомплексноеисследованиефизико-химических свойств различных видов хромового сырья Казахстана, включающее хромовую руду, хромовый концентрат и хромовую пыль (ХШП), которая образуется как побочный продукт в системах газоочистки феррохромового производства. Цель исследования заключалась в многосторонней характеристике химического и фазового состава, морфологии и элементной неоднородности образцов с использованием современных аналитических методов. Для достижения поставленной цели применялись методы химического анализа, рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (СЭМ-ЭДС). Химический анализ позволил определить содержание основных оксидов и примесей, что дало возможность оценить металлургическую ценность исследуемого сырья. Рентгенофазовый анализ выявил присутствие шпинельных фаз ($MgCr_2O_4$, $FeCr_2O_4$) и оксидов хрома и железа, которые играют ключевую роль в процессах восстановления при производстве феррохрома. СЭМ-ЭДС анализ обеспечил детальное изучение морфологии частиц и показал выраженную зональную химическую неоднородность, особенно в образцах пылевых отходов, где наблюдаются чередующиеся области, обогащённые Cr, Mg, Fe и Si. Проведённые исследования показали, что хромовая руда отличается высоким содержанием Cr_2O_3 и MgO при заметной доле силикатных примесей, хромовый концентрат обогащён оксидом хрома и характеризуется минимальной концентрацией SiO_2, тогда как хромовая пыль имеет пониженное содержание хрома и повышенную долю кремнезёма и силикатных фаз. Полученные результаты позволяют не только оценить металлургическую ценность исследуемых материалов,

но и обосновать целесообразность вторичной переработки хромовой пыли с её возможным возвращением в технологический цикл феррохромового производства.

Ключевые слова: хромовая руда, хромовый концентрат, хромовая пыль, сканирующий микроскоп, рентгенофазовый анализ, химический анализ.

Введение

Казахстан занимает одно из ведущих мест в мире по запасам и добыче хромовой руды: страна располагает около 30 % мировых запасов хромитов, занимая 2-е место по запасам и 3-е место по добыче. Основные месторождения сосредоточены в Актюбинской области, включая Донское месторождение, Кемпирсайскую группу и Жанатасское месторождение. Основной производитель хромовой продукции - ТНК «Казхром», входящая в Eurasian Resources Group (ERG). Основные потребители казахстанской хромовой продукции – Китай, Россия, ЕС и США [1;2;3].

Хромовые руды и концентраты являются основным сырьём для получения феррохрома, используемого при производстве нержавеющих и жаропрочных сталей. В процессе их переработки образуются значительные объёмы вторичных продуктов, включая пылевые отходы газоочистки (ХШП), которые представляют собой потенциальное вторичное сырьё при условии соответствующей подготовки [4; 5].

Цель исследования - комплексная характеристика физико-химических свойств хромовой руды, хромового концентрата и хромовой пыли ХШП с применением методов химического анализа, РФА и СЭМ-ЭДС для оценки их пригодности для металлургической переработки и возможности вторичного использования отходов.

Материалы и методы

На базе Химико-металлургического института имени Ж. Абишева было исследовано три вида хромового сырья.

В качестве объектов исследования использованы:

– Хромовая руда - природное хромсодержащее сырьё.

– Хромовый концентрат – продукт обогащения руды с повышенным содержанием Cr_2O_3.

– Хромовая пыль (ХШП) – пылевые отходы систем газоочистки феррохромового производства.

Отбор проб на химический анализ проводилось согласно СТ СЭВ 4523-84. Химический анализ проводился мокрым методом включал определение массовой доли оксидов Cr_2O_3, Fe_2O_3, SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO и примесей (P, S).

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнялся на дифрактометре ДРОН-2 (CuKα, диапазон 2θ 0–80°) с шагом сканирования 0,01° для определения минеральных фаз и их количественного распределения.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) с энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС) проводилась на микроскопе ZEM20 компаний ZEPTOOLS с энерго-дисперсионным детектором Xplorer-15 Oxford Instruments. Обработка

спектров производилась автоматически при помощи программного комплекса AzTec One с использованием методики TrueQ. При съемке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда 3 нА, время накопления спектра в точке 60 св режиме Point&ID, диаметр пучка около 3 мкм [6 ;7; 8].

Результаты и обсуждения

Результаты химического анализа хромового сырья приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Химических состав хромового сырья

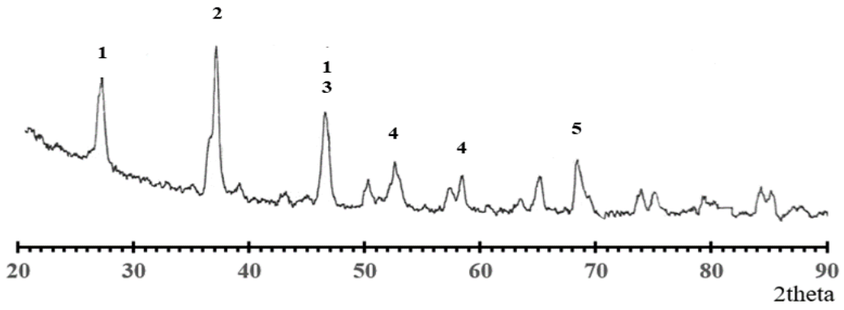
Наименование материала	Содержание, %								
	Cr_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P_2O_5	П.п.п	S
Хромовая руда	40.49	12,03	11,1	8,99	0,65	28,29	0,0059	5,58	0,013
Хромовый концентрат	53,4	14,03	6,13	10,24	1,15	11,67	0,004	3,37	0,01
	$Cr_{общ}$	$Fe_{общ}$	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	$P_{общ}$	S	
Хромовая пыль ХШП	20,35	8,09	19,82	7,39	2,76	29,06	0,046	0,87	

Химический анализ показал, что хромовая руда содержит 40,49 % Cr_2O_3 и 28,29 % MgO, что указывает на наличие шпинельных и магнезитовых фаз. Высокое содержание SiO_2 (11,1 %) требует применения флюсов, а Fe_2O_3 (12,03 %) способствует снижению потребности в добавочном железе. Примеси P_2O_5 (0,0059 %) и S (0,013 %) минимальны, потери при прокаливании составляют 5,58 %.

Хромовый концентрат характеризуется наибольшим содержанием Cr_2O_3 (53,4 %) и минимальной долей SiO_2 (6,13 %), что делает его наиболее ценным сырьём для феррохрома. Повышенное содержание Fe_2O_3 (14,03 %) положительно влияет на металлургический процесс, а потери при прокаливании снижены до 3,37 %, что указывает на меньшую долю летучих соединений.

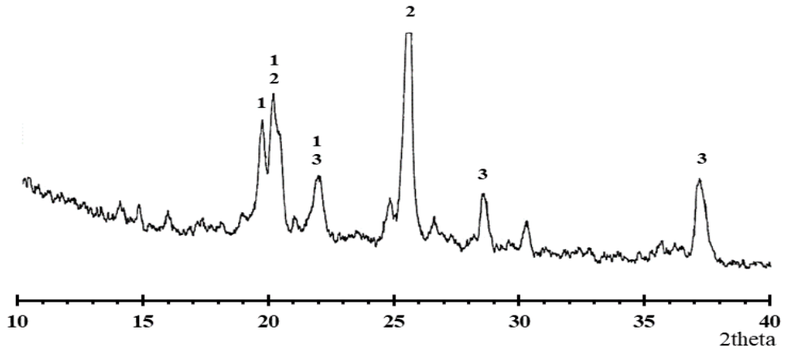
Хромовая пыль (ХШП) содержит всего 20,35 % Cr и отличается высоким содержанием SiO_2 (19,82 %), что ограничивает её прямое использование в плавке. MgO (29,06 %) и умеренное содержание Al_2O_3 (7,39 %) отражают присутствие шпинельных и магнезитовых фаз. Повышенное содержание P (0,046 %) и крайне низкие потери при прокаливании (0,87 %) указывают на необходимость дополнительной переработки перед вторичным применением.

Таким образом, хромовый концентрат является наиболее ценным материалом для металлургии, руда требует корректировки шихты, а хромовая пыль ХШП перспективна для вторичной переработки или использования в огнеупорном производстве.



1 – $FeCr_2O_4$, 2 – Fe_2O_3, 3 – $MgCr_2O_4$, 4 – SiO_2, 5 – $FeAl_2O_4$
Рисунок 1 – Дифрактограмма хромовой руды

Дифрактограмма хромовой руды показывает сложный минеральный состав, где основной фазой является $FeCr_2O_4$ (хромит), сопровождаемый оксидами железа (Fe_2O_3), магнезиохромитом ($MgCr_2O_4$), кварцем (SiO_2) и алюминиевыми шпинелями ($FeAl_2O_4$). Наличие этих фаз указывает на природную неоднородность руды и влияет на её пригодность для металлургической переработки, поскольку присутствие кварца и алюмосодержащих шпинелей может оказывать влияние на плавкость и процессы обогащения.



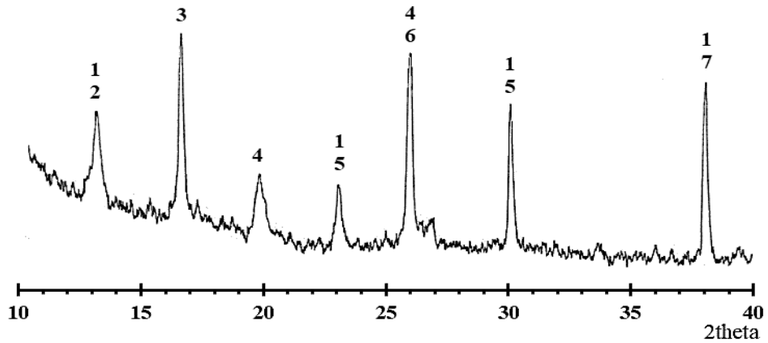
1 – Cr_2O_3, 2 – SiO_2, 3 – $FeCr_2O_4$
Рисунок 2 – Дифрактограмма хромового концентрата

Для определения фазового состава хромового сырья был проведён рентгеновский дифрактометрический анализ методом порошковой дифракции. На рисунке 2 представлена полученная дифрактограмма хромового концентрата.

Анализ интенсивности и положения дифракционных рефлексов позволил установить, что основной минеральной фазой в образце является оксид хрома (III) Cr_2O_3, кристаллизующийся в структуре корунда.

Кроме того, зафиксированы менее интенсивные пики, которые могут быть отнесены к феррохромиту ($FeCr_2O_4$) – природному шпинельному минералу, содержащему железо и хром. Также заметен пик, который может соответствовать наличию кварца (SiO_2) или других силикатных примесей, что связано с остаточной пустой породой, попавшей в концентрат при обогащении.

Полученные данные подтверждают, что исследуемый концентрат преимущественно состоит из Cr_2O_3 с незначительными примесями феррохромита и силикатов, что указывает на его пригодность для металлургических процессов восстановления.

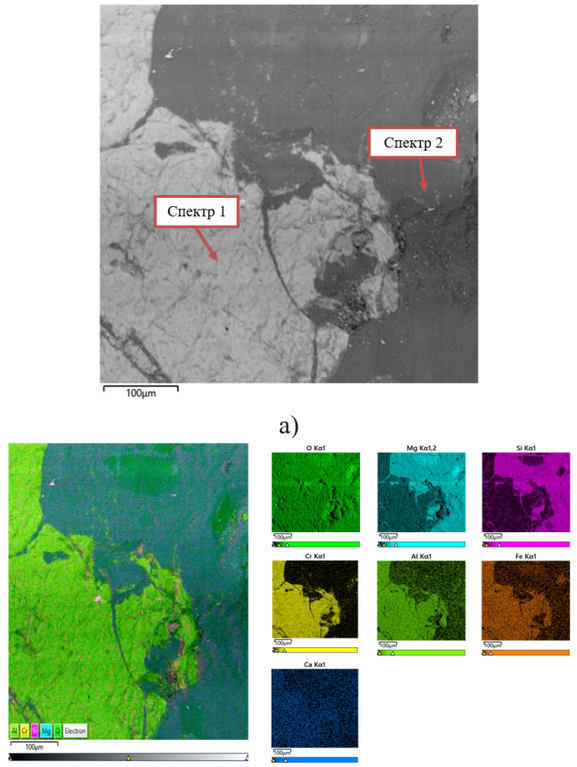


1 – Cr_2O_3; 2 – $FeCr_2O_4$; 3 – $MgAl_2O_4$; 4 – SiO_2;
5 – $MgCr_2O_4$; 6 – Mg_2SiO_4; 7 – MgO
Рисунок 3 – Дифрактограмма хромовой пыли ХШП

Результаты рентгенофазового анализа хромовой пыли (рисунок 3) показали наличие комплексной многокомпонентной структуры с преобладанием оксидных и шпинельных фаз. Наиболее выраженные пики соответствуют оксиду хрома (III) – Cr_2O_3, что подтверждает его присутствие. Данный оксид, обладающий высокой термической и химической устойчивостью, является ключевым компонентом для последующего металлургического восстановления в ферросплавном производстве. Помимо Cr_2O_3, зафиксированы пики, соответствующие шпинельным фазам $MgCr_2O_4$ и $FeCr_2O_4$, а также незначительные количества кварца (SiO_2) и оксида магния (MgO), подтверждаемые химическим анализом. Наличие Cr_2O_3 в составе пыли указывает на её высокую ценность как вторичного хромсодержащего сырья, пригодного для вовлечения в процесс восстановления в дуговых или руднотермических печах. Таким образом, исследованная хромовая пыль может

рассматриваться как перспективный материал для металлургического передела и получения хромсодержащих лигатур.

В сканирующем электронном микроскопе первым была изучена хромовая руда. При изучении хромовой руды, руду подвергали предварительной проба подготовке на шлифовальной машине с различными насадками (рисунок 2).



а)

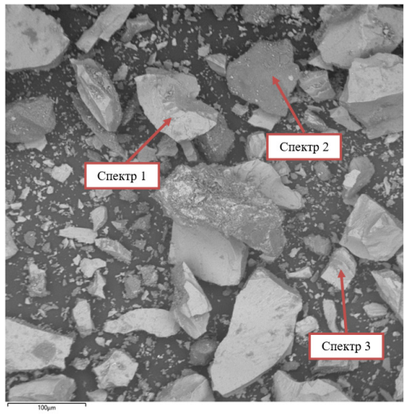
б)
а – спектральный анализ хромовой руды;
б – карта распределения элементов хромовой руды
Рисунок 4 – Снимок энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) хромовой руды

Таблица 2 – Результаты энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) хромовой руды

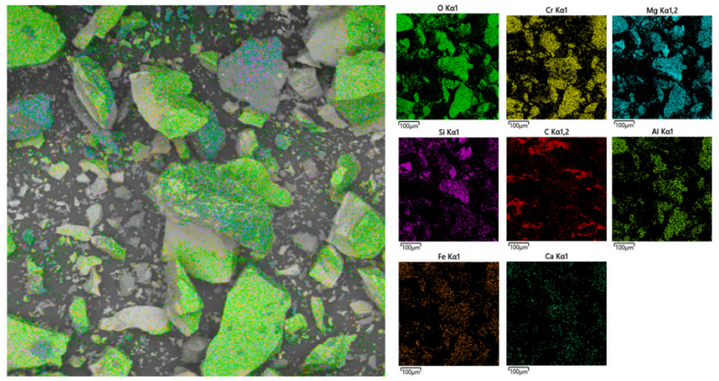
Спектр 1		Спектр 2	
Элементы	Содержание, масса %	Элементы	Содержание, масса %
C	6,86	C	8,45
O	38,16	O	53,59
Mg	8,85	Mg	20,95

Al	4,2	Al	0,94
Si	0,46	Si	13,73
Cr	33,85	Cr	1,28
Fe	7,62	Fe	1.06
Всего	100	Всего	100

На основании данных сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), представленных на рисунке 1 и в таблице 2, можно выделить различия в химическом составе по спектрам 1 и 2, соответствующим разным минеральным фазам хромовой руды. В спектре 1 преобладают хром (33,85 мас. %), кислород (38,16 %) и магний (8,85 %), что указывает на наличие шпинельной фазы типа магний-хромита ($MgCr_2O_4$). Также присутствуют железо (7,62 %) и алюминий (4,2 %), характерные для комплексных твердых растворов шпинелей. Спектр 2, напротив, демонстрирует высокий уровень кислорода (53,59 %), магния (20,95 %), и кремния (13,73 %), но низкое содержание хрома (1,28 %) и железа (1,06 %), что соответствует силикатной фазе, вероятно, оливинового типа или других силикатов магния. Таким образом, на микроструктурном уровне наблюдается распределение хрома преимущественно в плотных участках зерен шпинелей, тогда как силикатные фазы обогащены магнием и кремнием. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что хром в основном сосредоточен в виде оксида Cr_2O_3 в составе шпинельных образований, что является важным с точки зрения металлургического передела - такие фазы термостойки и требуют предварительного восстановления при подготовке сырья к выплавке феррохрома.



а)

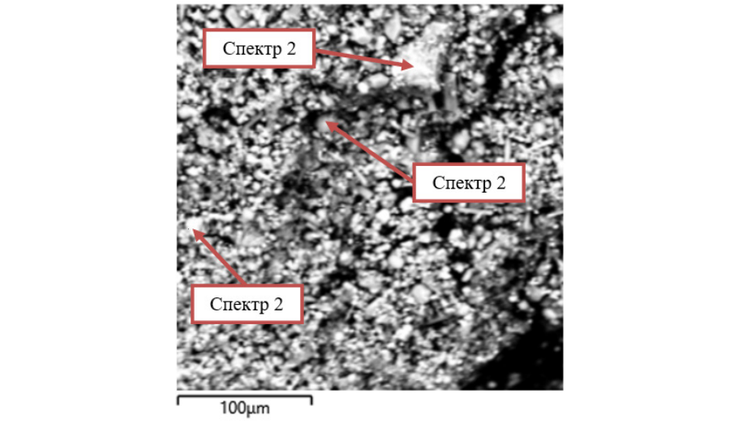


б)

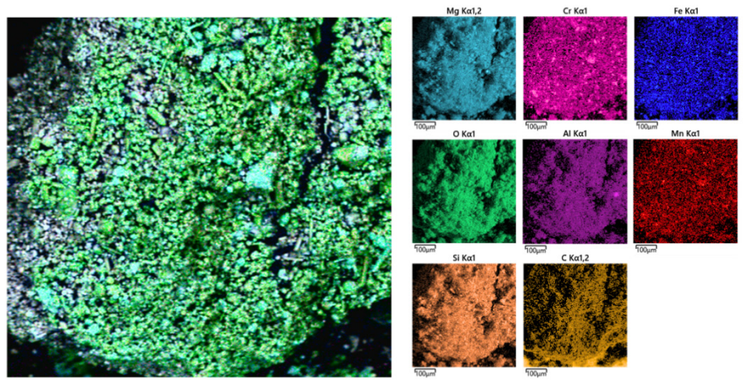
а – спектральный анализ хромового концентрата;
б – карта распределения элементов хромового концентрата
Рисунок 5 – Снимок энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) хромового концентрата

Таблица 3 – Результаты энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) хромового концентрата

Спектр 1		Спектр 2		Спектр 3	
Элементы	Содержание, масса %	Элементы	Содержание, масса %	Элементы	Содержание, масса %
C	10,45	C	14,18	C	10,44
O	39,58	O	49,45	O	32,87
Mg	15,97	Mg	20,78	Mg	19,44
Al	2,29	Al	1,5	Al	1,12
Si	3,03	Si	10,87	Si	8,33
Cr	26,69	Cr	2,66	Cr	8,09
Fe	2,09	Fe	0,55	Fe	19,56
-	-	-	-	S	0.15
Всего	100	Всего	100	Всего	100



а)



б)

а – спектральный анализ хромовой пыли ХШП;
б – карта распределения элементов хромовой пыли ХШП
Рисунок 6 – Снимок энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) хромовой пыли ХШП

Таблица 4 – Результаты энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) хромовой пыли ХШП

Спектр 1		Спектр 2		Спектр 3	
Элементы	Содержание, масса %	Элементы	Содержание, масса %	Элементы	Содержание, масса %
C	10,45	C	14,18	C	10,44
O	39,58	O	49,45	O	32,87
Mg	15,97	Mg	20,78	Mg	19,44
Al	2,29	Al	1,5	Al	1,12
Si	3,03	Si	10,87	Si	8,33
Cr	26,69	Cr	2,66	Cr	8,09
Fe	2,09	Fe	0,55	Fe	19,56
-	-	-	-	S	0.15
Всего	100	Всего	100	Всего	100

Морфологический и элементный анализ хромовой пыли ХШП (рисунок 6), выполненный с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), показал, что исследуемый материал представляет собой мелкодисперсный агрегат частиц с развитой пористостью и выраженной химической неоднородностью. На электронно-микроскопических изображениях наблюдаются плотные конгломераты мелких зерен размером менее 100 мкм, что характерно для пылевых продуктов металлургических процессов [9; 10].

Элементные карты распределения (Рисунок 6) демонстрируют, что основными компонентами пыли являются кислород, магний, хром, железо и кремний, при этом выявлены примеси углерода, алюминия и серы. Сопоставление данных карт с результатами точечного ЭДС-анализа (Таблица 4) подтвердило наличие зональной неоднородности химического состава. Области, соответствующие Спектру 1, обогащены хромом (26,69 мас. %) и магнием (15,97 мас. %), что свидетельствует о присутствии хромо-магниевых шпинелей и оксидов хрома. Спектр 2 характеризуется максимальным содержанием кислорода (49,45 мас. %), магния (20,78 мас. %) и кремния (10,87 мас. %) при минимальных концентрациях хрома и железа, что указывает на доминирование силикатных и магнийсодержащих оксидных фаз. Спектр 3, напротив, содержит повышенное количество железа (19,56 мас. %) и умеренные доли хрома (8,09 мас. %), что может быть связано с формированием железистых шпинелей и ферритных соединений.

В совокупности полученные данные свидетельствуют о том, что хромовая пыль ХШП является многокомпонентной системой, представленной смесью оксидов Mg, Cr, Fe и Si, их смешанных шпинельных и силикатных фаз, а также следовыми количествами Al и S. Подобная морфология и химическая неоднородность типичны для пылевых отходов, образующихся в результате высокотемпературной переработки хромсодержащего сырья в условиях металлургического производства.

Информация о финансировании

Данные исследования были проведены в рамках программно-целевого финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24992758).

Выводы

В результате комплексного исследования трёх видов хромового сырья Казахстана - хромовой руды, хромового концентрата и хромовой пыли (ХШП) – с применением химического анализа, рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (СЭМ-ЭДС) получена всесторонняя характеристика их физико-химических свойств и металлургической ценности.

Хромовый концентрат продемонстрировал наибольшую промышленную значимость, что связано с высоким содержанием Cr_2O_3 (53,4 %), низкой долей кремнезёма (6,13 %) и минимальными примесями фосфора и серы. Выявленный фазовый состав, представленный преимущественно оксидом хрома и шпинельными фазами, указывает на высокую технологическую пригодность концентрата для прямого использования в процессах производства феррохрома.

Хромовая руда характеризуется умеренным содержанием Cr_2O_3 (40,49 %) и высоким содержанием MgO (28,29 %), что свидетельствует о развитой шпинельной структуре с присутствием магнезитовых фаз. Повышенное содержание SiO_2 (11,1 %) и заметная доля летучих веществ (П.п.п. – 5,58 %) требуют корректировки металлургической шихты и применения флюсующих добавок. Тем не менее, её химический и фазовый состав делает руду пригодной для выплавки феррохрома при соответствующей подготовке.

Хромовая пыль ХШП представляет собой отход газоочистки, характеризующийся низким содержанием хрома (20,35 %) и высоким содержанием кремнезёма (19,82 %). СЭМ-ЭДС и РФА показали наличие пористых мелкодисперсных частиц со сложной многокомпонентной структурой, включающей шпинели $MgCr_2O_4$ и $FeCr_2O_4$, а также кварц и магнезийсодержащие силикаты. Прямое использование ХШП в металлургии ограничено, однако её состав и дисперсная структура делают материал перспективным для вторичной переработки, включая возврат в шихту после обогащения и использование в качестве добавки при производстве огнеупорных материалов.

В целом, проведённые исследования подтвердили необходимость дифференцированного подхода к использованию хромового сырья: концентрат является основным материалом для выплавки феррохрома; руда может быть вовлечена в металлургический процесс после корректировки шихты; пылевые отходы требуют предварительной переработки для эффективного вовлечения во вторичный цикл. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических схем переработки хромсодержащих материалов, повышения комплексности их использования и снижения потерь хрома в пылевых отходах производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Жақан, А. М.** Хром және марганец құрамдас кешенді қорытпаларды балқытуға арналған шикізатты зерттеу және талдау: дис. ...магистр техн. наук. – Актобе, 2024. – С. 43.

2 **Pikna, L.** Recovery of Chromium from Slags Leachates by Electrocoagulation and Solid Product Characterization [Текст] / Pikna, L., Hezelova, M., Morillon, A., Algermissen, D. Milkovic, O., Findorak, R., Cesnek, M., Briancin, J. // Metals. – 2020. – 10. – 1593. – https://doi.org/10.3390/met10121593

3 **Алмагамбетов, М. С.** Усовершенствование технологии получения рафинированного феррохрома [Текст] / Алмагамбетов, М. С., Байсанов, С. О., Избембетов, Д. Д. и др. // Промышленность Казахстана. – 2008. – № 1(46). – С. 86–87.

4 **Heine, W.** Evaluation of the Furnace Method for the Production of Low Carbon Ferrochrome [Текст] / Heine, W., Andrie, M. G. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2016. – № 37(3). – https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1168413

5 **Barcza, N. A.** The Development Of The Voskhod Chrome Project In Kazakhstan [Текст] / Barcza, N. A., Boyes, M., Clarke, N. R., Van Der Merwe, A. J. // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2007.

6 **Масгутов, И.** Состояние и перспективы производства низкоуглеродистого феррохрома [Текст] / Масгутов, И., Ковалев, П. В., Бигеев, В. А., Волков, А. И. // Конференция : Труды XVII Международного конгресса сталеваров и производителей металла «От руды к стали – ISCON 2023». – В. : Магнитогорск, 2023.

7 **Makhambetov, Ye. N.** Production of Complex Calcium-Containing Ferrous Alloys of Waste Smelter Slags and High-Ash Coals [Текст] / Makhambetov, Ye. N., Baisanov, A. S., Isagulov, A. Z. et. al. // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 10. – P. 692–702.

8 Хромовая руда Казахстана // Kazchrome. [Электронный ресурс]. – https://www.kazchrome.com/ru/business-overview/divisions/donskoy/ (дата обращения: 01.08.2025).

9 **Makhambetov, Y.** Utilization of ChromiteSpinelPowderinthe Metallothermic Smelting of Low-CarbonFerrochrome [Текст] / Kutzhanov, M., Toleukadyr, R., Myrzagaliyev, A., Sadyk, Z., Saulebek, Z., Akhmetov, A. // Processes. – 2025. – 13. – 2288. – https://doi.org/10.3390/pr13072288

10 **Алмагамбетов, М. С.** Неметаллические включения в жидких хромсодержащих расплавах [Текст] / Алмагамбетов, М. С., Байсанов, С. О., Нургали, Н. З. и др. // Тез. докл. Межд. научн.-практ. конф. «Жидкость на границе раздела фаз- теория и практика». – Караганды, 2006. – С. 600–604.

REFERENCES

1 **Zhakan, A. M.** Hrom zhane marganecz kuramdas keshendi korytpalardy balkytuga arnalgan shikizatty zertteu zhane taldau: dis. ...magistr tehn. nauk [Research and analysis of raw materials for smelting complex alloys containing chromium and manganese: dissertation ...master of technical sciences]. – Aktobe. – 2024. – P. 43. (In Kazakh)

2 **Pikna, L.** Recovery of Chromium from Slags Leachates by Electrocoagulation and Solid Product Characterization [Текст] / Pikna, L., Hezelova, M., Morillon, A., Algermissen, D. Milkovic, O., Findorak, R., Cesnek, M., Briancin, J. // Metals. – 2020. – 10. – 1593. – https://doi.org/10.3390/met10121593

3 **Almagambetov, M. S.** Usovershenstvovanie tekhnologii polucheniya rafinirovannogo ferrohroma [Improvement of technology for obtaining refined ferrochrome] / M. S. Almagambetov, S. O. Bajsanov, D. D. Izbembetov i dr. // Promyshlennost' Kazahstana. – 2008. – № 1(46). – P. 86–87. (In Russian)

4 **Heine, W.** Evaluation of the Furnace Method for the Production of Low Carbon Ferrochrome [Текст] / Heine, W., Andrie, M. G. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2016. – № 37(3). – https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1168413

5 **Barcza, N. A.** The Development Of The Voskhod Chrome Project In Kazakhstan [Текст] / Barcza, N. A., Boyes, M., Clarke, N. R., Van Der Merwe, A. J. // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2007.

6 **Masgutov, I.** Sostoyanie i perspektivy proizvodstva nizkouglerodistogo ferrohroma [Status and Prospects of Low-Carbon Ferrochrome Production] / I. Masgutov, P. V. Kovalev, V. A. Bigeev, A. I. Volkov // Konferenciya: Trudy XVII Mezhdunarodnogo kongressa stalevarov i proizvoditelej metalla «Ot rudy k stali – ISCON 2023». – V. : Magnitogorsk, 2023. (In Russian)

7 **Makhambetov, Ye. N.** Production of Complex Calcium-Containing Ferrous Alloys of Waste Smelter Slags and High-Ash Coals [Текст] / Makhambetov, Ye. N., Baisanov, A. S., Isagulov, A. Z. et. al. // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 10. – P. 692–702.

8 Xromovaya ruda Kazaxstana (Chrome ore of Kazakhstan) // Kazchrome. [Electronic resource]. – https://www.kazchrome.com/ru/business-overview/divisions/donskoy/ (data obrashheniya [date of issue]: 01.08.2025). (In Russian)

9 **Makhambetov, Y.** Utilization of ChromiteSpinelPowderinthe Metallothermic Smelting of Low-CarbonFerrochrome [Текст] / Kutzhanov, M., Toleukadyr, R., Myrzagaliyev, A., Sadyk, Z., Saulebek, Z., Akhmetov, A. // Processes. – 2025. – 13. – 2288. – https://doi.org/10.3390/pr13072288

10 **Almagambetov, M. S.** Nemetallicheskie vklyu-cheniya v zhidkih hromsoderzhashchih rasplavah [Non-metallic inclusions in liquid chromium-containing melts] / M. S. Almagambetov, S. O. Bajsanov, N. Z. Nurgali i dr. // Tez. dokl. Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Zhidkost' na granice razdela faz-teoriya i praktika». – Karagandy, – 2006. – P.600-604. (In Russian)

Поступило в редакцию 06.08.25.
Поступило с исправлениями 16.10.25.
Принято в печать 28.10.25.

А. З. Исагулов[1], Е. Н. Махамбетов[2], *Ж. Қ. Сәулебек[3], Р. Т. Төлеуқадыр[4], Е. У. Жумагалиев[5]
[1,3]А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[2,4]Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[5]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе.
06.08.25 ж. баспаға түсті.
16.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
28.10.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӘР ТҮРЛІ ХРОМ ШИКІЗАТЫНЫҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жұмыста Қазақстанның хром шикізатының әртүрлі түрлерінің: хром кені, хром концентраты және феррохром өндірісінің газ тазарту жүйелерінің қалдықтары болып табылатын хром шаңының (ХШП) физика-химиялық қасиеттерін кешенді зерттеу ұсынылған. Зерттеу барысында химиялық талдау, рентгендік фазалық талдау (РФ) және энергия-дисперсиялық спектроскопиясы бар сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ-ЭДС) сияқты заманауи аналитикалық әдістер қолданылды. Бұл тәсілдер зерттелетін материалдардың химиялық және фазалық құрамын, бөлшектер морфологиясын және элементтік гетерогенділігін жан-жақты зерттеуге мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, хром кені жоғары Cr_2O_3 (40,49 %) және MgO (28,29 %) мөлшерімен сипатталады, бұл оның құрамында магний-хромды шпинельдердің бар екендігін айғақтайды, алайда едәуір мөлшерде силикат қоспалары да бар. Хром концентраты Cr_2O_3 құрамының айтарлықтай жоғары болуымен (53,4 %) және SiO_2 мөлшерінің ең төменгі деңгейімен (6,13 %) ерекшеленеді, бұл оны металлургиялық тұрғыда ең құнды шикізатқа айналдырады. Хром шаңы керісінше хром мөлшерінің төмендігімен (20,35 %) және SiO_2 мен силикаттардың жоғары үлесімен сипатталады, бұл оны тікелей балқытуға жарамсыз етеді. Рентгенфазалық талдау шпинель фазаларының ($MgCr_2O_4$, $FeCr_2O_4$) және Cr мен Fe оксидтерінің болуын көрсетті. СЭМ-ЭДС зерттеулері материалдардың микроқұрылымындағы айқын аймақтық химиялық гетерогенділікті анықтады, әсіресе шаң үлгілерінде бұл құбылыс айқын байқалды. Алынған нәтижелер Қазақстанның хром шикізатының металлургиялық құндылығын кешенді бағалауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, хром шаңын алдын ала байыту немесе қайта өңдеу арқылы феррохром өндірісінің технологиялық цикліне екінші реттік шикізат ретінде енгізу мүмкіндігі ғылыми тұрғыда негізделді.

Кілтті сөздер: хром кені, хром концентраты, хром шаңы, сканерлеуші микроскоп, рентгендік фазалық талдау, химиялық талдау.

A. Z. Issagulov[1], Ye. N. Makhambetov[2], * Zh. K. Saulebek[3],
R. T. Toleukadyr[4], Ye. Zhumagaliev[5]
[1,3]Karaganda Technical University named after A. Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[2,4]Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[5]Zhubanov Aktobe Regional University, Republic of Kazakhstan, Aktobe.
Received 06.08.25.
Received in revised form 16.10.25.
Accepted for publication 28.10.25.

STUDY OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF VARIOUS CHROMIUM RAW MATERIALS

The paper presents a comprehensive study of the physicochemical properties of various types of chrome raw materials from Kazakhstan: chrome ore, chrome concentrate and chrome dust (CD), which is a waste product of gas cleaning systems in ferrochrome production. A comprehensive study of the chemical and phase composition, morphology and elemental heterogeneity of the materials under study was carried out using chemical analysis, X-ray phase analysis (XRD) and scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS). It was shown that chrome ore is characterized by a high content of Cr_2O_3 and MgO with a significant proportion of silicate impurities, chrome concentrate is enriched in chromium oxide and has a minimum content of SiO_2, and chrome dust contains a reduced amount of chromium and an increased content of silica and silicates. XRD revealed the presence of spinel phases ($MgCr_2O_4$, $FeCr_2O_4$) and Cr and Fe oxides, and SEM-EDS showed pronounced zonal chemical heterogeneity, especially in dust waste. The obtained results allow us to estimate the metallurgical value of the studied raw materials and justify the feasibility of recycling chrome dust in the technological cycle of ferrochrome production.

Keywords: chrome ore, chrome concentrate, chrome dust, scanning microscope, X-ray phase analysis, chemical analysis.

FTAMP 53.31.01
https://doi.org/10.48081/BGQF2236

****В. Ю. Куликов[1], А. А. Қордашева[2], Св. С. Квон[3], П. В. Ковалев[4]***
[1,2,3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4]ҰЗУ Ұлы Петрдің Санкт-Петербург политехникалық университеті,
Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6191-8569
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5224-9261
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5439-4426
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-3812
*e-mail: akzhankordashs@gmail.com

ГАЗДАНДЫРЫЛАТЫН МОДЕЛЬДЕР ӘДІСІМЕН ҚҰЮ КЕЗІНДЕГІ ҚҰЙМА САПАСЫН АРТТЫРУ ҮШІН ИНОКУЛЯТОРЛАРДЫ ҚОЛДАНУДЫ ЗЕРТТЕУ

Газдандырылатын модельдер арқылы құю (ГМҚ) әдісімен құймалар алудағы негізгі мәселелер:

– полистирол үлгісі жанған кезде болат құйманың беткі қабатының көміртектенуі;

– үлгі материалы ретінде қолданылатын құюға арналған полистиролдың қымбаттылығы. Бұл жағдай соңғы құю өнімдерінің өзіндік құнын едәуір арттырып, өндірісте газдандырылатын модельдер арқылы құю әдісінің кең таралуына кедергі келтіреді.

Әлемдік тәжірибеде ГМҚ әдісінде үлгілерді жасау үшін құрылыс полистиролының түйіршіктері қолданылмайды. Бұрын жүргізілген зерттеулер олардың үлгі материалының құрамдас бөлігі ретінде пайдалануға болатынын көрсетті.

Сонымен қатар алынатын құймалардың құрылымын, демек олардың қасиеттерін басқару белгілі бір қиындықтарға ие. Ұсақ түйіршікті құрылымы бар (жоғары беріктікке ие) және бүкіл құйма көлемі бойынша құрамы біртекті болатын құймаларды алу мүмкіндігі құюдың температуралық режимін басқару арқылы жүзеге асырылады. Мысалы, суспензиялық құюды газдандырылатын модельдер бойынша құюмен үйлестіре қолдану кезінде қолданылады. Инокуляторларды балқымаға енгізу үшін тікелей полистирол үлгісі қолданылады.

Құю өндірісі машина жасаудың маңызды базасы болып табылады. Құю әдісі арқылы қалыптарды сұйық металмен толтыру кезінде әртүрлі пішінді құймалар алынады. Қатаю кезінде металл құйылған пішін қуысының контурын алады. Құйылған бұйымдар өнеркәсіпте кеңінен қолданылады, өйткені құймалардың өлшемдері мен пішіндері көбінесе басқа тәсілдермен алынған дайындамаларға қарағанда дайын өнімнің қажетті өлшемдері мен пішіндеріне анағұрлым жақын болады. Бұл маңызды артықшылық болып саналады, себебі өңдеу шығындарын азайту өнімнің өзіндік құнын төмендетеді және металл

шығынын азайтады. Сонымен қатар, құйылған дайындамаларды өндіру әлдеқайда арзан.

Кілтті сөздер: инокуляторлар, легірленген құймалар, суспензиялық құю, газдандырылатын құю әдісі, сапасы, құрылымы.

Кіріспе

ТМД елдерінің құю өндірісінде қорытпалардың сапасын арттыруға бағытталған, құрылымды басқару мен қоспалаушы элементтердің біркелкі таралуын қамтамасыз ететін әдістер өзекті болып табылады. Негізгі әдістердің қатарында – дәстүрлі құю процестері, газдандырылатын қалыптарға құю және суспензиялық құюдың заманауи технологиялары бар. Бұл әдістер көлемдік кристалдануды жеделдетуге және зоналық құрылымы бар біртекті құйма алуына мүмкіндік береді: майда түйіршікті сыртқы қабат, бағаналы кристалдардан тұратын ортаңғы бөлік және орталықта неғұрлым тепе-тең құрылым [1; 2].

Құймаларды легірлеу олардың физика-механикалық қасиеттерін – беріктігін, тозуға төзімділігін және коррозияға қарсы тұрақтылығын – айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік береді. ТМД елдеріндегі зерттеулер сұйық металлға дисперстік қоспаларды енгізу кристалданудың белсенді орталықтарын түзіп, тығыз әрі біртекті құрылымның қалыптасуына ықпал ететінін көрсетеді. Сонымен қатар, өндірістік қалдықтарды модификаторлар мен инокуляторлар ретінде пайдалану ерекше қызығушылық тудырады, себебі бұл өндіріс шығындарын азайтып, ақау санын төмендетуге мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл құю цехтарындағы санитарлық-гигиеналық жағдайларды жақсартуға және ресурстарды үнемдеу мүмкіндіктерін кеңейтуге көмектеседі [3; 4].

Материалдар мен әдістері

Қазіргі уақытта Қарағанды өңіріндегі құю зауыттарында қолданылып жүрген тәжірибелерді ескере отырып, зерттеулерде ПСВ-Л1 және ПСВ-Л2 маркалы құюға арналған полистирол пайдаланылды. Үлгінің кешенді құрамына қосымша ретінде ППС-10 және ППС-20 маркалы құрылыс пенополистиролы таңдалды, себебі ол біздің өңірде ең кең таралған және қолжетімді болып табылады [5; 6].

Эксперименттік зерттеулер «Пархоменко атындағы ҚМЗ» ЖШС-де (Қарағанды қаласы) жүргізілді. Үлгілер 0,7…1,0 мм фракциялы (жеткізілетін түйіршіктердің өлшемі) құюға арналған полистирол мен 3,0 мм дейінгі құрылыс пенополистиролы түйіршіктерінің қоспасынан алынды (құрылыс полистиролы түйіршіктерінің негізгі өлшемдері) және олардың мөлшері 10–50 % құрады. Зауытта қабылданған технологияға сәйкес полистирол алдын ала буда көбіктеніп, кептірілгеннен кейін пресс-формаға жіберілді, әрі қарай автоклавта полистирол түйіршіктері бірігіп, спектелген уақытқа дейін ұсталды [7; 8].

Сонымен қатар, зерттеулерде 35Л болатынан жасалған «Қақпақ» құймалары қарастырылды. Инокулятор ретінде ұсақталған скрап, шлактағы металдық қосылыстар және т.б. пайдаланылды.

Өзіндік құнын төмендету мақсатында үлгі материалы ретінде құрылыс (сурет 1,а) және құю полистиролының (сурет 1,б) комбинациясын қолдану ұсынылады. Соған сәйкес, комбинирленген үлгілерде (сурет 1,в) ірі және ұсақ дәндердің

үйлесімі болады, бұл өз кезегінде тығыздықты арттырады, ал тығыздық, белгілі болғандай, үлгіні өртеуде құйманың беткі қабатының көміртектенуін төмендетуге әсер етеді. Зерттеулерде қолданылған полистирол үлгілерінің құрамы 1-кестеде келтірілген.

а *ә* *б*

1-сурет – Әр түрлі маркалы пенополистиролдардың құрылымы
а – құюға арналған пенополистирол (дән өлшемі 0,3–0,6 мм); б – құрылыс пенополистиролы (3–4 мм); в – кешенді пенополистирол (1–1,5 мм)

1-кесте – Эксперименттерде қолданылған полистирол үлгілерінің құрамы

Үлгінің №	Құюға арналған полистирол ПСВ-1Л, %	Құрылыс полистиролы ППС-20, %
1	-	100
2	100	-
3	50	50
4	60	40
5	70	30
6	80	20
7	90	10

Үлгілерді сынау үшін стандарттаған әдістер және аккредиттелген (ГОСТ ISO 17025–2009 «Сынақ және калибрлеу зертханаларының құзыреттілігіне жалпы талаптар») Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті «KORMS» Халықаралық материалтану орталығы және инженерлік типтегі сынақ зертханасының заманауи жабдықтары қолданылды [9, 135–138-бб.].

Форма параметрлері ретінде қысу мен созылуға беріктігі, кеуектілігі, газ өткізгіштігі және беттің жылтырлығы зерттелді.

Алынған үлгілердің микроструктурасын зерттеу үшін TESCAN Vega (Чехия) және Altami POLAR 3 (Ресей) микроскоптары пайдаланылды.

Беттің жылтырлығын ГОСТ 2789-73 «Беттің жылтырлығы. Параметрлері мен сипаттамалары» талаптарына сәйкес портативті TR 100 өлшегіші арқылы анықтады [10, 7-б.]. Үлгілер мен құймалардың бетіндегі жылтырлық TR-220 құрылғысы арқылы тазалаудан кейін өлшенді.

Қысу және иілу беріктігін анықтау үшін INSTRON-100 едендік сынақ машинасы қолданылды, ГОСТ 25.506-85 «Беріктік есептері мен сынақтары, металдарды механикалық сынаудың әдістері. Статикалық жүктеме кезінде жарықтарға төзімділік сипаттамаларын анықтау» [11, 38-б.] және ГОСТ 1497-84 «Металдар. Созылу сынақтарының әдістері» [12, 28-б.] талаптарына сәйкес.

Үлгілердің химиялық құрамын анықтау үшін DFS-71 эмиссиялық спектрометрі (Ресей) және NITON XL2-100G рентгенофлуоресценттік анализаторы (АҚШ) қолданылды.

ППС-10 маркалы пенополистиролдың нақты тығыздығы 15 кг/м³ құрайды, ал ППС-20 маркалынікі – 25 кг/м³ және т.б. Тығыздық неғұрлым жоғары болса, кеуектілік соғұрлым төмен, яғни материалдың жануға қабілеті нашарлайды.

Осыған байланысты ГМҚ әдісінде ең кең таралған және қолданылатын ППС-10, ППС-20 және ППС-30 маркаларының кеуектілік құрылымы зерттелді. Зерттелген полистирол маркаларының негізгі қасиеттері 2-кестеде көрсетілген.

2-кесте – Зерттелген полистирол маркаларының негізгі қасиеттері

Марка	Тығыздығы, кг/м³	Беріктік шегі, МПа	1200°С температурада жану уақыты, сек
ППС-10	15	0,05	3,7
ППС-20	25	0,1	4,0
ППС-30	35	0,16	5,2

Алынған сипаттамаларға сәйкес, модельдерді жасау үшін ППС-10 және ППС-20 маркалы полистиролды бірдей дәрежеде ұсынуға болады, өйткені олардың әр түрлі тығыздығына және кеуекті құрылымына қарамастан, жану процесі іс жүзінде бірдей болады.

Бұл болжам тәжірибелік түрде расталды. ППС-10 және ППС-20 маркалы полистиролдың бірдей өлшемді кесектері жану уақытына сынақтан өткізілді. Жану процесі ауаның атмосферасында жабық кеңістікте жүргізілді, бұл нақты жағдайларға сәйкес келеді. Қыздыру балқымамен жанасу нәтижесінде жүрді (балқыманың температурасы 1620 °С құрады). Толық жану уақыты тиісінше 4,5 және 5,8 секундты құрады.

Полистиролдың сертификатта көрсетілгеннен ұзағырақ жану уақытын балқыманың жоғары температурасымен байланысты «қабықтың» түзілуімен түсіндіруге болады.

Нәтижелер және талқылау

«Пархоменко атындағы ҚМЗ» ЖШС-нің құю өндірісінде газидандырылатын модельдерді жасау суспензиялық полистиролдың құймалық және құрылыс маркаларынан алынған пенополистирол плиталарын механикалық өңдеу арқылы жүзеге асырылады. 3-кестеде әртүрлі маркалы көбіктендірілген полистиролдан алынған плиталардың қасиеттері келтірілген.

2-кесте – Әртүрлі маркалы полистиролдан жасалған модельдердің негізгі қасиеттері

Көрсеткіштер	ПСВ-1Л	ПСВ-2Л
Көлемдік масса, кг/м³	25	20
Қысуға беріктік шегі, кгс/см²	1,3-1,5	1,1-1,5
Жану толықтығы, г/кг, 1200 ºС	2,1-2,2	2,8-2,9

Көбіктенген полистиролдың кемшіліктеріне оның түйіршіктерінің бірігіп, жабысып қалуға бейімділігін жатқызуға болады. Бұл құбылыс жеке түйіршіктер арасындағы электростатикалық немесе химиялық өзара әрекеттесуден туындайды. Мұның барлығы пресс-формаға түйіршіктерді біркелкі толтыруды айтарлықтай қиындатады.

Аталған кемшіліктерді жою және сапалы модельдер алу үшін зерттеуде фракциясы 0,7–1,0 мм болатын ұсақ литейлік полистирол және көлемі 40–45 %-ға дейін жететін (модель өлшеміне байланысты) 1–3 мм құрылыс полистиролы пайдаланылды. Полистирол алдын ала буда көбіктеніп, кептірілді. Пресс-формаға алдын ала үрленген полистирол толтырылды, содан кейін полистиролмен толтырылған пресс-форма автоклавқа салынып, түйіршіктер толық спеккенге дейін ұсталды. Кейін модельдер салқындатылып, форма ішінен алынды [13, 5-б.].

Модельдерді дайындаудың басқа әдісі де бар – арнайы модельдік автоматтарда жасау, бұл өнімділікті 2–4 есе арттырады. Модельдер блоктарға (бұтақтарға) жиналады, оларды жабыстыру немесе дәнекерлеу арқылы біріктіреді. Модель блоктарының бетіне бір қабат арнайы қарсыжану жабындысы қолданылады: қарапайым жағдайда – ваннаға батыру арқылы, ал күрделі конфигурациялы үлгілерде – құю әдісімен. Одан кейін боялған блоктар 40–60°С температурада кептіру камерасында 2–3 сағат кептірілді.

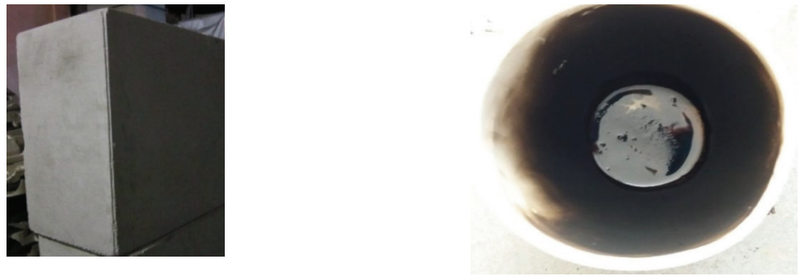
Бұл технология полистирол модельдерінің жоғары сапасын, төмен кедір-бұдырлығын, жоғары геометриялық өлшемдік дәлдігін және модель қимасының бүкіл көлемінде біртекті тығыздықты қамтамасыз етеді.

Сонымен қатар, құрылыс полистирол түйіршіктері қосылған полистирол модельдерінің жану толықтығы зерттелді. Ол үшін «Қақпақ» үлгісінің моделінен массасы 0,5 г болатын шағын сегмент кесінді алынып, термиялық пешке салынды. Белгілі бір температурада 30 секунд ұсталғаннан кейін тигель пештен алынып, өлшенді. Үлгінің толық жанғаннан кейінгі қалдығы тигельдің салмағының айырмасы бойынша анықталды [14, 203-208-бб.] (2–3-суреттер).

а *ә*

а – бастапқы үлгі; б – пеште 1200 °С температурада болғаннан кейін

2-сурет – №1 Үлгі (қайталама полистирол түйіршіктерінің мөлшері 40 %)



а *ә*

а-бастапқы үлгі; б-пеште 1200°С температурада болғаннан кейін
3-сурет – №4 үлгі (құю полистиролының мөлшері 100 %)

Сондай-ақ, модельдің күйіп қалу жылдамдығы мен толықтығына түйіршіктердің мөлшері әсер етеді. Полистирол түйіршіктерін көбіктендіруге дайындау технологиялық процестің маңызды бөлігі болып табылады және келесі операцияларды қамтиды: түйіршіктердің құрамын жіктеу, түйіршіктерді көбіктендіру, көбік түйіршіктерін кептіру және белсендіру. Полистиролдың гранулометриялық құрамы модель қабырғасының қалыңдығына байланысты анықталады, өйткені көбік түйіршіктері қалыптың қуысын толтырып қана қоймай, сонымен қатар оның бетінің қажетті көлемдік массасы мен сапасын қамтамасыз етуі керек. 4-кестеде модель қабырғасының қалыңдығына байланысты бастапқы полистирол түйіршіктерінің өлшемдері келтірілген [15, 408-б.].

4-кесте – Ұсынылатын түйіршіктердің өлшемдері

Түйіршіктердің өлшемдері, мм	Модельдің көлемдік массасы, кг/м³	1200°С температурада жанғаннан кейінгі қалдық, г/кг
1,2-1,8	13-32	3,6-3,7
1,1-1,3	16-40	3,3-3,4
0,7-0,9	18-41	2,6-2,7
0,3-0,7	19-42	2,1-2,2

Ұсынылып отырған технология бойынша газдандырылатын үлгілер әдісімен 35л болатынан «Қақпақ» бөлшегін құю процесі қарастырылды. Қорытпаның химиялық құрамы 5-кестеде келтірілген.

5-кесте – 35Л маркалы болаттың химиялық құрамы

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0,32-0,4	0,2-0,52	0,4-0,9	0,3 дейін	0,045 дейін	0,04 дейін	0,3 дейін	0,3 дейін	~97

«Қақпақ» құймасының массасы – 25 кг. Литниктік жүйені ескере отырып, бір қалыпқа құйылатын балқыманың массасы 27,5 кг құрайды. Құю қалыптарының

негізгі технологиялық режимдері – қорытпаның температурасы мен құю жылдамдығы болып табылады.

ГМҚ әдісін қолдану кезінде құйманың бүкіл көлемі бойынша тығыз, тұтас құрылым қалыптасады. Құйманы алудың технологиялық процесінің екі негізгі кезеңі қарастырылды – қалыпты балқымамен толтыру және оның қатаюы. Жүргізілген модельдеу нәтижесінде «Жүріс дөңгелегі» деталі үшін тоңазытқыштар қосылып, литниктік жүйе өзгертілді. Нәтижесінде бағытталған кристалдану жүзеге асырылып, соның арқасында құймадағы ақаулар жойылды.

Сонымен қатар, салқындату жылдамдығының төмендеуіне пештен шыққан металл бетінде түзілетін қож айтарлықтай әсер етеді. Тікелей өлшеулер көрсеткендей, металлды құю кезінде үлкен және шағын шөміштердегі температура таралуы бірден біркелкілікпен ерекшеленеді. Мұндай теңестірілу толтыру кезінде пайда болатын ағын әсерінен туындайтын конвекция есебінен жүзеге асады. Алайда біраз уақыттан кейін конвекция күрт баяулайды да, металл ішінде тік бағыттағы температура айырмашылықтары пайда болады. Бұл айырмашылықтар болат массасы жеткілікті үлкен болған жағдайда өз шегіне жетеді [16, 79–83-бб.].

Құю жылдамдығы мен температурасының құюдың кедір-бұдырлығы мен күйдіру мөлшеріне әсері бағаланды, сондықтан бұл көрсеткіштер (ішкі ақаулардың болмауымен бірге) құю сапасы жағынан негізгі болып табылады (6 және 7-кестелер).

6-кесте – Құю температурасының құю жылдамдығы 0,5 кг/сек болған кезде құюдың кедір-бұдырлығы мен күйіп қалуына әсері

Құю температурасы, °С	Кедір-бұдырлық, мкм	Күйік, г/см²
1520	84	0,18
1540	79	0,19
1560	77	0,22
1580	83	0,26
1600	91	0,27

Құюдың жоғары температурасы балқыманың құм бөлшектері арасындағы тесіктерге енуіне және кедір-бұдырлықтың жоғарылауына әкеледі. Сондай-ақ, температураның жоғарылауымен күюдің жоғарылауы байқалады.

7-кесте – Құю уақытының 1550°С температурада құймалардың кедір бұдырлығы мен күйіп қалуына әсері

Құю уақыты, сек	Кедір-бұдырлық, мкм	Күйік, г/см²
20	97	0,19
30	74	0,18
40	86	0,17
50	94	0,15

Әлбетте, ең оңтайлы-құю жылдамдығы шамамен 0,5 кг/сек. Құюдың жоғары жылдамдығы құюдың қатаю аймағында полистиролдың жану өнімдерінің

артық қалдықтарының пайда болуына әкеледі, бұл құю бетінің тазалығының нашарлауына әкеледі. Баяу құю жылдамдығы құйманың салқындауына және масштабтың пайда болуына әкеледі, бұл кедір-бұдырға да әсер етеді. Құю жылдамдығы күйік мөлшеріне түбегейлі әсер етпейді.

«Пархоменко атындағы ҚМЗ» ЖШС-де дайындалатын құйма бұйымдар номенклатурасының негізгі өкілдерінің бірі — «Жүріс дөңгелегі» бөлшегі болып табылады.

«Жүріс дөңгелегі» бөлшегін дайындаудың ұсынылып отырған технологиясы құйманың салмағын азайту есебінен металды пайдалану коэффициентін 95 %-ға дейін арттыруға, қолданылатын энергияның 20–25 %-ын үнемдеуге, технологиялық процестің ұзақтығын қысқартуға, сондай-ақ өнімнің ақаулылық деңгейін 0,8 %-ға дейін төмендетуге мүмкіндік берді.

«Қақпақ» құймасы үшін технологиялық оңтайлы режимдер эксперименттік түрде анықталды: құю жылдамдығы – 0,5 кг/с, құю температурасы – 1540–1560 °С.

Кестеде көрсетілген композициялардан «Қақпақ» құю модельдері жасалды (4-сурет).

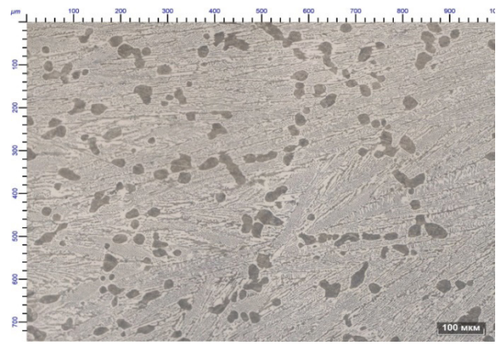
4-сурет – «Қақпақ» құю моделі

Олардан құймаларды жасағаннан кейін, микроқұрылымдарды бағалау үшін тегістеуіштерді дайындау үшін пайдаланылған үлгілер дискілі кескішпен кесілді. Микроқұрылымдарды сандық және сапалық бағалау Thixomet Pro (Ресей) бағдарламасының көмегімен жүргізілді.

Үлгінің беткі қабатының тереңдігі бойынша микроқұрылымы 5-суретте көрсетілген.

Микроқұрылымнан көрініп тұрғандай, полистиролдың күрделі құрамын пайдаланған кезде цементтеудің максималды тереңдігі 56,4 мкм жетеді. Бірқатар зерттеулерден 0,3–0,4 % көміртегі бар болаттардың цементтеу тереңдігі орта есеппен 76–105 мкм болатыны белгілі, бұл құрылымдық полистиролды қолдану арқылы модельдің тығыздығын төмендету арқылы ұсынылған технология бойынша цементтеу тереңдігінен едәуір үлкен. Бұл модельдің бұзылуынан пайда болатын көміртегі мөлшерін азайтады. Осылайша, құймалардың белгілі бір түрлеріне ұсынылған технологиялық режимдерді қолдана отырып, полистирол

моделінің ұсынылған кешенді құрамы құйманың беткі қабатын цементтеу мәселесін шешеді [17, 1313–1314-бб.].



5-сурет – 35Л маркалы құйманың микроқұрылымы және ThixometPro бағдарламасын пайдалана отырып, беткі қабаттың тереңдігін карбюризациялауды анықтау

«Қақпақ» құю модельдерін жасау үшін 0,3–0,9 мм шағын фракциялардың 60 % құю полистиролы және құрылыс полистиролының қалдықтарынан қайта өңделген 0,6 мм фракциясының 40 % қайталама полистирол көбігі пайдаланылды. Полистирол 3–5 % көлемінде 0,5–1,5 мм фракциясы бар ферроқорытпалармен бірге (одан тыс). бу ваннасында алдын ала көбіктеніп, 45 °С температурада 2 сағат бойы кептірілді. көбіктендірілген полистирол қалыптарға үрленді, содан кейін қалыптар автоклавқа орнатылды және полистирол түйіршіктері агломерацияланғанға дейін ұсталды. Содан кейін модельдер салқындатылды.

Металды полистирол көтергіштерге құю жүргізілді. Ыстық металл полистиролды жағып, оның орнын алды. Шығарылған газдар вакуумдық жүйемен бояу қабаты арқылы құмға сорылды. Бұл жағдайда металл модельдермен полистирол блогының пішінін дәл қайталайды. Құйылған модельдер құмда шамамен 30 минут салқындатылды. Осылайша алынған құймалар жоғары геометриялық дәлдікке ие болды (құю беткейлері мен өңдеу жәрдемақыларының қажеті жоқ). Сонымен қатар, құрылыс полистиролының құнының төмендеуіне байланысты модельдің жалпы құны және, демек, құю модельді жасау үшін 100% құю полистиролын қолданумен салыстырғанда төмендеді. Балқымамен әрекеттескен кезде инокуляторлар жергілікті салқындатуды тудырды және кристалдану орталықтарына айналды. Нәтижесінде ұсақ түйіршікті құрылым қалыптасты. Бұл құйманың жоғары механикалық қасиеттерін қамтамасыз етеді.

Құйма дайындамаларының бүкіл көлемі бойынша ұсақ түйіршікті құрылымы (жоғары беріктігі) және біртекті құрамы бар құймаларды алу мүмкіндігі құймалардың температуралық режимін басқаруға мүмкіндік береді. Мысалы, суспензия құю мен газдандырылатын құюды біріктіргенде. Инокуляторларды балқымаға енгізу үшін полистирол моделі тікелей қолданылады [18, 97-100-бб.].

Автоклавта әртүрлі композициялардың полистирол модельдері алынды (8-кесте). Легірленген модельдер және әртүрлі фракциялық және пайыздық инокуляторлар үлгілері пайдаланылды. Инокуляторлар скрап пен қожды еMах нано ұнтақтағышында ұнтақтау арқылы жасалды. Инокуляторлардың болат маркасы «Қақпақты» құюға арналған болатпен бірдей, яғни – 35Л.

8-кесте – Полистирол модельдерінің құрамы

Үлгінің номері	Құю полистиролының құрамы	Құрылыс полистиролының мазмұны	Инокуляторлардың мазмұны және фракциясы (%/мм)
1	100	-	-
2	100	-	5/1-1,5
3	60	40	
4	60	40	4/0,5-1
5	60	40	3/1-1,5
6	60	40	2/0,5-1,0

9-кестеде тәжірибелі полистирол модельдерін қолдану арқылы алынған құймалардың механикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері келтірілген.

9-кесте – Прототиптердің механикалық қасиеттері

Үлгінің номері	Қаттылық, НВ	Созылу беріктігі, МПа
1	248	546
2	277	573
3	266	559
4	369	598
5	265	551
6	276	563

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеулер ҚР ҒЖБ Ғылым комитетінің AP23489348 «Модификаторлар мен құю өндірісінің қалдықтарын пайдалана отырып, легірленген құймаларды дайындау үшін экзогендік суспензиялық құю технологиясын әзірлеу және зерттеу» грантын іске асыру шеңберінде жүргізілді.

Қорытынды

Көрсетілген деректерден көрініп тұрғандай, инокуляторларды пенополистирол модельдерінде қолдану құймалардың беріктігі мен қаттылығын арттырады. Ең оңтайлысы – 1,0–1,5 мм фракциядағы инокуляторларды пайдалану, себебі үлкенірек фракциялар кезінде модельде орналасқан барлық ферросплавтар толық ерімейді, бұл соңында ақаусыздықтардың түзілуіне байланысты құймалардың беріктігіне кері әсер етеді. 0,5 мм-ден кіші фракция ұсақ түйіршікті құрылымның қалыптасуына әсер етпейді, ал ферросплав бөлшектері балқытылған металл ағынымен қабырғаға жылжып кетуі немесе шлакқа қалқып шығуы мүмкін.

Ұсынылған технологиялық режимдер бойынша қолданыстағы өндірістік жағдайларда «Пархоменко атындағы ҚМЗ» ЖШС кәсіпорнының жабдықтарында «Корпус» құймаларының тәжірибелі партиясын алынды. Құймаларды зерттеу

жаңа технология бойынша алынған құймалардың жоғары геометриялық дәлдікке (0,5–1 % жәрдемақы), төмен кедір-бұдырлыққа (RZ 60–90), сыртқы және ішкі ақаулардың болмауына ие екенін көрсетті.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Vorontsov, B. S., Nesterov, N. V.** Interaction of a Liquid Metal with Dispersed Steel Inclusions during Lost-Foam Casting // Russian metallurgy. – 2019. – Vol. 2. – P. 116–118.

2 **Budic, I., Novoselovic, D., Samardzic, I.** Influence of process parameters on castability at full mold casting // Metalurgija. – 2014. – Vol. 53. – Issue 4. – P. 594–596.

3 **Изотов, В. А., Родионова, Н. А., Федулова, Ю. С.** Определение коэффициента расхода нижней литниковой системы при литье черных сплавов по газифицируемым // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 2. – С. 51–55.

4 **Ponomarenko, O., Yevtushenko, N., Shynsky, V.** A New Technology for Producing the Polystyrene Foam Molds Including Implants at Foundry Industry // Procced. 2nd internat. conf. on Design, Simulation, Manufacturing - The Innovation Exchange (DSMIE). – Cham, 2020. – P. 430–437.

5 **Ittiphalin, M., Chearanai, T.** The Application of Mathematical Model for Production Planning in a Polystyrene Factory // Procced. 6th IEEE internat. conf. on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). – Tokyo, 2019. – P. 169–172.

6 **Исагулов, А. З., Куликов, В. Ю., Ковалёва, Т. В.** Качество моделей для литья по газифицируемым моделям // Литейное производство. – 2012. – № 10. – С. 36–38.

7 **Исагулов, А. З., Квон, С. С., Ковалёва, Т. В., Куликов, В. Ю., Щербакова, Е. П.** Использование вторичного полистирола в качестве компонента материала для изготовления моделей при ЛГМ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 44–52.

8 **Куликов, В. Ю., Исагулов, А. З., Ковалёва, Т. В., Квон, С. С., Щербакова, Е. П.** Исследование свойств полистирола с добавлением вторичных гранул строительного полистирола // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова. – 2017. – Т. 15. – № 4. – С. 40–46.

9 **Исагулов, А. З., Твердохлебов, Н. И., Ковалёва, Т. В.** Переработка и исследование суспензионного полистирола // Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья: матер. междунар. науч.-практ. конф., посв. 90-летию Е. А. Букетова. – Караганда. – 2015. – С. 135–138.

10 ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введ. 1975-01-01. – М., 1975. – 7 с.

11 ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 1986-01-01. – М., 1986. – 38 с.

12 ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986-01-01. – М., 1984. – 28 с.

13 ГОСТ 23409.6-78. Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Метод определения газопроницаемости. – Введ. 1980-01-01. – М., 1980. – 5 с.

14 **Ковалёва, Т. В., Исагулов, А. З.** Влияние толщины антипригарной краски на качество отливки при литье по газифицированным моделям // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: сб. – Чита, 2019. – С. 203–208.

15 **Шуляк, В. С.** Литье по газифицируемым моделям. – СПб. : НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.

16 **Ковалёва, Т. В., Исагулов, А. З.** Моделирование температурных полей отливок при литье по газифицируемым моделям // Машиностроение: новые концепции и технологии : сб. ст. всеросс. науч.-практ. конф. студ., аспиран. и молод. учен. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнёва, 2020. – С. 79–83.

17 **Ковалёва, Т. В.** Термодинамическое моделирование сплава при литье по газифицируемым моделям // Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации (Сагиновские чтения №13): тр. междунар. науч.-практ. online конф., посв. 30-летию Независимости Республики Казахстан. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2021. – С. 1313–1314.

18 **Issagulov, A. Z., Kovaleva, T. V., Chsherbakova, Ye. P.** Lost pattern complex composition effect on steel casting structure and properties // Metalurgija. – 2021. – Vol. 60. – Issue 1–2. – P. 97–100.

REFERENCES

1 **Vorontsov, B. S., Nesterov, N. V.** Interaction of a Liquid Metal with Dispersed Steel Inclusions during Lost-Foam Casting // Russian metallurgy. – 2019. – Vol. 2. – P. 116–118.

2 **Budic, I., Novoselovic, D., Samardzic, I.** Influence of process parameters on castability at full mold casting // Metalurgija. – 2014. – Vol. 53. – Issue 4. – P. 594–596.

3 **Izotov, V. A., Rodionova, N. A., Fedulova, Yu. S.** Opredelenie koe`fficienta rasxoda nizhnej litnikovoj sistemy` pri lit`e cherny`x splavov po gazificiruemy`m [Determination of the consumption coefficient of the lower gate system during casting of ferrous alloys for gasified] // Zagotovitel`ny`e proizvodstva v mashinostroenii. – 2019. – Vol. 17. – № 2. – P. 51–55.

4 **Ponomarenko, O., Yevtushenko, N., Shynsky, V.** A New Technology for Producing the Polystyrene Foam Molds Including Implants at Foundry Industry // Procced. 2nd internat. conf. on Design, Simulation, Manufacturing – The Innovation Exchange (DSMIE). – Cham, 2020. – P. 430–437.

5 **Ittiphalin, M., Chearanai, T.** The Application of Mathematical Model for Production Planning in a Polystyrene Factory // Procced. 6th IEEE internat. conf. on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). – Tokyo. – 2019. – P. 169–172.

6 **Isagulov, A. Z., Kulikov, V. Yu., Kovalyova, T. V.** Kachestvo modelej dlya lit`ya po gazificiruemy`m modelyam [The quality of models for casting gasified models] // Litejnoe proizvodstvo. – 2012. – Vol. № 10. – P. 36–38.

7 **Isagulov, A. Z., Kvon, S. S., Kovalyova, T. V., Kulikov, V. Yu., Shherbakova, E. P.** Ispol`zovanie vtorichnogo polistirola v kachestve komponenta materiala dlya izgotovleniya modelej pri LGM [The use of recycled polystyrene as a component of the material for the manufacture of models for casting gasified models] // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. – 2019. – Vol. 19. – № 3. – P. 44–52.

8 **Kulikov, V. Yu., Isagulov, A. Z., Kovalyova, T. V., Kvon, S. S., Shherbakova, E. P.** Issledovanie svojstv polistirola s dobavleniem vtorichny`x granul stroitel`nogo polistirola [Investigation of the properties of polystyrene with the addition of secondary granules of construction polystyrene] // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova. – 2017. – Vol. 15. – № 4. – P. 40–46.

9 **Isagulov, A. Z., Tverdoxlebov, N. I., Kovalyova, T. V.** Pererabotka i issledovanie suspenzionnogo polistirola [Processing and research of suspended polystyrene] // Ximiya i metallurgiya kompleksnoj pererabotki mineral`nogo sy`r`ya: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posv. 90-letiyu E. A. Buketova. – Karaganda, 2015. – P. 135–138.

10 GOST 2789-73. Sheroxovatost` poverxnosti. Parametry` i xarakteristiki [Surface roughness. Parameters and characteristics]. – Vved. 1975-01-01. – M., 1975. – P. 7.

11 GOST 25.506-85. Raschety` i ispy`taniya na prochnost`. Metody` mexanicheskix ispy`tanij metallov. opredelenie xarakteristik treshhinostojkosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhenii [Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. determination of crack resistance (fracture toughness) characteristics under static loading]. – Vved. 1986-01-01. – M., 1986. – P. 38.

12 GOST 1497-84. Metally`. Metody` ispy`tanij na rastyazhenie [Metals. Tensile testing methods]. – Vved. 1986-01-01. – M., 1984. – P. 28.

13 GOST 23409.6-78. Peski formovochny`e, smesi formovochny`e i sterzhnevy`e. Metod opredeleniya gazoproniczaemosti [Molding sands, molding and core mixtures. A method for determining gas permeability.]. – Vved. 1980-01-01. – M., 1980. – P. 5.

14 **Kovalyova, T. V., Isagulov, A. Z.** Vliyanie tolshhiny` antiprigarnoj kraski na kachestvo otlivki pri lit`e po gazificirovanny`m modelyam [The effect of the thickness of the non-stick paint on the quality of the casting when casting according to gasified models] // Kulaginskie chteniya: texnika i texnologii proizvodstvenny`x processov: sb. – Chita, 2019. – P. 203–208.

15 **Shulyak, V. S.** Lit`e po gazificiruemy`m modelyam [Gasified casting]. – SPb. : NPO «Professional», 2007. – P. 408.

16 **Kovalyova, T. V., Isagulov, A. Z.** Modelirovanie temperaturny`x polej otlivok pri lit`e po gazificiruemy`m modelyam [Modeling of temperature fields of castings during casting using gasified models] // Mashinostroenie: novy`e koncepcii i texnologii : sb. st. vseross. nauch.-prakt. konf. stud., aspiran. i molod. uchen. – Krasnoyarsk : SibGU named after M. F. Reshetnyova, 2020. – P. 79–83.

17 **Kovalyova, T. V.** Termodinamicheskoe modelirovanie splava pri lit`e po gazificiruemy`m modelyam [Thermodynamic modeling of an alloy during casting using gasified models] // Integraciya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizacii Plana nacii (Saginovskie chteniya №13): tr. mezhdunar. nauch.-prakt. online konf., posv. 30-letiyu Nezavisimosti Respubliki Kazaxstan. – Karaganda: Izd-vo KarTU, 2021. – P. 1313–1314.

18 **Issagulov, A. Z., Kovaleva, T. V., Chsherbakova, Ye. P.** Lost pattern complex composition effect on steel casting structure and properties // Metalurgija. – 2021. – Vol. 60. – Issue 1–2. – P. 97–100.

04.09.2025 ж. баспаға түсті.
14.01.2026 ж. түзетулерімен түсті.
09.02.2026 ж. басып шығаруға қабылданды.

В. Ю. Куликов[1], А. А. Қордашева[2], Св. С. Квон[3], П. В. Ковалев[4]
[1,2,3]Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[4]НИУ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
Поступило в редакцию 04.09.2025.
Поступило с исправлениями 14.01.2026.
Принято в печать 09.02.2026.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНОКУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Основные проблемы получения отливок методом литья по газифицируемым моделям (ЛГМ):

– науглероживание поверхностного слоя стальной отливки при выгорании полистироловой модели;

– высокая стоимость литейного полистирола, используемого в качестве модельного материала. Это обстоятельство значительно повышает себестоимость конечной продукции и препятствует широкому распространению метода ЛГМ в производстве.

В мировой практике при изготовлении моделей методом ЛГМ гранулы строительного полистирола не применяются. Ранее проведенные исследования показали возможность их использования в качестве составляющей модельного материала.

Кроме того, управление структурой, а следовательно, и свойствами получаемых отливок представляет определённые трудности. Возможность получения отливок с мелкозернистой (высокопрочной) структурой и однородным составом по всему объёму литых заготовок обеспечивается регулированием температурного режима отливок, например, при сочетании суспензионного литья и литья по газифицируемым моделям. Для ввода инокуляторов в расплав используется непосредственно полистироловая модель.

Литейное производство является важнейшей заготовительной базой машиностроения. Методом литья изготовляют разнообразные фасонные отливки, получающиеся при заполнении жидким металлом литейных форм. Во время затвердевания металл принимает очертания полости формы, в которую был залит. Литые изделия имеют широкое применение в промышленности, так как размеры и форма отливок часто в большей степени приближаются к требуемым размерам и формам готовых изделий, чем заготовки, получаемые другими способами. Это очень важное преимущество, так как сокращение затрат на механическую обработку снижает себестоимость изделий и уменьшает расход металла. Кроме того, производство литых заготовок значительно дешевле.

Ключевые слова: инокуляторы, легированные отливки, суспензионное литьё, литьё по газифицируемым моделям, качество, структура.

V. Iu. Kulikov[1], A. A. Kordasheva[2], Sv. S. Kvon[3], P. V. Kovalev[4]
[1,2,3]Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[4]NRU Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russian Federation, Saint Petersburg.
Received 04.09.2025.
Received in revised form 14.01.2026.
Accepted for publication 09.02.2026.

STUDY OF THE USE OF INOCULANTS TO IMPROVE THE QUALITY OF CASTINGS IN LOST FOAM CASTING

The main problems of producing castings by the Lost Foam Casting (LFC) method are as follows:

– carburization of the surface layer of steel castings during the burnout of the polystyrene model;

– the high cost of foundry polystyrene used as a model material. This significantly increases the cost of the final products and limits the widespread application of the LFC method in manufacturing.

In global practice, construction polystyrene granules are not used for producing models in LFC. However, previous studies have demonstrated the possibility of using them as a component of the model material.

In addition, controlling the structure, and therefore the properties, of the resulting castings presents certain challenges. The ability to obtain castings with a fine-grained (high-strength) structure and a homogeneous composition throughout the entire volume of cast billets can be achieved by regulating the thermal regime of castings, for example, by combining suspension casting with the lost foam casting method. To introduce inoculants into the melt, the polystyrene model itself is directly used. casting molds with liquid metal. During solidification, the metal takes on the shape of the cavity of the mold into which it was poured. Cast products are widely

used in industry, as the sizes and shapes of castings often approach the required sizes and shapes of finished products to a greater extent than blanks obtained by other methods. This is a very important advantage, as reducing the cost of machining reduces the cost of products and reduces metal consumption. In addition, the production of cast blanks is much cheaper.

Keywords: inoculants, alloyed castings, suspension casting, lost foam casting, quality, structure.

ҒТАМР 53.37.13

https://doi.org/10.48081/BGQF2237

Р. Б. Масалимов[1], *Р. В. Сапинов[2], Д. Б. Касымова[3], Ж. Шошай[4], М. А. Адылканова[5]

[1,2,3,4,5]Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті», Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;

[2,4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

[1,3]«ҚР МШКҚӨ ҰО» РМК «ВНИИцветмет» филиалы, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0798-0303

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1861-0539

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8193-116X

*e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz

МЫС-МОЛИБДЕН КЕНДЕРІН ӨҢДЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ

Мыс-молибден кендерін өңдеу кезінде, негізгі міндет, байытудың бастапқы кезеңінде коллективті-селективті флотациялаумен мысты бөліп алу болып табылады. Бұл оны шамадан тыс ұнтақтамауға және қалдықтарға жоғалтпауға мүмкіндік береді. Жұмыстың мақсаты мыс-молибден кендерін өңдеу технологиясын жетілдіру, оларды бос тау жыныстарынан бөліп алу үшін және бірінші сатыдағы мыс концентратын кейіннен бөліп алу үшін сулфидтердің жалпы массасын (мыс + молибден + пирит) алу арқылы коллективті флотация жүргізу кезінде мыс пен молибден алу процесінің оңтайлы параметрлерін белгілеу. Алдын ала тәжірибелер нәтижесінде жинағыш реагентінің шығыны 80 г/т (SIBX) оңтайлы екендігі анықталды. Осы тәжірибелерді жүргізу кезінде негізгі флотацияны бірінші сатыдағы бастапқы мыс концентратын бөлу арқылы жүргізуге болатындығы атап өтілді, өйткені процестің алғашқы минуттарында (флотация процесінің алғашқы 3 минутында) тауарлық мыс концентратын алуға болады. Құрамында шамамен 30 % мыс, 89 % болатын концентрат алынды. Ашық цикл жағдайында концентратты селективті бөлу кезінде бірінші циклде мыс алынғаннан кейін оның құрамында шамамен 0,9 % молибден және 57,7 % болатын молибден концентратын алуға болатындығы анықталды. Бұдан әрі мыс-молибден кенін флотациялық байытудың жабық циклін зерттеу және алынған концентраттарды металлургиялық өңдеу жоспарлануда.

Кілтті сөздер: мыс, молибден, флотация, металлургия, бөліп алу, кендерді байыту.

Кіріспе

Мыс пен молибден минералдары, оның ішінде халькопирит ($CuFeS_2$) және молибденит (MoS_2) флотациялаудың екі кезеңінде алынады. Алдымен мыс-

молибден концентраты алынады, содан кейін зауытта мысты молибденнен бөлу процесі бөлек жүзеге асырылады [1]. Құрамында мыс бар кендерді өңдеудің негізгі мәселелері: кендегі мыс құрамының төмендігі, суспензиядағы бөлшектердің жоғары мөлшері, ультра дисперсті агрегаттар түрінде мыс минералдарын анықтау және жоғары тиімді селективті реагенттердің болмауы. Сондықтан бұл шикізат түсті металл сульфидтерін алу тұрғысынан ең күрделі болып табылады.

Бұл жаңа селективті флотациялық реагенттерді қолдануға, оларды бірлестіре пайдалану, реагенттерді ультрадыбыспен өңдеу, сондай-ақ флотациялау жабдықтың жаңа конструкцияларына әзірлеу тиімділікті арттыру бойынша мәселелерді шешеді [2; 3; 4].

Мыс-молибден кендерін байытудың қиындықтарының бірі ол байыту өнімдерін өте ұсақ ұнтақтау қажеттілігі, яғни сульфидті минералдарды тау-кен жыныстарынан бөліп алудың тиімділігінің төмендігі және сульфидті минералдарды өңдеу үшін күрделі технологикалық режимдерді қолдану қажеттілігі туындайды [5; 6; 7]. Біріктірілген жинағыш реагенттерді пайдалана отырып, мыс-молибден кендерін өңдеу технологиясын жетілдіру бойынша келесі зерттеу жұмыстары көрсетілген. Мыс-молибден флотациясының цикліне негізгі флотация, бақылау флотациясы және концентратты үш рет тазарту кіреді. Базалық режимде мыс құрамы 16,25 % және бөліп алу дәрежесі 77,79 % құраса, сондай-ақ молибден мөлшері 0,45 % және бөліп алу дәрежесі 79,38 % болатын коллективті мыс-молибден концентраты алынды. 1:3:15 қатынасында біріктірілген жинағыш агентін дайындау үшін реафлот, тионокарбамат және бутилксантат қолданылған. Біріктірілген жинағыш агентінің эмульсиясын алу үшін -3,6 мкм бөлшектердің 99,5 % құрайтын дисперсияның ең жақсы дәрежесі таңдалған. Біріктірілген жинағыш агентті пайдалану мысты коллективті мыс-молибден концентратына бөліп алуды 5,79 %-ға, ал молибденді бөліп алуды 9,08 % – ға арттырған [8].

Келесі зерттеуде микроэмульсия алу үшін флотация алдында біріктірілген флотациялық реагентті ультрадыбыстық гомогенизатор арқылы алдын ала өткізілген. Аралас микроэмульсияны қолдану мыс-молибден концентратына мысты бөліп алуды 3,69 %-ға және молибденді бөліп алуды 6,05 %-ға арттырған. Мыс-молибден концентратындағы мыс мөлшері 1,26% - ға артқан. Флотациялық қалдықтардағы мыс мөлшері 0,07-ден 0,056 %-ға дейін төмендеген. Аралас реагенттің шығыны негізгі бутилксантогенатпен салыстырғанда 15 %-ға төмендеген [9].

Бұл зерттеуде қосындылы (порфирлі) типтегі төмен сапалы мыс-молибден кенін қайта өңдеу мүмкіндігі қарастырылған. Заттық құрамы пайдалы компоненттердің төмен құрамымен сипатталады: Cu – 0,35 %, Mo – 0,018 %, Ag – 2,18 г/т, ал күкіртің (S) мөлшері – 2,5%. Аталған кенді өңдеудің негізгі қиындығы пириттің жоғары флотацияланғыштығы болып табылады. Жоғары сілтілік ортада терең әктас депрессиясы негізделген дәстүрлі технологиялық схемаларды қолдану күкіртті ғана емес, сонымен қатар молибдениттің флотацияланғыштығын төмендеуіне әкеледі, нәтижесінде оның бөліп алуынуын 57,5 % дейін азайтады. Коллективті флотация схемасын қолдану және ВК-345 жинағышын пайдалану молибден өндірісін тікелей селекция процесімен салыстырғанда 16,4%-ға арттыруға мүмкіндік берген [10].

Жоғарыда аталған зертханалық тәсілдер қымбат тұратын жабдықтарды қолдану қажеттілігі мен бірге өнеркәсіптік жағдайда жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Бұл жұмыстың мақсаты флотациялық байыту сатысында мыс-молибден кендерін өңдеудің параметрлерін жетілдіру, яғни оларды бос жыныстардан бөліп алу үшін сульфидтердің жалпы массасын (мыс + молибден + пирит) алу және бірінші сатысындағы «бастапқы мыс концентратын» бөлу болып табылады. Мыс-молибден кендерін өңдеу процесі көптеген қайта бөлулерден тұратын өте күрделі процесс. Бұл жұмыста ашық циклде концентратты селективті бөлуге бағытталған мыс-молибден кендерін байыту процесі ғана қарастырылған.

Материалдар мен әдістері

Қазақстан Республикасының Өскемен қаласында орналасқан Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінде және «ҚР МШКӨ ҰО» РМК «Түстіметалдар ҒЗИ» (ВНИИцветмет) филиалы базасында барлық тәжірибелік эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Зерттеу объектісі - Қазақстан Республикасының аумағында орналасқан кен орындарының мыс молибденді кендері (200 кг) болып табылды. «Agilent technologies» (АҚШ) компаниясының ICP-MS 7500cx масс-спектрометрі шикізаттың химиялық құрамын анықтау үшін қолданылды. Рентгендік дифрактометрді талдау үшін BRUKERD8 ADVANCE рентгендік дифрактометрі зерттеленіп отырған материалдың минералдық құрамын анықтауға қолданылды. Рентгендік дифракциялық талдау (XRD) материалдың сапалық құрамын анықтаудың кең таралған әдісі болып табылады. Зерттеу мақсаттарына жету үшін бастапқы үлгінің химиялық және фазалық химиялық құрамы анықталды. Сонымен қатар зерттелетін материалдың материалдық құрамын толық зерттеу мақсатында рентгендік дифракциялық талдау (XRD) жүргізілді.

Кен дайындау схемасы үлгілердің репрезентативтілігін сақтай отырып, араластырудың, орташаландырудың, ұсақтаудың, електеудің және қысқартудың бірізді операцияларын қамтиды. Флотациялық тәжірибелер камералардың көлемі 1,5; 1,0; 0,75 және 0,5 дм3 болатын «ФМП-Л1», «ФМП-Л» типті «Вэктис Минералз» ЖШҚ зертханалық флотациялық машиналарында жүргізілді. Флотациялық сынақтарды жүргізу барысында пайдаланылған реагенттердің сипаттамасы 1-кестеде келтірілген.

1-кесте – Флотациялық сынақтар жүргізу кезінде қолданылған флотациялық реагенттер

Маркасы	Химиялық атауы немесе формуласы	Реагент түрі
МИБК (MIBC)	Метилизобутилкарбинол. Спиртік негіз. Меншікті салмағы 0,81 г/см^3	Көбіктендіргіш
SIBX	Натрийдің изобутилді ксантогенті	Жинағыш
SBX	Натрий бутил ксантогенаты	
SIPX	Натрий изопропил ксантогенаты	

Дизель отыны	Молибден минералдары үшін аполярлы жинағыш ең селективті әсер етуші реагенттердің қатарына жатады	Молибденге арналған жинағыш
Lupromin 1668		
NaHS	Натрий гидросульфиді	Мыс минералдарын сульфидтеуге арналған реагент
CaO	Әктас (Темір сульфидтерінің депрессоры).	pH ортасын реттегіш.

Алдын ала тәжірибелер нәтижесінде жинағыш реагентінің шығыны (SIBX) оңтайлы екендігі анықталды - 80 г/т. Осы тәжірибелерді жүргізу кезінде негізгі флотацияны бірінші сатыдағы бастапқы мыс концентратын бөлу арқылы жүргізуге болатындығы атап өтілді, өйткені процестің алғашқы минуттарында тауарлық мыс концентратын алуға болады. Бірінші сатысында «бастапқы мыс концетратын» бөліп алу бойынша тәжірибелер 1-суретте көрсетілген ашық схема бойынша жүргізілді. Ұнтақтаудың оңтайлы параметрлерін анықтау үшін шикізат бөлшектерінің мөлшерінің, көбіктендіргіштің, pH пен жинағыштың флотация процесіне әсері де зерттелді.

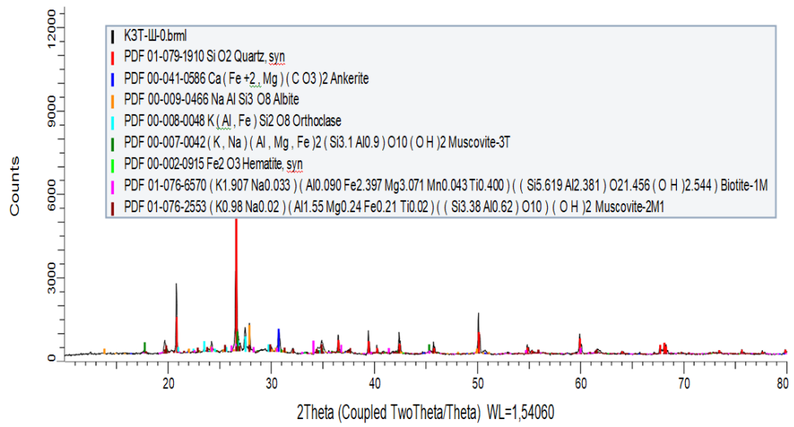
1-сурет – Бірінші сатыдағы мыс концентратын бөлу арқылы флотациялық байытуды жүргізу схемасы

Бұдан әрі қарай сульфидтердің жалпы массасын (мыс + молибден + пирит) бос тау жыныстарынан бөліп алу және бірінші сатыдағы «бастапқы мыс концентрациясын» бөліп алу, содан кейін молибденді 2-суретте келтірілген схема бойынша бөлу бойынша тәжірибелер жүргізілді.

2-сурет – Бірінші сатыдағы мыс концентратын бөліп алу және молибденді одан әрі бөлу арқылы флотациялық байытуды жүргізу схемасы

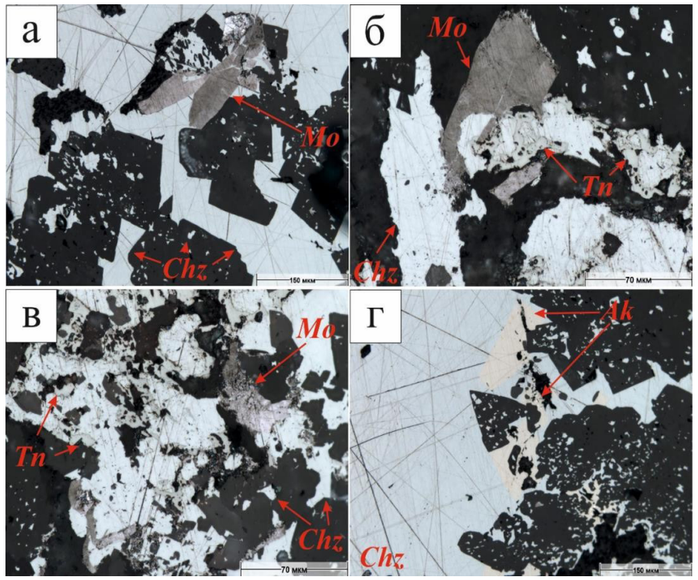
Нәтижелер және талқылау

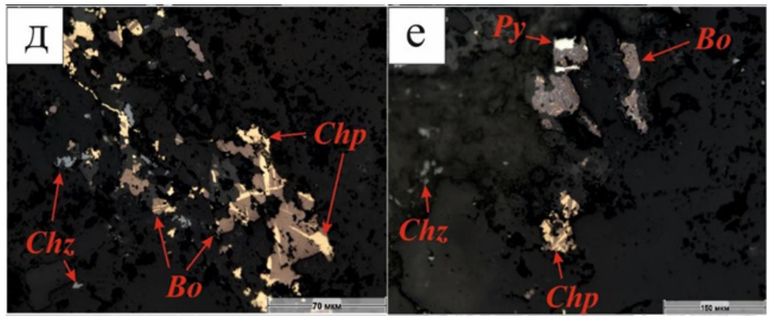
Зерттеу объектісі сынамаларының қысқаша химиялық құрамы: Cu ≈ 0,52 (мас.%); Mo ≈ 0,027 (мас.%); Fe ≈ 3,71 (мас.%); Au 0,13 (г/т) және Ag 4,3 (г/т) құрайды. 3-суретте зерттелетін мыс-молибден кені сынамасының дифрактометриялық талдау нәтижелері көрсетілген.



3-сурет – Зерттелетін мыс-молибден кені сынамасының дифрактометриялық талдау нәтижелері

Алынған деректердің нәтижесінде тау жынысын түзуші минералдардың ішінде слюдалы (слюда топтары) минералдар, кварц және дала шпаттары басым екені анықталды. Слюдалы минералдардың жиынтық үлесі 47,8 %-ды құрайды. Олар мусковитпен, биотитпен, аз дәрежеде клинохлормен, хлоритпен және эпидотпен сипатталады. Дала шпаттары альбит пен ортоклаздан тұрады. Карбонатты минералдар сынамада анкерит түрінде және кальциттің жекелеген түйірлері ретінде кездеседі. Кенді минералдардың ішінде сынамада мыс минералдары мен темір құрамды минералдар дамыған. Мыс минералдары негізінен мыстың қайталама минералдарымен (халькозин, борнит, ковеллин), сондай-ақ халькопиритпен берілген. Темір құрамды минералдар пирит және тотыққан формалар түрінде кездеседі. Сынамада молибденittің қабыршақтары мен пластинкалары шамалы мөлшерде байқалады. 4-суретте (а,б,в,г) халькозинмен ассоциацияда дамыған молибденittің, айкиниттің және солғын кеннің жекелеген түйірлері, ал 4-суретте (д,е) халькозиннің борнит бойынша алмасуының графикалық құрылымдары көрсетілген.





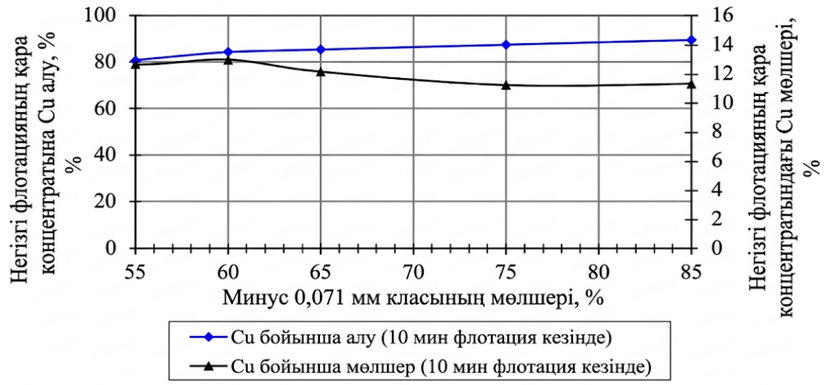
Шартты белгілер: Chz – халькозин, Mo – молибденит, Ak – айкинит, Tn – солғын кен, Bo – борнит, Py – пирит, Chp – халькопирит
4-сурет – Аншлиф. Халькозинмен (а,б,в,г) ассоциацияда дамыған молибденittің (а), айкиниттің (г) және солғын кеннің (б,в) жекелеген түйірлері. Пиритпен селбескен халькозин (е).
Борниттің дербес түйірлері және халькопириттің ыдырау құрылымдары (д)

2-кестеде ірілігі минус 2 мм дейін ұсақталған сынаманың гранулометриялық талдауы келтірілген.

2-кесте – Ірілігі минус 2 мм дейін ұсақталған сынаманың гранулометриялық талдауы

Түйіршік ірілігінің классы, мм	Шығымы, %	Құрамы, %		Таралуы, %	
		Cu	Mo	Cu	Mo
+2,0	0,57	0,40	0,011	0,41	0,23
-2,0+1,0	27,57	0,55	0,028	27,31	28,82
-1,0+0,63	14,00	0,39	0,021	9,84	10,97
-0,63+0,315	15,63	0,50	0,026	14,07	15,17
-0,315+0,160	10,77	0,63	0,026	12,22	10,45
-0,160+0,100	6,80	0,64	0,021	7,84	5,33
-0,100+0,071	2,23	0,82	0,027	3,30	2,25
-0,071+0,045	0,20	1,62	0.030	0,58	0,22
-0,045	22,23	0,61	0,032	24,43	26,55
Жиынтығы:	100,00	0,555	0,027	100,0	100,00

Мыс-молибден кені үлгісінің ұнтақталу дәрежесінің негізгі флотация көрсеткіштеріне тәуелділігі 5-суретте келтірілген. Кенді 55 % -дан 85 % -ға дейін ұсақтау кезінде минус 0,071 мм негізгі флотацияның қаралтым концентратына мысты алу ұзақтығы 10 минут болғанда 75,8 % -дан 89,3 % -ға дейін артады.



5-сурет – Мыс-молибден кені сынамасын ұнтақтау дәрежесінің негізгі флотация көрсеткіштеріне тәуелділігі

Осыдан тазартылмаған концентраттағы мыс мөлшері 13,92 -ден 11,2 % -ға дейін азаяды. Қоректендіру ірілігінің минус 0,071 мм класс 65 % құрағанда, негізгі флотацияның тазартылмаған концентратына мыстың алуынуы 85,2 % қол жеткізілді. Бұдан әрі жүргізілген тәжірибелер осы ірілік өлшеміндегі кенде жасалды. Флотация көрсеткіштерінің көбіктендіргіш түріне, ортаның pH реттегішінің берілуіне, жинағыш түріне тәуелділігі 3–5-кестеде келтірілген.

3-кесте – Флотация көрсеткіштерінің көбіктендіргіш түріне тәуелділігі

Көбіктендіргіш атауы	Өнімнің атауы	Шығымы, %	Құрамы Cu, %	Cu бөліп алуы, %
Тест №1				
МІВС	І Концентрат	0,94	31,9	58,8
	Негізгі флотацияның ІІ қаралтым (қара) концентраты	2,81	4,66	25,7
	Бақылау флотациясы концентраты	2,99	0,76	4,5
	Флотация қалдығы	93,26	0,060	11,0
	Кен	100,00	0,510	100,0
Тест №2				
Х-133	І Концентрат	1,43	18,5	52,1
	Негізгі флотацияның ІІ қаралтым (қара) концентраты	2,79	5,95	32,7
	Бақылау флотациясы концентраты	2,92	0,75	4,3
	Флотация қалдығы	92,86	0,060	10,9
	Кен	100,00	0,508	100,0
Тәжірибені жүргізу шарттары: ұсақтау ірілігі минус 0,071 мм класының 65% -н * - кестеге сәйкес көбіктендіргіштің атауы				

4-кесте – Негізгі операцияларда ортаның pH реттеуі үшін CaO мөлшерінің негізгі флотация көрсеткіштеріне тәуелділігі

Тәжірибе шарты	Өнімнің атауы	Шығымы, %	Құрамы Cu, %	Cu бөліп алуы, %
Тест №1				
CaO = 0 г/т (pH=8,86/8,82)	І Концентрат	1,10	30,5	68,6
	Негізгі флотацияның ІІ қаралтым (қара) концентраты	2,11	3,76	16,2
	Бақылау флотациясы концентраты	3,23	0,54	3,6
	Флотация қалдығы	93,56	0,061	11,6
	Кен	100,00	0,489	100,0
Тест №2				
CaO = 50 г/т ұсақтаумен (pH=9,00/8,92)	І Концентрат	1,03	33,1	68,1
	Негізгі флотацияның ІІ қаралтым (қара) концентраты	2,89	3,20	18,5
	Бақылау флотациясы концентраты	2,17	0,55	2,4
	Флотация қалдығы	93,91	0,059	11,0
	Кен	100,00	0,510	100,00
Тест №3				
CaO = 50 г/т ІІ негізгі флотацияға	І Концентрат	0,84	35,2	59,8
	Негізгі флотацияның ІІ қаралтым (қара) концентраты	3,18	4,11	26,4
	Бақылау флотациясы концентраты	3,19	0,43	2,8
	Флотация қалдығы	92,79	0,059	11,1
	Кен	100,00	0,495	100,0

5-кесте – Негізгі флотация көрсеткіштерінің жинағыш түріне тәуелділігі

Жинағыш атауы	Өнімнің атауы	Шығымы, %	Құрамы Cu, %	Cu бөліп алуы, %
Тест №1				
SIBX	І Концентрат	1,03	33,1	68,1
	Негізгі флотацияның ІІ қаралтым (қара) концентраты	2,89	3,20	18,5
	Бақылау флотациясы концентраты	2,17	0,55	2,4
	Флотация қалдығы	93,91	0,059	11,0
	Кен	100,00	0,510	100,00
Тест №2				
SBX	І Концентрат	0,94	31,9	58,8
	Негізгі флотацияның ІІ қаралтым (қара) концентраты	2,81	4,66	25,7
	Бақылау флотациясы концентраты	2,99	0,76	4,5
	Флотация қалдығы	93,26	0,060	11,0
	Кен	100,00	0,510	100,0

Тест №3				
SIPX	I Концентрат	1,35	27,9	69,6
	Негізгі флотацияның II қаралтым (қара) концентраты	2,62	3,28	15,9
	Бақылау флотациясы концентраты	2,36	0,52	2,3
	Флотация қалдығы	93,67	0,071	12,2
	Кен	100,00	0,541	100,0

2-ші суретте келтірілген схема бойынша ашық циклде жүргізілген тәжірибелер нәтижесінде «бастапқы мыс концентраты» ретінде негізгі флотация (I концентрат) концентраты алынды. Бұл концентарттағы мыс мөлшері 32,4–35,3 % болып, оның алыну дәрежесі 59,7–67,7 % құрады. Молибден мөлшері 0,84–1,02 % оны алу дәрежесі 32,2–39,4 % болды, алынған концентрат сынамасының микроқұрылымы 6а-суретте көрсетілген;

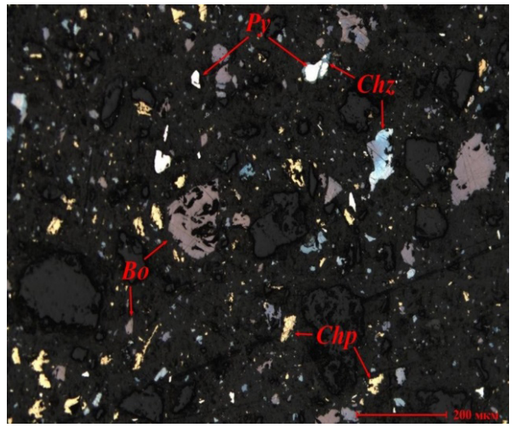
– негізгі флотацияның II қайта тазарту концентратында мыс мөлшері – 15,2–20,0 % болып, оның алуыну дәрежесі 14,1–21,3 % құрады, Молибден мөлшері 0,51–0,82 % болып, оның алуыну дәрежесі 9,7–18,3 %, алынған концентрат сынамасының микроқұрылымы 6б-суретте көрсетілген;

– ұнтақтау операциясы кезінде молибден жинағыш ретінде дизель отынын қосу негізгі флотацияның біріктірілген концентратына молибденнің алыну дәрежесін 42,3 % -дан (дизель отынынсыз) 50,5 % -ға дейін (дизель отынын шығыны 7,5 г/т болғанда) арттырады;

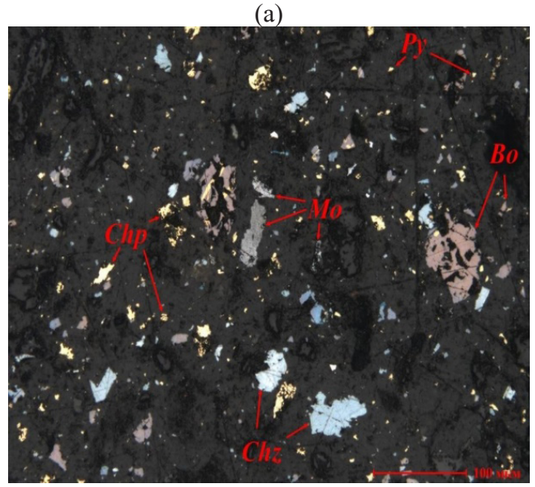
– дизель отынының Lupromin 1668 реагентімен (әрқайсысы 2,5 г/т) бірге пайдалану молибденнің біріктірілген концентратқа алынуын және оның сапасының біршама жоғарылауына әкеледі, сонымен бірге үйінді қалдықтардағы молибденнің мөлшері артады. Осыған байланысты кейінгі тәжірибелерде жинағыштардың бұл комбинациясы қолданылмады;

– ұнтақтау операциясына берілетін дизель отынының оңтайлы шығыны 2,5 г/т екені анықталды;

– негізгі флотацияның II қаралтым (қара) концентратын ұнтақтау схемасына енгізген кезде біріктірілген концентратқа мыс пен молибден алуынуы 3–5 %-ға азаяды.



(а)



(б)

Шартты белгілер: Chp – халькопирит,
Py – пирит, Chz – халькозин, Bo – борнит, Mo – молибденит.
6-сурет – Пириттің халькозинмен селбесуі (а),
орталық бөлігіндегі молибденит қабыршақтары (б)

Қорытынды

Жоғарыда келтірілген ашық схема бойынша реагенттердің келесі режимі анықталды:

– флотация процесінің алғашқы 3 минутында негізгі флотация I концентратының «бастапқы мыс концентраты» ретінде бөліп алынуы;

– жинағыш ретінде SIBX реагентін, көбіктендіргіш ретінде MIBC қолдану;

– ортаның pH мәнінің реттеуші ретінде әктас (CaO) реагентін негізгі флотация II операциясына қолдану.

Бұдан әрі алдағы уақытта авторлар мыс-молибден кенін флотациялық байытуды жабық циклдегі тәжірибелерді жүргізуді және алынған концентраттарды металлургиялық өңдеу бойынша зерттеу жұмысын жоспарлап отыр.

REFERENCES

1 **Boostan, H., Sam, A.** Reprocessing of copper and molybdenum by flotation method from final fresh low-grade sulfide tailings (case study: Sarcheshmeh copper complex), Journal of Environmental Chemical Engineering. – 13. – 2. – 2025. – 115496.

2 **Koizhanova, A., Kenzhaliyev, B., Magomedov, D., Kamalov, E., Yerdenova, M., Bakrayeva, A., Abdyldayev, N.** Study of Factors Affecting the Copper Ore Leaching Process. ChemEngineering. – 2023. – 7. – 54.

3 **Prakash, R., Majumder, S. K., Singh, A.** Flotation technique: Its mechanisms and design parameters, Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 127. – 2018. P. 249–270.

4 **Hassanzadeh, A., Sajjady, S. A., Gholami, H., Amini, S., Özkan, S. G.** An Improvement on Selective Separation by Applying Ultrasound to Rougher and Re-Cleaner Stages of Copper Flotation. Minerals. – 2020. – 10. – 619.

5 **Jorjani, E., Barkhordari, H.R., Tayebi Khorami, M., Fazeli, A.** Effects of aluminosilicate minerals on copper-molybdenum flotation from Sarcheshmeh porphyry ores. Miner. Eng. – 2011. – 24. – P. 754–759.

6 **Wang, Z., Li, X., Wang, Z., Huang, W., Liu, G., Zeng, C. Huang, L.** Separation of Copper-Molybdenum Flotation Concentrate by Superconducting High-Gradient Magnetic Separation. Minerals. – 2022. – 12. – 1191.

7 **Ge, W., Liu, J., Ren, H., Zhu, Y., Han, W., Han, Y.** Enhanced mixed flotation of copper–molybdenum ore using dodecyl dimethyl betaine-emulsified kerosene as environmentally friendly collector, Journal of Cleaner Production. – 447. – 2024. – 141576.

8 **Semushkina, L., Abdykirova, G., Mukhanova, A., Mukhamedilova, A.** Improving the Copper-Molybdenum Ores Flotation Technology Using a Combined Collecting Agent. Minerals. – 2022. – 12. – 1416.

9 **Semushkina, L. V., Abdykirova, G. Zh., Turysbekov, D. K., Narbekova, S. M., Kaldybayeva, Zh. A.** On the possibility to process copper-molybdenum ore using a combined flotation reagent. Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources. – 2021. – 4. – 319. – P. 57–64.

10 **Lihua, Z.** Flotation process optimization of a copper molybdenum polymetallic ore in Xizang [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources. – 2025. – 46(1): P. 125–131.

16.03.2026 ж. баспаға түсті.
02.04.2026 ж. түзетулерімен түсті.
21.04.2026 ж. басып шығаруға қабылданды.

Р. Б. Масалимов[1], *Р. В. Сапинов[2], Д. Б. Касымова[3], Ж. Шошай[4], М. А. Адылканова[5]
[1,2,3,4,5]ВКТУ имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[2,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[1,3]Филиал «ВНИИцветмет» РГП «НЦ КПМС РК»,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 16.03.2026.
Поступило с исправлениями 02.04.2026.
Принято в печать 21.04.2026.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД

При переработке медно-молибденовых руд основной задачей является извлечение меди на начальной стадии обогащения коллективно-селективной флотации. Это позволяет не переизмельчать её и не терять в хвостах. Целью работы является усовершенствование технологии переработки медно-молибденовых руд путем установления оптимальных параметров процесса извлечения меди и молибдена при проведении коллективной флотации с извлечением общей массы сульфидов (медь + молибден + пирит), для отделения их от пустой породы и последующим выделением медного концентрата первой стадии. В результате предварительных опытов установлено, что оптимальным является расход собирающего реагента (SIBX) – 80 г/т. При проведении этих экспериментов было отмечено, что основную флотацию можно проводить путем разделения первичного медного концентрата на первой стадии, поскольку товарный медный концентрат может быть получен в первые минуты процесса (первые три минуты процесса флотации). Был получен концентрат с содержанием меди ≈ 30 % и извлечением 89 %. Было установлено, что при селективном разделение концентрата в открытом цикле при извлечении меди в первом цикле возможно получение молибденового концентрата с содержанием молибдена ≈ 0,9 % и извлечением 57,7 %. Далее планируется изучение закрытого цикла флотационного обогащения медно-молибденовой руды и металлургическая обработка полученных концентратов.

Ключевые слова: медь, молибден, флотация, металлургия, извлечение, обогащение.

R. B. Masalimov[1],*R. V. Sapinov[2], D. B. Kassymova[3], Zh. Shoshay[4], M. A. Adilkanova[5]
[1,2,3,4,5]D. Serikbayev EKTU, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[2,4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[1,3]VNIItsvetmet Branch of the RSE «NC CPMR RK»,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 16.03.2026.
Received in revised form 02.04.2026.
Accepted for publication 21.04.2026.

IMPROVEMENTS IN COPPER-MOLYBDENUM ORE PROCESSING TECHNOLOGY

When processing copper-molybdenum ores, the main objective is to extract copper at the initial stage of enrichment using bulk-selective flotation. This prevents overgrinding and loss in tailings. The aim of this study is to improve copper-molybdenum ore processing technology by establishing optimal parameters for copper and molybdenum extraction during bulk flotation with the extraction of the total mass of sulfides (copper + molybdenum + pyrite), separating them from gangue, and subsequently recovering first-stage copper concentrate. Preliminary experiments revealed that the optimal consumption of collecting reagent (SIBX) is 80 g/t. These experiments demonstrated that primary flotation can be carried out by separating the primary copper concentrate at the first stage, since commercial copper concentrate can be obtained within the first minutes (the first three minutes of the flotation process) of the process. A concentrate with a copper content of approximately 30 % and a recovery of 89 % was obtained. It was found that with selective separation of concentrate in an open cycle during copper extraction in the first cycle, it is possible to obtain molybdenum concentrate with a molybdenum content of ≈ 0.9 % and an extraction of 57.7 %. In the future, it is planned to study the closed cycle of flotation enrichment of copper-molybdenum ore and metallurgical processing of the obtained concentrates.

Keywords: copper, molybdenum, flotation, metallurgy, extraction, beneficiation.

SRSTI 53.39.31; 53.39.01

https://doi.org/10.48081/BGQF2238

K. Tuyskhan[1], G. E. Akhmetova[2], G. A. Ulyeva[3]

[1,2]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;

[3]JSC «Qarmet», Republic of Kazakhstan, Temirtau.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4272-2637

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8244-5027

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3600-1318

*e-mail: kura_tuyskhan@mail.ru

PRODUCTION OF SILICON CARBIDE BY SPARK PLASMA SINTERING

This article investigates the synthesis of silicon carbide through the efficient processing of microsilica, a technogenic waste by-product of silicon production at «Tau-Ken Temir» LLP. High-purity microsilica and P804T-grade carbon were utilized as the starting components. The powder mixture was blended in a WiseMix BML-2 planetary mill at 200 rpm for 24 hours, followed by processing in a «Labox 650, Sinter Land» spark plasma sintering system. Sintering was conducted at a temperature of 1800 °C, a pressure of 50 MPa, and a holding time of 10 minutes. Thermodynamic analysis, performed using the Thermo-Calc software package, demonstrated that 1800 °C is the optimal temperature for silicon carbide formation in the Si-C-O system. Furthermore, the results confirm that the selected technological parameters intensify reaction kinetics and ensure complete phase transformations. The study revealed that the resulting material possesses high density (3.22 g/cm³), hardness (286 HB), and a homogeneous nanostructure. According to X-ray diffraction (XRD) analysis, the predominant phase is β-SiC (98.2 %). Microstructural studies showed that the average particle size is 108.4 nm, and the material is characterized by a dense, virtually defect-free structure without pores. The absence of electrical conductivity (<0.5 MS/m) indicates high material purity. These results demonstrate the effectiveness of the spark plasma sintering method for converting metallurgical waste into high-value-added materials, while also confirming the potential of this technology for energy conservation and environmental optimization of production.

Keywords: silicon carbide, microsilica, spark plasma sintering, carbothermic reduction, metallurgical waste, nanostructured material.

Introduction

Silicon carbide (SiC) is one of the most sought-after functional materials in modern metallurgy, due to its unique combination of high thermal stability, chemical inertness, wear resistance and corrosion resistance. These characteristics ensure its widespread use in key metallurgical processes, including steelmaking, reduction operations and slag modification, as well as in the production of high-quality refractories, abrasives and composite materials [1; 2].

The classic industrial method for producing silicon carbide the Acheson process – is based on the carbothermal reduction of silica at extreme temperatures of 2500-

2900 K. Despite its dominant position in the industry, this process is characterised by critically high energy consumption, a lengthy production cycle and the need for complex mechanical processing of the synthesised product [3]. Consequently, a pressing scientific and technical challenge is the development of alternative, more energy-efficient and controllable methods for the synthesis of SiC.

A promising and environmentally sound approach in this field is the use of industrial waste from silicon production with a high SiO_2 content. In particular, microsilica, which is formed as a by-product during the smelting of technical silicon, is regarded as a valuable secondary raw material for the production of carbide phases. Incorporating such waste into production allows for the simultaneous expansion of the industry's raw material base and a significant reduction in the environmental burden on regions [4; 5].

In recent years, particular attention has been paid to the spark plasma sintering (SPS) method as a technology for accelerated reaction synthesis. The SPS mechanism, based on the synergistic effect of pulsed electric current, mechanical pressure and high temperature, ensures intensive compaction of powder systems and acceleration of diffusion processes [6; 7]. Unlike traditional furnace methods, SPS allows for a radical reduction in synthesis time and minimisation of specific energy consumption.

Despite active research in the field of SPS technologies, the formation of SiC specifically from actual industrial waste remains incompletely understood. Most existing studies on SPS synthesis are based on the use of pure laboratory reagents, which do not account for the specific behaviour of impurity backgrounds and phase transformations in complex industrial systems.

The scientific novelty of this work lies in the development and experimental validation of a method for synthesizing highly dispersed β-SiC from microsilica produced at the «Tau-Ken Temir» LLP plant (Kazakhstan). Unlike conventional approaches, this study is the first to propose a combination of preliminary mechanochemical activation tailored to the specific composition of this microsilica, followed by SPS synthesis at a reduced temperature of 1800 °C. This integrated approach significantly intensifies carbothermic reactions within the Si-C-O system by increasing the structural defect density of the raw materials, ensuring the formation of phase-pure β-SiC while achieving effective recycling of industrial waste.

Materials and Research Methods

The spark plasma sintering method was employed to study and process the microsilica generated during the production of technical silicon at the «Tau-Ken Temir» LLP plant. High-purity microsilica powder (SiO2) and synthetic carbon (carbon black) of grade P804T were used as starting materials.

The stoichiometric ratio of the components was calculated in accordance with the following reaction equation.

$$SiO_2+3C \rightarrow SiC+2CO$$

For the SiO_2+3C reaction, the theoretical molar masses of the initial mixture are:

$$M_{SiO2}=28+2\cdot16=60 \text{ g/mol}$$
$$M_{3C}=3\cdot12=36 \text{ g/mol}$$

Total molar mass of the mixture:

$$M_{(SiO2+3C)} = 60 \text{ g/mol} +36 \text{ g/mol} =96 \text{ g/mol}$$

Hence, the mass fractions of the components in the initial mixture:
– mass fraction of SiO_2

$$\frac{60 \text{ g/mol}}{96 \text{ g/mol}} \cdot 100\,\% = 62{,}5\%$$

– mass fraction of C

$$\frac{36 \text{ g/mol}}{96 \text{ g/mol}} \cdot 100\,\% = 37{,}5\%$$

To prepare 10 g of a stoichiometric reaction mixture, the mass of each component was calculated:

mass of silicon dioxide (SiO_2):

$$(10 \text{ g} \cdot 62{,}5\%) / 100\% = 6{,}25 \text{ g}$$

mass of carbon (C):

$$(10 \text{ g} \cdot 37{,}5\%) / 100\% = 3{,}75 \text{ g}$$

Thus, 6.25 g of microsilica and 3.75 g of P804T synthetic carbon black were used to prepare the reaction mixture.

To ensure uniform distribution of the reagents and reduce their agglomeration, the mixture was subjected to mechanochemical treatment. Mixing was carried out in a WiseMix BML-2 planetary mill: the reaction mixture and 150 g of 5 mm diameter balls were loaded into the drum, after which the treatment was carried out (Figure 1). The process parameters selected were a mill rotation speed of 200 rpm and a processing duration of 24 hours (Figure 2). This regime ensures a high degree of homogeneity in the distribution of the components involved in the reaction.

Figure 1 – The process of weighing the balls

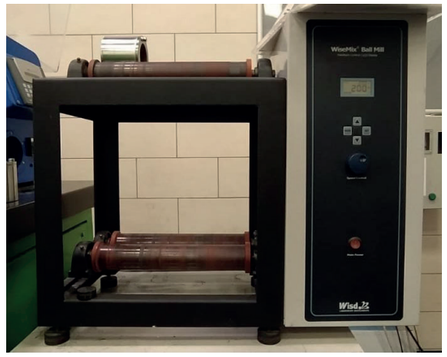


Figure 2 – The mixing process in the WiseMix BML-2 planetary mill

As a result of prolonged mixing at high speed, the particle size distribution of the reaction mixture narrowed and the surface energy of the particles increased, which contributes to the intensification of mass transfer and reaction kinetics in the subsequent spark plasma sintering stage.

A «Labox 650, Sinter Land» spark plasma sintering system was used to process the prepared reaction mixture. The experiments were carried out at the «Structural Ceramic Nanomaterials» Research Centre at NUST MISIS (Moscow, Russia). The temperature regime for the production of silicon carbide was set at 1800 °C based on the results of thermodynamic modelling performed using the Thermo-Calc software package.

The following parameters were set during the sintering process:

– Pressure: A constant mechanical pressure of 50 MPa was maintained, ensuring effective compaction of the sample;

– Temperature regime: The sample temperature was raised from room temperature to a maximum of 1800 °C over 10 minutes, corresponding to an average heating rate of approximately 180 °C/min;

– Holding time: Once the maximum temperature of 1800 °C was reached, it was maintained at a constant level for 10 minutes. This ensured the achievement of two key objectives: firstly, the completion of the carbothermal reduction reaction between SiO_2 and C; and secondly, the crystallisation of the resulting SiC phase and the further development of its microstructure;

– Atmosphere: The process was carried out under high vacuum conditions, which prevented oxidation of the material.

The specified parameters (in particular, a temperature of 1800 °C and a holding time of 10 minutes) create favourable conditions for the carbothermal transformation between SiO_2 and C to proceed, as well as for the formation and microstructural development of the resulting SiC phase.

The electrical properties of the synthesized samples were evaluated at room temperature using a VE-26NP eddy-current microstructure analyzer. The operating principle of the device is based on the induction of eddy currents in the surface layer of electrically conductive materials and subsequent determination of electrical conductivity. The measurable conductivity range of the instrument is 0.5-60 MS/m, with a lower detection limit of 0.5 MS/m. Measurements were performed at three different points on each sample surface to improve reliability. No measurable response was detected for the investigated SiC samples, indicating that their electrical conductivity remained below the sensitivity threshold of the instrument. These results suggest the absence of continuous conductive phases, including residual free carbon networks, within the synthesized material.

Figure 3 shows the spark plasma sintering process and a photograph of the resulting sample.

a b c

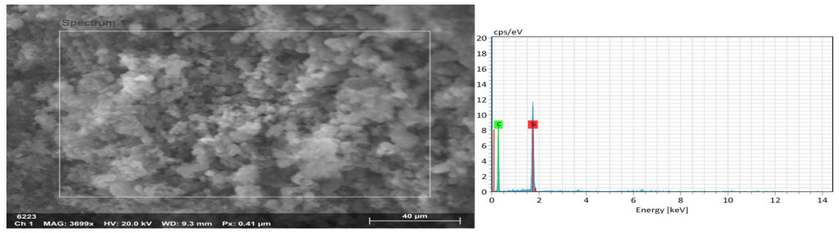
a – SPS process; b – temperature profile of the SPS process;
c – resulting sample

Figure 3 – Spark plasma sintering process and resulting sample

Results and discussion

The photograph of the SiC sample, produced by spark plasma sintering at a temperature of 1800 °C with a holding time of 10 minutes, shows a homogeneous material structure and the absence of significant macrodefects (deep pores, cracks), which indicates the effectiveness of the selected process parameters.

Figure 4 shows the microstructure of the sintered silicon carbide and the results of EDS analysis. According to the EDS data, silicon and carbon were identified as the main elements in the sample [8]. The absence of other elements indirectly indicates the high purity of the material obtained; however, given the detection limit and sensitivity of the EDS method, the presence of trace impurities cannot be completely ruled out.



Spectrum 1

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	1280	67.73	67.73	83.07	3.64	5.38
Silicon	14	12076	32.27	32.27	16.93	0.90	2.78
		Sum	**100.00**	**100.00**	**100.00**		

Figure 4 – Microstructure of the obtained silicon carbide and EDS spectrum

Figure 5 shows that the fracture surface is characterised by a dense, smooth, pore-free and homogeneous structure. Upon magnification, it is observed that the silicon carbide particles are firmly bonded together, forming a dense conglomerate. The fracture mode is granular. The average particle size is 108.4 nm. Such a finely dispersed microstructure contributes to an improvement in the material's mechanical properties, including strength and hardness, and also enhances its serviceability under conditions of high temperatures and mechanical loads.

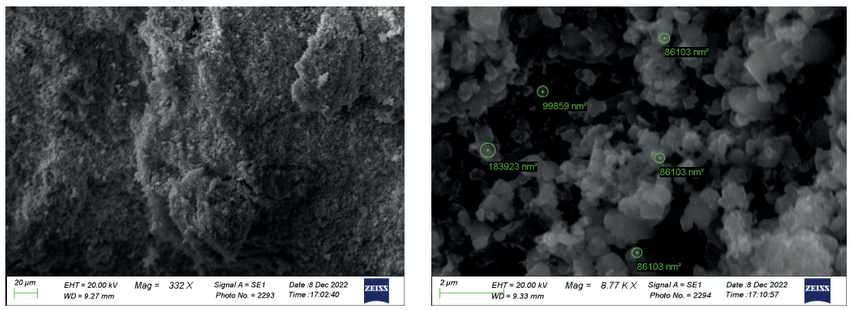


Figure 5 – Microstructure of the silicon carbide fracture surface

The driving force behind the process is the reduction in the system's thermodynamic potential associated with the formation of a new phase. This is confirmed by the results of X-ray diffraction (XRD) analysis, shown in Figure 6. According to the XRD data, β-SiC (3C-SiC) with a cubic crystal structure was identified as the main phase in the resulting material. Furthermore, a quantitative assessment of the phase composition showed that the sample contains: SiC – 98.2 %, SiO_2 – 1.5 % and free carbon (C) – 0.3 %.

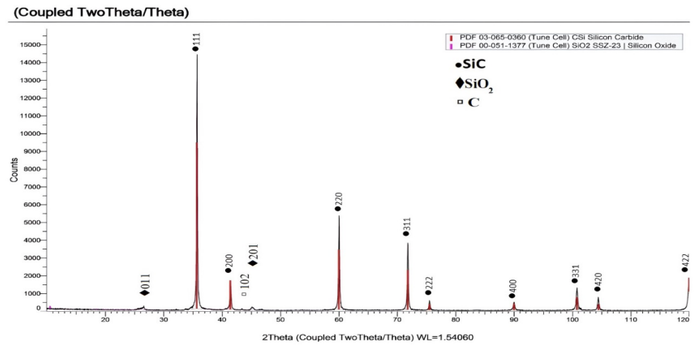


Figure 6 – X-ray diffraction of silicon carbide

The density of the sintered sample was then determined using the hydrostatic weighing method. The electrical properties were evaluated using a VE-26NP eddy-current conductivity analyzer. The results are presented in Table 1.

Table 1 – Results of physical and mechanical tests on the silicon carbide sample

Parameters	Silicon carbide
Hardness, HB	286
Density, g/cm^3	3.22
Electrical conductivity, MS/m	-
Compressive strength, kN:	
- initial failure	7
- failure	18

The results of the physical and mechanical tests (Table 1) show that the material obtained is characterised by high density, hardness and significant compressive strength. The development of these properties is associated with the intensive compaction of the powder system under the influence of pressure and high heating rates, which are

characteristic of SPS technology; this simultaneously limits grain growth and promotes the formation of a fine-grained structure [9; 10].

No measurable electrical conductivity of the sample was detected within the operating range of the eddy-current conductivity analyzer (<0.5 MS/m). In the context of materials science, this indicates that the material possesses high resistivity. The absence of conductivity is also confirmed by XRD data showing an extremely low content of free carbon (0.3 %), which at higher concentrations could form continuous conductive chains.

Financing information

This research has is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan AP25794423 «Development of methods for processing silicon production waste to obtain innovative composite materials».

Conclusions

This study demonstrated the feasibility of synthesizing high-purity β-SiC from technogenic microsilica generated during silicon production at «Tau-Ken Temir» LLP using spark plasma sintering technology.

The combination of mechanochemical activation and SPS processing at 1800 °C and 50 MPa ensured rapid carbothermal synthesis and the formation of β-SiC with a phase content of 98.2 %.

The synthesized material exhibited a dense nanostructure with an average particle size of 108.4 nm, density of 3.22 g/cm3, hardness of 286 HB, and compressive strength up to 18 kN.

Electrical measurements showed conductivity values below the detection limit of the equipment (<0.5 MS/m), indicating the absence of continuous conductive carbon networks.

The proposed approach demonstrates the potential of SPS technology for efficient recycling of silicon-production waste into high-value ceramic materials with reduced energy consumption compared to conventional furnace-based synthesis methods.

REFERENCES

1 **Kostecki, M., Petrus, M., Płociński, T., Olszyna, A. R.** Spark Plasma Sintering of Variable SiC α/β Ratio with Boron and Carbon Additions - Microstructure Transformation // Ceramics. – 2022. – 5. – P. 1255–1268.

2 **Семейко, К. В., Малиновский, А. И., Гребеньков, А. Ж., Саенко, С. Ю., Лобач, К. В., и др.** Разработки технологий получения карбида кремния (обзор) // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – № 2. – С. 30–41.

3 **Аникин, А. Е., Галевский, Г. В., Руднева, В. В.** Развитие научных и технологических основ применения буроугольного полукокса при синтезе карбида кремния // Глобальная энергия. – 2015. – № 1. – С. 139–147.

4 **Пак, А. Я.** Закономерности и характеристики процессов получения керамических материалов на основе карбидов в условиях воздействия атмосферной электродуговой плазмы: дис. на соис. док. техн. наук. – Томск. – 2022. – 360 с.

5 **Щербакова, В. Б., Гринчук, П. С.** Термодинамическое моделирование формирования карбида кремния в процессе ачесона в нестехиометрических смесях // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – № 2. – Т. 69. – С. 106–113.

6 **Osipov, D. A., Smirnov, I. V., Grinyaev, K. V., Korchagin, M. A., Ditenberg, I. A.** Structural relaxation features of spark plasma sintered Ni3Al samples // AIP Conference Proceedings. – 2021. – P. 77–80.

7 **Srivastav, A.K., Bandi, S., Kumar, A., Murty, B. S.** Microstructure evolution and densification during spark plasma sintering of nanocrystalline W – 5 wt. % Ta alloy // Philosophical Magazine Letters. – 2020. – P. 442–451.

8 **Akhmetova, G., Ulyeva, G., Tuyskhan, K., Volokitina, I.** Application of spark plasma sintering as a method for producing new ceramic materials from silicon production waste // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2024. – 59(3). – P. 605–612.

9 **Mallik, M., Kailath, A. J., Ray, K. K., Mitra, R.** Effect of SiC content on electrical, thermal and ablative properties of pressureless sintered ZrB2-based ultrahigh temperature ceramic composites // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – 37. – P. 559–572.

10 **Feng, L., Fahrenholtz, W. G., Hilmas, G. E.** Low-temperature sintering of single-phase, high-entropy carbide ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2019. – 102(12). – P. 7217–7224.

REFERENCES

1 **Kostecki, M., Petrus, M., Płociński, T., Olszyna, A. R.** Spark Plasma Sintering of Variable SiC α/β Ratio with Boron and Carbon Additions - Microstructure Transformation // Ceramics. – 2022. – 5. – P. 1255–1268.

2 **Semejko, K. V., Malinovskij, A. I., Greben`kov, A. Zh., Saenko, S. Yu., Lobach, K. V., et al.** Razrabotki texnologij polucheniya karbida kremniya (obzor) [Development of technologies for producing silicon carbide (review)] // Vestnik NYaCz RK. – 2021. – № 2. – P. 30–41.

3 **Anikin, A. E., Galevskij, G. V., Rudneva, V. V.** Razvitie nauchny`x i texnologicheskix osnov primeneniya burougol`nogo polukoksa pri sinteze karbida kremniya [Development of scientific and technological foundations for the use of brown coal semi-coke in the synthesis of silicon carbide] // Global`naya e`nergiya. – 2015. – № 1. – P. 139–147.

4 **Pak, A. Ya.** Zakonomernosti i xarakteristiki processov polucheniya keramicheskix materialov na osnove karbidov v usloviyax vozdejstviya atmosfernoj e`lektrodugovoj plazmy` [Patterns and characteristics of the processes of obtaining ceramic materials

based on carbides under the influence of atmospheric electric arc plasma]: dis. na sois. dok. texn. nauk. – Tomsk. – 2022. – 360 p.

5 **Shherbakova, V. B., Grinchuk, P. S.** Termodinamicheskoe modelirovanie formirovaniya karbida kremniya v processe achesona v nestexiometricheskix smesyax [Thermodynamic modeling of silicon carbide formation in the Acheson process in non-stoichiometric mixtures] // Ves. Nacz. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-te`xn. navuk. – 2024. – № 2. – T. 69. – P. 106–113.

6 **Osipov, D. A., Smirnov, I. V., Grinyaev, K. V., Korchagin, M. A., Ditenberg, I. A.** Structural relaxation features of spark plasma sintered Ni3Al samples // AIP Conference Proceedings. – 2021. – P. 77–80.

7 **Srivastav, A.K., Bandi, S., Kumar, A., Murty, B. S.** Microstructure evolution and densification during spark plasma sintering of nanocrystalline W – 5 wt. % Ta alloy // Philosophical Magazine Letters. – 2020. – P. 442–451.

8 **Akhmetova, G., Ulyeva, G., Tuyskhan, K., Volokitina, I.** Application of spark plasma sintering as a method for producing new ceramic materials from silicon production waste // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2024. – 59(3). – P. 605–612.

9 **Mallik, M., Kailath, A. J., Ray, K. K., Mitra, R.** Effect of SiC content on electrical, thermal and ablative properties of pressureless sintered ZrB2-based ultrahigh temperature ceramic composites // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – 37. – P. 559–572.

10 **Feng, L., Fahrenholtz, W. G., Hilmas, G. E.** Low-temperature sintering of single-phase, high-entropy carbide ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2019. – 102(12). – P. 7217–7224.

Received 28.04.26.
Received in revised form 29.04.26.
Accepted for publication 26.05.26.

К. Туысхан[1], Г. Е. Ахметова[2], Г. А. Ульева[3]
[1,2]Қарағанды индустриялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.;
[3]«Qarmet» АҚ, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.
28.04.26 ж. баспаға түсті.
29.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
26.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КРЕМНИЙ КАРБИДІН ҰШҚЫНДЫ ПЛАЗМАЛЫҚ ЖЕНТЕКТЕЛУ ӘДІСІМЕН АЛУ

Мақалада «Tau-Ken Temir» ЖШС кремний өндірісінің техногендік қалдықтары – микросиликаны тиімді қайта өңдеу арқылы кремний карбидін алу мәселесі қарастырылған. Зерттеуде бастапқы компоненттер ретінде жоғары тазалықты микросилика және П804Т маркалы көміртек қолданылды.

Ұнтақ қоспасы WiseMix BML-2 планетарлық диірменінде 200 айн/мин жылдамдықта 24 сағат араластырылып, кейін «Labox 650, Sinter Land» типті ұшқынды плазмалық жентектелу қондырғысында өңделді. Жентектелу 1800 °С температурада, 50 МПа қысымда және 10 минут ұстау режимінде жүргізілді. Зерттеу барысында Thermo-Calc бағдарламалық кешені негізінде жүргізілген термодинамикалық талдау Si-C-O жүйесінде кремний карбидінің түзілуі үшін 1800 °С температураның оңтайлы екенін көрсетті. Сонымен қатар алынған нәтижелер қолданылған технологиялық режимдердің реакция кинетикасын қарқындатуда және фазалық түрленудің толық жүруін қамтамасыз етуде тиімді екенін дәлелдейді. Зерттеу нәтижелері алынған материалдың жоғары тығыздыққа (3,22 г/см3), қаттылыққа (286 HB) және біртекті наноқұрылымға ие екенін көрсетті. Рентгендік фазалық талдау нәтижесінде негізгі фаза ретінде β-SiC (98,2%) анықталды. Микроқұрылымдық зерттеулер бөлшектердің орташа өлшемі 108,4 нм екенін және материалдың кеуексіз, тығыз құрылым түзгенін көрсетті. Электроткізгіштіктің болмауы (<0,5 МСм/м) материалдың жоғары тазалығын дәлелдейді. Алынған нәтижелер ұшқынды плазмалық жентектелу әдісінің металлургиялық қалдықтарды жоғары қосылған құнды материалға айналдыруда тиімді екенін және оның энергия үнемдеу мен өндірісті экологиялық оңтайландыру тұрғысынан перспективалы технология екенін көрсетеді.

Кілтті сөздер: кремний карбиді, микросилика, ұшқынды плазмалық жентектелу, карботермиялық тотықсыздану, металлургиялық қалдықтар, наноқұрылымды материал.

К. Туысхан[1], Г. Е. Ахметова[2], Г. А. Ульева[3]
[1,2]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау;
[3]АО «Qarmet», Республика Казахстан, г. Темиртау.
Поступило в редакцию 28.04.26.
Поступило с исправлениями 29.04.26.
Принято в печать 26.05.26.

ПОЛУЧЕНИЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

В статье рассмотрена проблема получения карбида кремния путем эффективной переработки техногенных отходов кремниевого производства ТОО «Tau-Ken Temir» – микросилики. В качестве исходных компонентов использовались микросилика высокой чистоты и углерод марки П804Т. Порошковую смесь перемешивали в планетарной мельнице WiseMix BML-2 со скоростью 200 об/мин в течение 24 часов, после чего обрабатывали на установке искрового плазменного спекания типа «Labox 650, Sinter Land». Спекание проводилось при температуре 1800 °С, давлении 50 МПа и выдержке 10 минут. Термодинамический анализ, выполненный с использованием программного комплекса Thermo-Calc, показал, что температура 1800 °С является оптимальной для образования карбида кремния в системе Si-

С-О. Кроме того, полученные результаты подтверждают, что выбранные технологические режимы способствуют интенсификации кинетики реакции и обеспечивают полноту протекания фазовых превращений. Результаты исследования показали, что полученный материал обладает высокой плотностью (3,22 г/см3), твердостью (286 HB) и однородной наноструктурой. По данным рентгенофазового анализа основной фазой является β-SiC (98,2 %). Микроструктурные исследования показали, что средний размер частиц составляет 108,4 нм, а материал характеризуется плотной, практически бездефектной структурой без пор. Отсутствие электропроводности (<0,5 МСм/м) свидетельствует о высокой чистоте материала. Полученные результаты демонстрируют эффективность метода искрового плазменного спекания для превращения металлургических отходов в материалы с высокой добавленной стоимостью, а также подтверждают перспективность данной технологии с точки зрения энергосбережения и экологической оптимизации производства.

Ключевые слова: карбид кремния, микросилика, искровое плазменное спекание, карботермическое восстановление, металлургические отходы, наноструктурированный материал.

МРНТИ 53.37.13

https://doi.org/10.48081/BGQF2239

Н. Е. Якушев[1], Н. В. Сизикова[2]

[1,2]Филлиал РГП «НЦ КПМС ПК» «ВНИИцветмет»,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5350-5219
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0423-2613
*e-mail: nikita.yakushev2112@mail.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ДЕГРАДИРОВАННОЙ ОРГАНИЧЕСКОЙ ФАЗЫ ПРИРОДНЫМИ СОРБЕНТАМИ НА ВРЕМЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ

В статье рассмотрена деградация органической фазы в процессе жидкостной экстракции меди по технологии L-SX-EW, а также методы поддержания её технологической эффективности. Показано, что в ходе эксплуатации оксимных экстрагентов происходит накопление продуктов химической деградации и поверхностно-активных соединений, что приводит к ухудшению межфазного разделения, а также образованию устойчивых эмульсий. Проанализированы основные подходы к очистке органической фазы, а именно: применение природных сорбентов, таких, как бентонит и диатомит. Проведены лабораторные эксперименты по обработке органического экстрагента указанными адсорбентами с целью оценки их влияния на состояние органической фазы. Установлено, что использование минеральных адсорбентов может способствовать удалению части загрязнений, образующихся в процессе эксплуатации экстрагента. Бентонит, особенно после кислотной активации, способен обеспечивать заметное снижение содержания загрязняющих компонентов и улучшение состояния органической фазы. В то же время диатомит продемонстрировал сравнительно низкую сорбционную способность и ограниченную эффективность в рассматриваемых условиях. Полученные выводы имеют практическое значение для повышения устойчивости и эффективности работы промышленных установок SX-EW.

Ключевые слова: экстракция, органическая фаза, очистка экстрагента, природные сорбенты, разделение фаз.

Введение

Процессы жидкостной экстракции меди, реализуемые в технологической схеме L-SX-EW (выщелачивание-жидкостная экстракция/реэкстракция-электролиз), широко применяются при переработке окисленных и смешанных руд, благодаря высокой селективности экстрагентов и возможности получения катодной меди высокой чистоты. Эффективность стадии экстракции определяется не только химической селективностью реагентов, но и стабильностью физических свойств органической фазы, обеспечивающих устойчивый массообмен и последующее разделение фаз [1].

В ходе промышленной эксплуатации органическая фаза подвергается неизбежным изменениям. Основным механизмом деградации является химическая деструкция. В исследованиях [2; 3] сказано, что из-за высокой кислотности раствора повышенная концентрация Fe^{3+} в продуктивных растворах выщелачивания может играть роль катализатора, ускоряя разрушение экстрагента. Марганец, перенесенный в контур электролитического осаждения (EW), может начать окисляться до Mn^{7+}, который обладает высокой окислительной активностью и может вызывать деградацию органической фазы. Существенное значение имеет также фотохимическая деградация. При размещении оборудования экстракции/реэкстракции (SX) на открытых площадках воздействие ультрафиолетового излучения приводит к фотоокислительным превращениям оксимов, сопровождающимся образованием поверхностно-активных продуктов распада.

Механическое воздействие в смесителях также ускоряет деградационные процессы. Интенсивное перемешивание увеличивает дисперсность фаз и площадь контакта органической фазы с кислородом воздуха, что способствует дополнительному окислению экстрагента. Одновременно повышается вероятность образования стойких эмульсий и межфазных загрязнений.

Накопление продуктов окисления экстрагента, поверхностно-активных соединений и мелкодисперсных частиц приводит к изменению характеристик системы, снижению коалесценции капель и формированию стабильных эмульсий. В технологическом аспекте это проявляется в увеличении времени разделения фаз и образования межфазного слоя [4; 5; 6], росте потерь органической фазы и снижении производительности отстойников.

Для удаления продуктов окислительной деградации и высокомолекулярных соединений используют адсорбционную очистку на активированных глинах. Одним из перспективных направлений восстановления свойств органической фазы является адсорбционная очистка с использованием природных глинистых минералов.

Бентонит характеризуется слоистой структурой, высокой удельной поверхностью и выраженными адсорбционными свойствами. Его основным активным компонентом является монтмориллонит, кристаллическая решётка которого построена по типу 2:1 и несёт значительный отрицательный заряд, компенсируемый обменными катионами в межслоевом пространстве [7; 8]. Это обуславливает высокую адсорбционную способность бентонитов по отношению к полярным продуктам деградации оксимов.

Его способность к ионному обмену и набуханию в полярной среде обуславливает эффективность связывания окисленных органических соединений. В промышленной практике активированные глины применяются для очистки органических растворителей, масел и экстракционных систем.

Диатомит (кизельгур), представляющий собой осадочную породу кремнистого состава [9], отличается развитой пористой структурой и высокой проницаемостью.

Благодаря сочетанию фильтрующих и адсорбционных свойств [10] диатомит широко используется для удаления тонкодисперсных примесей из жидких сред.

Целью настоящего исследования являлась оценка влияния обработки деградированной органической фазы природными сорбентами на время разделения фаз. Для достижения поставленной цели выполнены лабораторные эксперименты по обработке деградированной органической фазы бентонитом и диатомитом с последующим определением времени разделения фаз, и визуальной оценкой состояния межфазной границы.

Материалы и методы

В качестве оборотной органической фазы использовался экстрагент LIX 984N разбавленный в керосине, концентрация которого составила 10 % об.

Для моделирования эксплуатационной деградации органической фазы было выполнено ее искусственное «состаривание», включавшее 10 циклов «экстракции-реэкстракции». Экстракция осуществлялась при соотношении О:В = 1:1 с интенсивным перемешиванием с применением верхнеприводной механической мешалки (скорость вращения – 1750 об/мин) и одновременной аэрацией в течение 24 часов. После разделения фаз водная фаза удалялась, а органическая направлялась на стадию реэкстракции электролитом с содержанием серной кислоты 180 г/дм^3 при интенсивном перемешивании в течении 5 минут. В ходе каждого цикла дополнительно вводился кварцевый песок (80 % класса -0,071 мм) массой 0,1 грамм для моделирования поступления твердых тонкодисперсных частиц. Установка для искусственной деградации органической фазы представлена на рисунке 1.

В качестве водной фазы использовался промышленный продуктивный раствор выщелачивания, полученный при переработке

Рисунок 1 – Установка для искусственной деградации органической фазы

окисленных медных руд. Состав раствора представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический анализ продуктивного раствора выщелачивания (PLS)

Элемент	Cu	$Fe_{общ}$	Fe^{3+}	Ca	Mg	Al	Si	Mn	H_2SO_4	pH
Содержание, г/дм^3	2,00	2,41	2,41	0,28	11,7	21,0	0,054	1,19	2,3	1,30

Эксперименты проводились при комнатной температуре.

В качестве природных сорбентов использовались порошкообразный бентонит и диатомит. Материалы предварительно высушивались в течение 24 часов в сушильном шкафу, после чего подвергались обработке 15 %-м раствором серной кислоты для удаления возможных минеральных примесей [11].

После кислотной обработки сорбенты промывались водой до достижения pH промывной воды 4-5 и повторно высушивались.

Обработка органической фазы осуществлялась при расходе сорбента – 5% масс. от массы органической фазы. В испытательный сосуд помещалась органическая фаза под механическую мешалку. Перемешивание осуществлялось при скорости 1750 об/мин. Сорбент вводился в течение 5 секунд, после чего перемешивание продолжалось 60 секунд. После завершения обработки органическая фаза немедленно отделялась от сорбента фильтрацией.

Для оценки фазоразделения 350 см3 органической фазы смешивалось с 350 см^3 водной фазы при интенсивном перемешивании в течение 300 секунд

в лабораторном стакане с перегородками объемом 1 дм3. По окончании перемешивания мешалка останавливалась, и с использованием секундомера фиксировалось время, необходимое для формирования визуально четкой границы раздела фаз.

Момент окончания разделения фаз определялся визуально по формированию устойчивой границы между органической и водной фазами.

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментов была проведена сравнительная оценка влияния обработки органической фазы природными сорбентами на характеристики разделения фаз в системе жидкостной экстракции меди. Основным критерием оценки являлось разделение фаз после 300 секунд интенсивного перемешивания.

Для деградированной органической фазы без предварительной обработки время разделения фаз составило 164 секунды. При этом визуально наблюдались образование эмульсионного слоя и нечеткая граница раздела фаз (см. рисунок 2). Подобное поведение характерно для органических систем, содержащих продукты деградации экстрагентов и мелкодисперсные частицы.

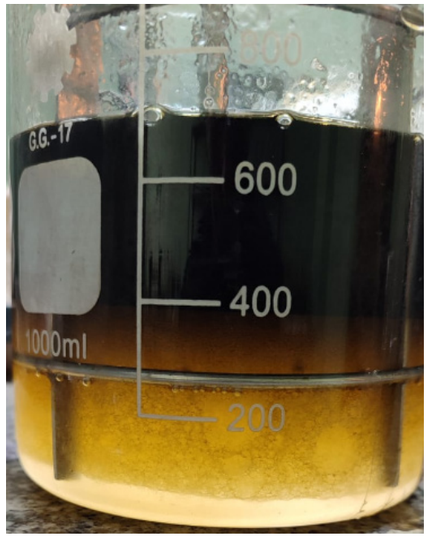


Рисунок 2 – Стабильный эмульсионный слой для деградированной органики

Обработка органической фазы бентонитом оказала наиболее выраженное положительное влияние на характеристики фазоразделения. Время разделения фаз сократилось до 44 секунд, при этом формировалась четкая и стабильная граница раздела органической и водной фаз (см. рисунок 3). Улучшение фазоразделение может быть связано с высокой адсорбционной активностью бентонита. Основным минералом бентонита является монтмориллонит, обладающей развитой удельной поверхностью и высокой катиообменной емкостью. Благодаря этим

свойства бентонит способен эффективно адсорбировать продукты деградации органической фазы.

Рисунок 3 – Граница раздела двух фаз после применения бентонита

В случае обработки органической фазы диатомитом существенного улучшения разделения фаз не наблюдалось. Время разделения фаз составило 130 секунд, кроме того, в водной фазе визуально наблюдались мелкие дисперсные капли органической фазы (см. рисунок 4). Диатомит представляет собой кремнистый осадочный материал, состоящий преимущественно из аморфного кремния и обладающий развитой пористой структурой. Однако в отличие от бентонита его поверхность характеризуется низкой химической активностью.

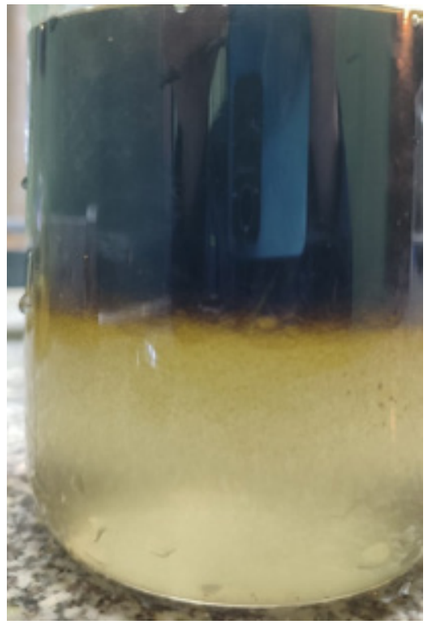


Рисунок 4 – Граница раздела двух фаз после применения диатомита

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что эффективность очистки деградированной органической фазы зависит от природы применяемого сорбента. В исследованных условиях бентонит продемонстрировал значительную высокую эффективность, обеспечивая существенного сокращение времени разделения фаз и формирование четкой межфазной границы. Применение диатомита не привело к значительному улучшению характеристик фазоразделения, что, вероятно, связано с ограниченной адсорбционной способностью данного материала по отношению к продуктам деградации органической фазы [12].

Результаты всех опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов по времени разделения фаз

Объем осветленного слоя, $см^3$	Время, с			
	Свежая органическая фаза	Деградировавшая органика	Обработка бентонитом	Обработка диатомитом
100	12	41	11	35
200	21	90	27	72
300	31	123	38	114
Полное разделение фаз	36	164	44	130

Выводы

Установлено, что деградация органической фазы в системе жидкостной экстракции меди приводит к стабилизации межфазной границы, формированию эмульсионного слоя и увеличению времени фазоразделения до 164 с. Обработка деградированной фазы кислотоактивированным бентонитом при дозировке 5 % масс. существенно восстанавливает разделительные свойства системы: время фазоразделения снижается до 44 с (сокращение на ~70%), эмульсионный слой не образуется, граница раздела фаз становится чёткой. В противоположность этому, применение диатомита в аналогичных условиях не дало значимого эффекта (время разделения составило 130 с), а в водной фазе зафиксирован унос мелкодисперсных органических капель, что указывает на ограниченную адсорбционную активность данного материала по отношению к продуктам деградации.

Таким образом, в рамках проведённого сравнительного исследования кислотоактивированный бентонит продемонстрировал наилучшие результаты в восстановлении фазоразделительных характеристик. Выявленный эффект очистки деградированной фазы активированным бентонитом обосновывает целесообразность дальнейших исследований, направленных на оптимизацию расхода сорбента и оценку экономических показателей процесса регенерации в промышленных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ritcey, G. M.** Solvent Extraction: Principles and Practice / G. M. Ritcey, A. W. Ashbrook. – 2nd ed., rev. and exp. – Amsterdam: Elsevier, 2004. – 646 p.

2 **Sole, K. C.** A holistic approach to organic quality in copper solvent extraction / K. C. Sole, P. M. Cole // Proceedings of Copper 2003. – Santiago, 2003. – Vol. VI. – P. 215 – 235.

3 **Spence, J. R.** Practical Aspects of Copper Solvent Extraction from Acidic Leach Liquors / J. R. Spence // ALTA 2008 Copper Conference. – Perth, Australia, 2008. – P. 1 – 15.

4 **Wang, C.** Crud formation and its control in solvent extraction // Proceedings of the International Solvent Extraction Conference 2005 (ISEC 2005). – Beijing, China, 2005.

5 **Liu, J. S.** Mechanism of crud formation in copper solvent extraction / J. S. Liu, Z. Y. Lan, G. Z. Qiu // Journal of Central South University of Technology. – 2002. – Vol. 9. – P. 169 – 172.

6 **Чепуштанова, Т. А.** Исследование процесса экстракции основных компонентов продуктивного раствора (меди, железа и кремнезема) месторождения Алмалы / Т. А. Чепуштанова [и др.] // Труды Университета. – 2023. – № 1. – С. 23–29. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_1_23.

7 **Al-Asheh, S. M. R.** Adsorption of Pollutants from Aqueous Solutions Using Activated and Non-Activated Oak Shells: Parametric and Fractional Factorial Design Study. Part I. Removal of Copper / S. M. R. Al-Asheh, F. Banat, N. Al-Hamed // Adsorption Science and Technology. – 2003. – Vol. 21. – P. 177 – 188. – https://doi.org/10.1260/026361703769013907.

8 **Murray, H. H.** Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview / H. H. Murray // Applied Clay Science. – 2000. – Vol. 17, № 5-6. – P. 207 – 221. – https://doi.org/10.1016/s0169-1317(00)00016-8.

9 **Reguig, A. A.** Effect of Diatomaceous earth filler and Reversible Crosslinking Reaction Agent (RXR) on High-Density Polyethylene (HDPE) and Isotactic Polybutene (PB-1): thesis ... Doctor of Philosophy (Polymer Engineering) / A. A. Reguig ; Ferhat Abbas University Setif 1. – Setif, 2024. – 180 p.

10 **Убаськина, Ю. А.** Исследование возможности практического применения диатомита для очистки сточных вод / Ю. А. Убаськина, Ю. А. Коростелева // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 7. – С. 92 – 96.

11 **Komadel, P.** Acid activated clays: Materials in continuous demand // Applied Clay Science. – 2016. – Vol. 131. – P. 84 – 99. – https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.05.001

12 **Убаськина, Ю. А.** Исследование адсорбционной способности диатомита / Ю. А. Убаськина, Е. Г. Фетюхина, Ю. А. Коростелева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 4. – С. 112 – 119.

REFERENCES

1 **Ritcey, G. M.** Solvent Extraction: Principles and Practice / G. M. Ritcey, A. W. Ashbrook. – 2nd ed., rev. and exp. – Amsterdam: Elsevier, 2004. – 646 p.

2 **Sole, K. C.** A holistic approach to organic quality in copper solvent extraction / K. C. Sole, P. M. Cole // Proceedings of Copper 2003. – Santiago, 2003. – Vol. VI. – P. 215 – 235.

3 **Spence, J. R.** Practical Aspects of Copper Solvent Extraction from Acidic Leach Liquors / J. R. Spence // ALTA 2008 Copper Conference. – Perth, Australia, 2008. – P. 1 – 15.

4 **Wang, C.** Crud formation and its control in solvent extraction // Proceedings of the International Solvent Extraction Conference 2005 (ISEC 2005). – Beijing, China, 2005.

5 **Liu, J. S.** Mechanism of crud formation in copper solvent extraction / J. S. Liu, Z. Y. Lan, G. Z. Qiu // Journal of Central South University of Technology. – 2002. – Vol. 9. – P. 169 – 172.

6 **Chepushtanova, T. A., et al.** Issledovanie protsessa ekstraktsii osnovnykh komponentov produktivnogo rastvora (medi, zheleza i kremnezema) mestorozhdeniya Almaly [Study of the process of extraction of the main components of the pregnant solution (copper, iron and silica) of the Almaly deposit]. Trudy Universiteta [University Proceedings]. – 2023. – № 1. – P. 23–29. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_1_23.

7 **Al-Asheh, S. M. R.** Adsorption of Pollutants from Aqueous Solutions Using Activated and Non-Activated Oak Shells: Parametric and Fractional Factorial Design Study. Part I. Removal of Copper / S. M. R. Al-Asheh, F. Banat, N. Al-Hamed // Adsorption Science and Technology. – 2003. – Vol. 21. – P. 177 – 188. – https://doi.org/10.1260/026361703769013907.

8 **Murray, H. H.** Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview / H. H. Murray // Applied Clay Science. – 2000. – Vol. 17, № 5-6. – P. 207 – 221. – https://doi.org/10.1016/s0169-1317(00)00016-8.

9 **Reguig, A. A.** Effect of Diatomaceous earth filler and Reversible Crosslinking Reaction Agent (RXR) on High-Density Polyethylene (HDPE) and Isotactic Polybutene (PB-1): thesis ... Doctor of Philosophy (Polymer Engineering) / A. A. Reguig ; Ferhat Abbas University Setif 1. – Setif, 2024. – 180 p.

10 **Ubaskina, Yu. A., & Korosteleva, Yu. A.** Issledovanie vozmozhnosti prakticheskogo primeneniya diatomita dlya ochistki stochnykh vod [Study of the possibility of practical application of diatomite for wastewater treatment]. Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]. – 2017. – № 7. – P. 92–96.

11 **Komadel, P.** Acid activated clays: Materials in continuous demand // Applied Clay Science. – 2016. – Vol. 131. – P. 84 – 99. – https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.05.001

12 **Ubaskina, Yu. A., Fetyukhina, E. G., & Korosteleva, Yu. A.** Issledovanie adsorbtsionnoy sposobnosti diatomita [Study of the adsorption capacity of diatomite]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. – 2016. – № 4. – P. 112–119.

Поступило в редакцию 09.04.26.
Поступило с исправлениями 22.04.26.
Принято в печать 20.05.26.

***Н. Е. Якушев[1], Н. В. Сизикова[2]**
[1,2]«ҚР МШКҚӨ ҰО» РМК «ВНИИцветмет» филиалы,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
09.04.26 ж. баспаға түсті.
22.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТАБИҒИ СОРБЕНТТЕРМЕН ДЕГРАДАЦИЯЛАНҒАН ОРГАНИКАЛЫҚ ФАЗАНЫ ӨҢДЕУДІҢ ФАЗАНЫ БӨЛУ УАҚЫТЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Мақалада L-SX-EW технологиясы бойынша мысты сұйық экстракциялау процесінде органикалық фазаның деградациясы, сондай-ақ оның технологиялық тиімділігін сақтау әдістері қарастырылған. Оксим экстрагенттерін пайдалану кезінде химиялық деградация өнімдері мен беттік белсенді қосылыстардың жинақталуы байқалады, бұл фазааралық бөлінудің нашарлауына, сондай-ақ тұрақты эмульсиялардың пайда болуына әкеп соғады. Органикалық фазаны тазартудың негізгі тәсілдері талданды, атап айтқанда: бентонит және диатомит сияқты табиғи сорбенттерді қолдану. Органикалық фазаның жай-күйіне әсерін бағалау мақсатында көрсетілген адсорбенттермен органикалық экстрагентті өңдеу бойынша зертханалық эксперименттер жүргізілді. Минералды адсорбенттерді қолдану экстрагентті пайдалану кезінде пайда болатын ластаушы заттардың бір бөлігін жоюға ықпал ететіні анықталды. Бентонит, әсіресе қышқылды белсендірілгеннен кейін, ластаушы компоненттердің айтарлықтай төмендеуін және органикалық фазаның жақсаруын қамтамасыз ете алады. Бірақ, диатомит қарастырылып отырған жағдайларда салыстырмалы түрде төмен сорбциялық қабілетін және шектеулі тиімділігін көрсетті. Алынған тұжырымдар SX-EW өнеркәсіптік қондырғыларының тұрақтылығы мен тиімділігін арттыру үшін практикалық маңызды.

Кілтті сөздер: экстракция, органикалық фаза, экстрагентті тазарту, табиғи сорбенттер, фазалық бөліну.

***N. E. Yakushev[1], N. V. Sizikova[2]**
[1,2]Branch of the RSE «NC CPMR RK» «VNIITSVETMET»,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 09.04.26.
Received in revised form 22.04.25.
Accepted for publication 20.05.26.

ASSESSING THE EFFECT OF NATURAL SORBENTS ON THE PHASE SEPARATION TIME OF DEGRADED ORGANIC PHASES

The article examines the degradation of the organic phase during the solvent extraction of copper using L-SX-EW technology, as well as methods for maintaining its process efficiency. It is shown that the operation of oxime extractants leads to the accumulation of chemical degradation products and surfactants, resulting in poor phase separation and the formation of stable emulsions (crud). The study analyzes primary approaches to organic phase treatment, specifically the use of natural sorbents such as bentonite and diatomite. Laboratory experiments were conducted to treat the organic extractant with these adsorbents to evaluate their impact on the state of the organic phase. It was established that the use of mineral adsorbents can facilitate the removal of some contaminants generated during extractant operation. Bentonite, particularly after acid activation, was found to provide a significant reduction in the content of contaminants and improve the condition of the organic phase. Meanwhile, diatomite demonstrated relatively low sorption capacity and limited efficiency under the studied conditions. The findings are of practical importance for increasing the stability and operational efficiency of industrial SX-EW plants.

Keywords: solvent extraction, organic phase, extractant purification, natural sorbents, phase separation.

КӨЛІК

ҒТАМР 73.41.19

https://doi.org/10.48081/BGQF2240

О. Т. Балабаев[1], Б. Ш. Аскаров[2], А. Д. Қасымжанова[3], Ш. М. Суюнбаев[4], *С. Ж. Косбармаков[5]

[1,2,3,5]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;

[4]Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

*e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz

БОЛАТ ТРОСТАРДЫҢ ОРНАЛАСУЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ АРҚЫЛЫ РЕЗЕҢКЕТРОСТЫ КОНВЕЙЕР ТАСПАЛАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл мақалада тау-кен өндіру өнеркәсібінде қолданылатын резеңкетросты конвейер таспаларының тиімділігін арттыру мәселелері қарастырылған. Конвейер таспаларының беріктігіне, тозуға төзімділігі мен беріктігіне әсер ететін конструкциясының ерекшеліктері мен пайдалану жағдайларына зерттеу жүргізілді. Ә. Сағынов атындағы ҚарТУ «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасында әзірленген таспаның ені бойынша орналасуын рационализациялауға негізделген конвейер таспаларының көлденең қималарындағы максималды деформацияларды туралау тәсілі ұсынылған. Әдістеме жүктің көлденең қимасын өзіне тән бөліктерге бөлуді, Журавский теоремасын қолдана отырып жүктемелерді анықтауды және иілулерді есептеу үшін иілгіш жіп теориясының принциптерін қолдануды қамтиды. Ұсынылған шешім таспаның иілуге тең қедергі балқасының жұмыс режиміне өтуін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді, бұл біркелкі иілу мен ені бойынша тозуға ықпал етеді. Есептеу нәтижелері көрсеткендей, бұл әдісті қолдану таспадағы тростар санын азайтуға мүмкіндік береді (мысалы, ені 1200 мм-де 80-нен 44-ке дейін), таспаның массасы мен құнын төмендетеді, конвейер жетегінің энергия сыйымдылығын 1,5 есе азайтады, сонымен қатар қозғалыс кедергісі мен шаң шығаруды азайтады. Ұсынылған теориялық нәтижелердің практикалық маңызы бар және оларды таспалы конвейерлерді жобалау мен жаңартуда қолдануға болады.

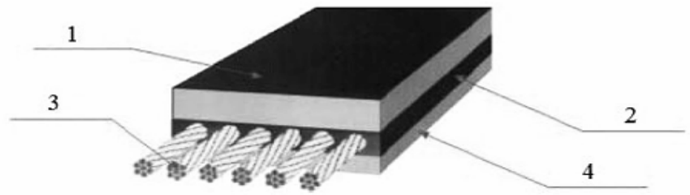
Кілтті сөздер: өнеркәсіптік көлік, таспалы конвейер, конвейер таспасы, резеңкетросты таспа, таспаның көлденең қимасы, болат тростар, тростардың орналасуын оңтайландыру.

Кіріспе

Конвейер таспалары тау-кен өнеркәсібіндегі көлік жүйелерінің негізгі элементі болып табылады, тау-кен массасын, кенді, көмірді және басқа материалдарды айтарлықтай қашықтыққа үздіксіз және тиімді жеткізуді қамтамасыз етеді. Карьерлер мен ашық өзірлемелер жағдайында конвейер таспаларына жұмыстың беріктігі, тозуға төзімділігі және сенімділігі бойынша жоғары талаптар қойылады. Конвейер таспасының түрін таңдау көптеген факторларға байланысты, соның ішінде тасымалдау ұзындығы, қозғалатын материалдың сипаты, жолдың көлбеу бұрышы, температураның жұмыс жағдайлары және қажетті өнімділік. Өндірістің заманауи технологиялары нақты жұмыс жағдайларына оңтайландырылған таспалардың мамандандырылған түрлерін жасауға мүмкіндік береді.

Резеңкетросты конвейер таспасы бірнеше негізгі элементтерден тұрады. аспаның өзегі коррозиядан қорғау үшін мырышталған немесе жезден жасалған болаттан жасалған диаметрі 3-тен 6 миллиметрге дейінгі болат тростардан тұрады. Тростар арасындағы қашықтық таспаның қажетті беріктігіне байланысты 10-нан 20 миллиметрге дейін [1].

Резеңке қаптамалалар металл жақтауды тасымалданатын материалдың әсерінен қорғайды және жетек барабандарына қажетті іліністі қамтамасыз етеді. Жұмыс қаптамасының қалыңдығы 6-дан 25 миллиметрге дейін, жұмыс істемейтін – 3-тен 8 миллиметрге дейін (сурет 1). Бойлық кесулерден қосымша қорғау үшін трос өзегі мен резеңке қаптамалар арасында орналасқан матадан жасалған брекер төсемдері қолданылады [2].



1-сурет – Стандартты конструкциядағы резеңкетросты конвейер таспасы:
1 – жоғарғы (жұмыс) резеңке қаптама; 2 – резеңке жақтау;
3 – болат тростар; 4 – төменгі (жұмыс істемейтін) резеңке қаптама

2014 жылы Ә. Сағынов атындағы ҚарТУ «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасында бастамашыл тақырып аясында конвейер таспаларының көлденең қималарындағы максималды деформацияларды теңестіру әдісі әзірленді [3]. Конвейер таспаларының көлденең қималарындағы максималды деформацияларды

туралаудың әзірленген әдісі өнеркәсіптік конвейер көлігіне арналған жабдыққа, атап айтқанда конвейер таспаларына жатады және оларды өндіруде қолдануға болады.

Конвейер таспаларының көлденең қималарындағы максималды деформацияларды туралаудың әзіленген әдісі келесі кезеңдерден тұрады:

1 Таспалы конвейер жұмыс істеген кезде бүйірлік роликтердің көлбеу бұрыштары 38о (қозғалыстағы материалдың көлбеу бұрышына ρ тең), дұрыс эллипс түрінде қалыптасады, лентадағы жүк массасының параметрлерін есептеуді оңтайландыру және жеңілдету үшін ауданы бойынша төрт тең секторға бөлу қажет.

2 Әр сектордың аудандары кванттық – экстремалды таралу заңдылығына сәйкес х осі бойынша алты сипаттамалық бөлімге Δ=l/6, ал у осі бойынша кездейсоқ шама мәндерінің пайда болу ықтималдығы кванттарының шамасына бөлінеді.

3 Д. И. Журавский теоремасын қолдана отырып, өзіне тән учаскелердің аудандарын және оларда жұмыс істейтін жүктемелерді анықтау жүзеге асырылады. Есептеулер көрсеткендей, жүктеменің негізгі бөлігі орташа роликтің үстіндегі таспада – 75 %-тен жоғары.

4 Таспадағы жүктемеден әсер ететін жүктемені анықтау нәтижелері бойынша таспадағы күш элементтерінің (мата төсемдерінің немесе тростардың) саны анықталады. Бұл конвейер таспаларының көлденең қимасын иілуге тең кедергі балкасығын жұмыс режиміне ауыстыратын күш элементтерінің санының дискретті өзгеруімен жасалады, резеңке таспаларда тростар арасындағы қадамды өзгерту арқылы қол жеткізіледі [3, 4, 197–200-бб.].

Осылайша, әзірленген әдіс конвейер таспаларының көлденең қималарындағы максималды деформацияларды тиімді теңестіруге мүмкіндік береді. Ені 1200 мм таспалар мысалында тексерілген есептеулер резеңке таспаларда жасалған әдісті қолданған кезде тростар саны 80-нен 44-ке дейін азаятынын көрсетті. Тиісінше, конвейер таспаларының массасы мен құны төмендейді, таспалы конвейердің энергия сыйымдылығы орта есеппен 1,5 есе төмендейді. Таспалардың деформациясының әсерінен жүктің қозғалысы жоғалады, қозғалысқа төзімділік 1,4–1,7 есе азаяды, нәтижесінде конвейер трассасында шаң бөлінуі орта есеппен 1,25 есе азаяды.

Материалдар мен әдістері

Таспалы конвейердегі жүктің көлденең қимасының геометриялық пішіні – бұл жоғарғы контурын белгілі бір болжаммен санауға болатын фигура тең қабырғалы үшбұрыш негізге іргелес бұрыштары бар – тасымалданатын жүктің табиғи көлбеуінің бұрыштары. Бұл пішіннің төменгі контуры ойық тіректің, таспалы конвейердің параметрлері мен конструкцияларымен анықталады. Есептің нүктесі ретінде орталық тіректің ортасын көлденеңінен «х» қашықтыққа қабылдай отырып, бізде «h=f(x)» белгілі бір функциясымен көрсетілген «h» жүктемесінің әр түрлі биіктігі болады [5, 58–60-бб.]. Стандартты конвейер таспасын ескере отырып, яғни – таспаның ені бойынша тростардың бірдей орналасу қадамымен

және таспаның ені бойынша жүктің ауыспалы биіктігімен таспаның әр тросына «q» сызықтық жүктемесі әр түрлі болады. Конвейер таспасын белгілі бір болжамдармен иілгіш жіп ретінде қарастыруға болатындығын ескере отырып [6, 7–10-бб], конвейер таспасының бір тросы бар бөлігін және оның роликті тіректер арасында орналасқан таспаның енінің бір бөлігін қарастырыңыз.

Иілгіш жіпті есептеу теориясына сәйкес, жіптің бүгілуі және оның керілуі арақатынаспен байланысты [7, 201–204-бб.]:

$$f = \frac{ql^2}{8H} \quad (1)$$

мұндағы q – сызықтық жүктеме, кг/м^2;

l – роликті тіректер арасындағы қашықтық;

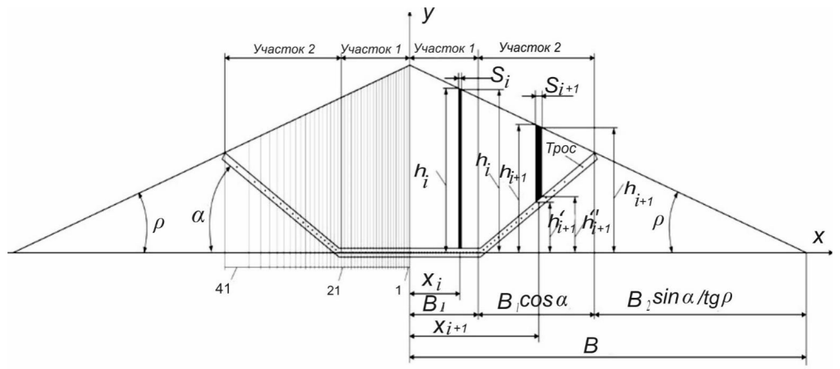
Н – керілудің көлденең құраушысы.

Формуладағы (1) «q» жүктемесі бір тростан тұратын таспаның әрбір таңдалған бөлігі үшін әр түрлі болатынын ескерсек, әр учаскедегі ауытқу мөлшері әр түрлі болады. Роликті тіректер арасындағы иілу мен арақашықтық белгілі бір геометриялық қатынасқа ие болғандықтан, «β» бұрышы да – роликті тірекке түсетін таспаның бөлігіне тангенс арасындағы бұрыш әр түрлі болады. Әлбетте, «β» бұрышы неғұрлым үлкен болса, таспаға тікелей әсер ететін құбылыстар соғұрлым қарқынды көрінеді: роликті тірекке жүгірген кезде жүк бөліктерінің соққысы; таспаға қатысты жүктің бір бөлігінің сырғып кетуі.

Бұл әсерлердің деңгейі негізінен таспаның тозу қарқындылығын анықтайды. Көп жағдайда таспа орталық бөліктегі жұмыс тығыздағышының тозуы үшін жарамсыз деп танылатыны белгілі. Осылайша, таспаның ені бойынша бір троска түсетін таспа бөліктерінің иілу теңдігін қамтамасыз ете отырып, таспаның бүкіл ені бойынша біркелкі тозуына қол жеткізуге болады және осылайша оның қызмет ету мерзімін ұзартуға болады.

Нәтижелер және талқылау

Резеңке қаптамалалар металл жақтауды тасымалданатын материалдың әсерінен қорғайды және жетек барабандарына қажетті іліністі қамтамасыз етеді. Жұмыс қаптамасының қалыңдығы 6-дан 25 миллиметрге дейін, жұмыс істемейтін – 3-тен 8 миллиметрге дейін (сурет 1). Бойлық кесулерден қосымша қорғау үшін трос өзегі мен резеңке қаптамалар арасында орналасқан матадан жасалған брекер төсемдері қолданылады.



2-сурет – Көлденең қима аудандарын анықтауға арналған есептеу схемасы

Конвейердің резеңкетросты таспасының ені бойынша тростардың орналасуын оңтайландырудың математикалық модельдеуін қарастырайық [8, 221–223-бб.]. Таспа учаскелерінің иілу теңдігін келесідей жазуға болады:

$$\begin{cases} f_1 = f_2 \\ \text{.....} \\ f_i = f_{i+1} \\ \text{-----} \\ f_{n-1} = f_n \end{cases} \quad (2)$$

(1)-ді (2)-ге қойып, айқын қысқартулар жасай отырып, сонымен қатар, бір троcқа келетін таспа бөліктерінің көлденең проекцияларының қосындысы таспа енінің көлденең проекциясына тең болуы керек екенін ескере отырып, біз келесі теңдеулер жүйесін аламыз [9, 197–200-бб.]:

$$\begin{cases} q_1 = q_2 \\ \text{.....} \\ q_i = q_{i+1} \\ \text{.....}, \\ q_{n-1} = q_n \\ \sum_{i=1}^{n} S_i = B' \end{cases} \quad (3)$$

мұндағы q_i – өз салмағынан сызықтық жүктеме таспа және «i» троcқа түсетін жүк;

S_i – бір троcқа келетін таспа учаскесінің ені;

B' – таспаның енінің көлденең проекциясы;

n – таспадағы тростар саны.

Таспаның көлденең қимасы симметриялы болғандықтан, біз таспаның көлденең қимасының жартысын қарастырамыз және сәйкесінше «B'» және «n» параметрлерін қарастырамыз – таспаның енінің көлденең проекциясының жартысы және таспадағы тростардың жартысы.

Бір троcқа келетін таспа учаскесіне жалпы сызықтық жүктеме ретінде анықталады [10, 14–16-бб.]:

$$q_i = q_i^{гр} + q_i^{л} \quad (4)$$

мұндағы $q_i^{гр}$ – жүктің салмағынан сызықтық жүктеме;

$q_i^{л}$ – қатынастармен анықталатын таспадан сызықтық жүктеме:

$$q_i^{гр} = \gamma \cdot F_i \quad (5)$$

$$q_i^{л} = \rho_л \cdot S_i \quad (6)$$

мұндағы γ – жүк тығыздығы т/м^3;

$\rho_л$ – таспаның меншікті салмағы кг/м^2;

F_i – таспа ені учаскесінің үстіндегі жүктің көлденең қимасының бір троcқа келетін ауданы.

F_i анықтау үшін таспаның көлденең қимасының жартысының есептік сұлбасын қарастырамыз.

Есептік сұлбадан бір троcқа келетін таспа учаскесінің көлденең қимасының ауданы трапеция ауданы ретінде анықталатыны көрінеді:

$$F_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \cdot S_i \quad (7)$$

Қорытынды

Жетілдірілген резеңкетрос таспасының рационалды конструктивтік параметрлерін дәлірек анықтау үшін ANSYS бағдарламалық ортасында цифрлық модель жасап, егжей-тегжейлі зерттеулер жүргізу қажет, бұл әзірлеменің жұмыс қабілеттілігін талдауға мүмкіндік береді. Көрсетілген теориялық зерттеулердің нәтижелері практикалық мәнге ие болып, таспалы конвейерлердің жұмысын жетілдіру саласында зерттеумен айналысатын ғылыми және инженерлік-техникалық мамандар үшін қызықты болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Ресми сайт Inner.su. Типы конвейерных лент для карьеров: резинотросовые, тканевые, шевронные и с бортами. – [Электрондық ресурс]. – https://inner.su/

articles/tipy-konveyernykh-lent-dlya-karerov-rezinotrosovye-tkanevye-shevronnye-i-s-bortami/#steel-cord (Жүгінген күні 02.01.2026)

2 Ресми сайт Krti.ru. Каталог лент ОАО «Курскрезинотехника». – [Электрондық ресурс]. – http://www.krti.ru (Жүгінген күні 17.01.2026)

3 **Акашев, З. Т., Акашев, А. З., Балабаев, О. Т., Косбармаков, С. Ж.** Способ выравнивания максимальных деформаций в поперечных сечениях конвейерных лент // Инновационный патент на изобретение. – KZ No 30895; Опубл. 18.01.2016 г.

4 **Акашев, З. Т., Акашев, А. З., Балабаев, О. Т., Косбармаков, С. Ж.** Разработка способа выравнивания максимальных деформаций в поперечных сечениях конвейерных лент // Журнал «Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований» (Российская Федерация – РИНЦ 0,764) – 2017. – №5. – С. 197–200.

5 **Акашев, З. Т.** Поиск и реализация наукоемких продукций в промышленности и транспорте: монография / Акашев, З. Т., Малыбаев, С. К., Акашев, А. З. [Текст]. – М. : Изд-во КарГТУ, 2006. – С. 58–60.

6 **Паранин, А. В., Ефимов, А. В.** Механика гибкой нити в задачах электроэнергетики. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. – С. 7–10.

7 **Фесик, С. П.** Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Изд-во «Будівельник», 1982. – С. 201–204.

8 **Балабаев, О. Т., Рожков, А. В., Аскаров, Б. Ш., Акашев, А. З., Косбармаков, С. Ж.** Конвейердің резеңке-трос таспасының ені бойынша тростардың орналасуын оңтайландыруды математикалық модельдеу // Университет еңбектері – 2023. – №1. – Б. 221–223. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_1_221

9 **Акашев, З. Т., Акашев, А. З., Балабаев, О. Т., Косбармаков, С. Ж.** Разработка способа выравнивания максимальных деформаций в поперечных сечениях конвейерных лент // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований (Российская Федерация – РИНЦ 0,764) – 2017. – №5 (часть 2). – С. 197–200.

10 **Бельмас, И. В.** Научные основы теории и расчета резинотросовой ленты конвейера с учетом его пространственной формы : дис. доктора технических наук : 05.05.06 [Текст] – Днепропетровск, 1993. – С. 14–16.

REFERENCES

1 Resmi sajt Inner.su. Tipy` konvejerny`x lent dlya kar`erov: rezinotrosovy`e, tkanevy`e, shevronny`e i s bortami [Types of conveyor belts for quarries: rubber-rope, fabric, chevron and with sides]. – [Electronic resource]. – https://inner.su/articles/tipy-konveyernykh-lent-dlya-karerov-rezinotrosovye-tkanevye-shevronnye-i-s-bortami/#steel-cord (Date of access 02.01.2026)

2 Resmi sajt Krti.ru. Katalog lent OAO «Kurskrezinotexnika» [Catalogue of tapes of JSC «Kurskrezinotekhnika»]. – [Electronic resource]. – http://www.krti.ru (Date of access 17.01.2026)

3 **Akashev, Z. T., Akashev, A. Z., Balabaev, O. T., Kosbarmakov, S. Zh.** Sposob vy`ravnivaniya maksimal`ny`x deformacij v poperechny`x secheniyax konvejerny`x lent [Method for equalizing maximum deformations in the cross sections of conveyor belts] // Innovative patent for invention. – KZ № 30895; Publ. 18.01.2016.

4 **Akashev, Z. T., Akashev, A. Z., Balabaev, O. T., Kosbarmakov, S. Zh.** Razrabotka sposoba vy`ravnivaniya maksimal`ny`x deformacij v poperechny`x secheniyax konvejerny`x lent [Development of a method for leveling maximum deformations in the cross-sections of conveyor belts] // Journal «International Journal of Applied and Fundamental Research» (Russian Federation – RSCI 0.764) – 2017. – №5. – P. 197–200.

5 **Akashev, Z. T.** Poisk i realizaciya naukoemkix produkcij v promy`shlennosti i transporte: monografiya [Search and implementation of high-tech products in industry and transport: a monograph] / Akashev, Z. T., Maly`baev, S. K., Akashev, A. Z. [Text]. – M. : Publishing house of KarSTU, 2006. – P. 58–60.

6 **Paranin, A. V., Efimov, A. V.** Mexanika gibkoj niti v zadachax e`lektroe`nergetiki [Flexible filament mechanics in electric power engineering]. – Ekaterinburg: Publishing House of Ural State Transport University, 2013. – P. 7–10.

7 **Fesik, S. P.** Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Handbook of Strength of Materials]. – Kyiv: Budivelnik Publishing House, 1982. – P. 201–204.

8 **Balabaev, O. T., Rozhkov, A. V., Askarov, B. Sh., Akashev, A. Z., Kosbarmakov, S. Zh.** Konvejerdің rezeңke-tros taspasy`ny`ң eni boj y`nsha trostardy`ң ornalasuy`n oңtajlandy`rudy` matematikaly`қ model`deu [Mathematical modeling of optimization of the location of cables along the width of the rubber-cable conveyor belt] // University papers – 2023. – №1. – P. 221–223. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_1_221

9 **Akashev, Z. T., Akashev, A. Z., Balabaev, O. T., Kosbarmakov, S. Zh.** Razrabotka sposoba vy`ravnivaniya maksimal`ny`x deformacij v poperechny`x secheniyax konvejerny`x lent [Development of a method for leveling maximum deformations in the cross-sections of conveyor belts] // International Journal of Applied and Fundamental Research (Russian Federation – RSCI 0.764) – 2017. – № 5 (part 2). – P. 197-200.

10 **Bel`mas, I. V.** Nauchny`e osnovy` teorii i rascheta rezinotrosovoj lenty` konvejera s uchetom ego prostranstvennoj formy` : dis. doktora texnicheskix nauk [Scientific foundations of the theory and calculation of a rubber-rope conveyor belt taking into account its spatial shape: diss. of Doctor of Technical Sciences] : 05.05.06 [Text] – Dnepropetrovsk, 1993. – P. 14–16.

07.04.26 ж. баспаға түсті.
07.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
05.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

О. Т. Балабаев[1], Б. Ш. Аскаров[2], А. Д. Қасымжанова[3],
Ш. М. Суюнбаев[4], *С. Ж. Косбармаков[5]
[1,2,3,5]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[4]Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент.
Поступило в редакцию 07.04.26.
Поступило с исправлениями 07.04.26.
Принято в печать 05.05.26.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗИНОТРОСОВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ТРОСОВ

В данной статье рассмотрены вопросы повышения эффективности функционирования резинотросовых конвейерных лент, применяемых в горнодобывающей промышленности. Проведен исследование особенностей конструкции и условий эксплуатации конвейерных лент, влияющих на их прочность, износостойкость и долговечность. Представлен разработанный на кафедре «Промышленный транспорт» КарТУ им. А. Сагинова подход выравнивания максимальных деформаций в поперечных сечениях конвейерных лент, основанный на рационализации расположения стальных тросов по ширине ленты. Методика включает разделение поперечного сечения груза на характерные участки, определение нагрузок с использованием теоремы Журавского и использование принципов теории гибкой нити для расчёта прогибов. Предложенное решение позволяет обеспечить переход ленты в режим работы балки равного сопротивления изгибу, что способствует равномерности прогибов и износа по ширине. Результаты расчётов показали, что использование данного способа позволяет уменьшить количество тросов в ленте (например, с 80 до 44 при ширине 1200 мм), снизить массу и стоимость ленты, уменьшить энергоёмкость привода конвейера в 1,5 раза, а также сократить сопротивление движению и пылевыделение. Представленные теоретические результаты имеют практическую значимость и могут быть использованы при проектировании и модернизации ленточных конвейеров.

Ключевые слова: промышленный транспорт, ленточный конвейер, конвейерная лента, резинотросовая лента, поперечное сечение ленты, стальные тросы, оптимизация расположения тросов.

O. T. Balabayev[1], B. Sh. Askarov[2], A. D. Kassymzhanova[3],
Sh. M. Suyunbaev[4], *S. Zh. Kosbarmakov[5]
[1,2,3,5]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[4]Tashkent State Transport University, Republic of Uzbekistan, Tashkent.
Received 07.04.26.
Received in revised form 07.04.25.
Accepted for publication 05.05.26.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF RUBBER-TROUS CONVEYOR BELTS BY OPTIMIZING THE ARRANGEMENT OF STEEL CABLES

This article discusses the issues of improving the efficiency of rubber-rope conveyor belts used in the mining industry. It also examines the design features and operating conditions of conveyor belts that affect their strength, durability, and wear resistance. The approach of alignment of maximum deformations in the cross-sections of conveyor belts, based on the rationalization of the arrangement of steel cables along the width of the belt, developed at the Department of Industrial Transport of the A. Saginov KarTU, is presented. The technique includes the division of the cross-section of the load into characteristic sections, the determination of loads using the Zhuravsky theorem, and the use of the principles of the theory of a flexible thread for calculating deflections. The proposed solution allows the belt to transition to a mode of equal bending resistance, which contributes to uniform deflections and wear across the width. The calculation results show that using this method can reduce the number of cables in the belt (for example, from 80 to 44 for a 1200 mm wide belt), reduce the weight and cost of the belt, reduce the energy consumption of the conveyor drive by 1.5 times, and reduce resistance to movement and dust generation. These theoretical results have practical significance and can be used in the design and modernization of belt conveyors.

Keywords: industrial transport, belt conveyor, conveyor belt, rubber-rope belt, belt cross-section, steel cables, cable arrangement optimization.

МРНТИ 55.42.09, 73.31.09

https://doi.org/10.48081/BGQF2241

Д. Ж. Евфратов[1], *Н. К. Булатов[2], О. Ш. Оразов[3]

[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;

[2,3]Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова, Республика Казахстан, г. Кокшетау.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1185-9258

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9327-6940

*e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕРМОСТОЙКИМИ И ИЗНОСОСТОЙКИМИ СВОЙСТВАМИ

В статье рассматривается применение термостойких и износостойких материалов для деталей двигателя внутреннего сгорания гибридного автомобиля. В таких двигателях ресурс детали зависит не только от запаса прочности. На практике одновременно проявляются трение, нагрев, изменение зазоров, качество поверхности и частые переходы между режимами работы. Поэтому в работе внимание уделено не одному показателю, а нескольким параметрам, которые ближе к реальной эксплуатации: коэффициенту трения, температурной стойкости, деформации при нагреве и оценочному ресурсу.

Для сравнения выбраны сталь 40Х, титановые сплавы, керамика Al_2O_3 и покрытия Ni–SiC. Сталь 40Х использована как базовый вариант, от которого удобно вести сопоставление. Титановые сплавы рассмотрены с позиции снижения массы деталей, керамика - как материал для участков с высокой температурой, а покрытия Ni–SiC - как защитный слой для поверхностей трения. В работе использованы опубликованные данные, и их простые расчётные зависимости и моделирование в ANSYS и SolidWorks. Полученные результаты показывают, что наибольший интерес представляет не полная замена традиционных материалов, а их выборочное применение по зонам нагрузки. При таком подходе расчётный прирост ресурса деталей ДВС может составлять около 30–35 %. Вместе с тем эти значения требуют проверки на реальном двигателе или моторном стенде, так как ресурс двигателя очень сильно зависит от технологии нанесения покрытия, масла, охлаждения и режима эксплуатации.

Ключевые слова: гибридные транспортные средства, двигатель внутреннего сгорания, современные материалы, титановые сплавы, керамика, композитные покрытия, Ni–SiC, надёжность.

Введение

При оценке ресурса двигателя внутреннего сгорания обычно сначала говорят о смазке, охлаждении, качестве сборки и условиях эксплуатации. Это действительно важные факторы. Но материал детали задаёт предел того, насколько долго рабочая поверхность сможет сохранять форму, выдерживать нагрев и сопротивляться износу. Для гибридного автомобиля этот вопрос становится ещё заметнее. Двигатель не всегда работает в одном устойчивом режиме: он запускается, отключается, снова принимает нагрузку. Такие переходы внешне почти незаметны, но для цилиндро-поршневой группы и клапанного механизма они означают повторные тепловые и механические воздействия.

В качестве характерного примера можно рассматривать Toyota Prius с двигателем 2ZR-FXE. Этот двигатель рассчитан на экономичную работу в составе гибридной силовой установки, однако базовые проблемы ДВС остаются теми же: трение, локальный перегрев, износ рабочих поверхностей, изменение размеров деталей при нагреве. Эти процессы редко проявляются сразу. Чаще они накапливаются постепенно, а затем отражаются на стабильности работы двигателя, межремонтном пробеге и стоимости обслуживания.

В литературе для снижения подобных нагрузок рассматриваются титановые сплавы, керамические материалы и покрытия Ni–SiC [1–4]. У этих решений разное назначение. Титановые сплавы интересны за счёт меньшей массы. Керамика лучше подходит для зон повышенной температуры. Покрытия Ni–SiC применяются там, где главную роль играет трение. В данной статье эти материалы не рассматриваются как универсальная замена стали. Задача состоит в том, чтобы сопоставить их свойства и определить, в каких участках двигателя каждое решение может быть наиболее полезным.

Материалы и методы

Исследование выполнено как сравнительный анализ. За исходный вариант принята сталь 40Х. Такой выбор не означает, что сталь 40Х не подходит для деталей двигателя. Она использована как понятная база, на фоне которой можно показать изменение коэффициента трения, температурной стойкости, деформации и оценочного ресурса.

Для сравнения выбраны три группы решений: титановые сплавы, керамика Al_2O_3 и нанокомпозитные покрытия Ni–SiC. Титановые сплавы рассматривались прежде всего как материал для снижения массы детали. Керамика Al_2O_3 – как вариант для участков, где рабочая температура выше средней. Покрытия Ni–SiC выделены отдельно, поскольку они не заменяют всю деталь, а работают как поверхностный слой. Для ДВС это существенный момент: во многих узлах первым изнашивается именно контактный слой, а не весь объём детали.

Показатели были разделены на три группы. Первая связана с трением и износом. Вторая - с тепловым состоянием материала. Третья - с механической прочностью и деформацией. Такое деление сделано для удобства анализа, хотя в реальном двигателе эти процессы идут вместе. Повышенное трение даёт

дополнительный нагрев. Нагрев меняет зазоры. Изменение зазоров влияет на контакт и дальнейший износ.

Для приближённой оценки изнашивания использована зависимость Арчарда:

$$I = V/(F \cdot s) \quad (1)$$

где I – интенсивность изнашивания; V – объём изношенного материала; F – нормальная нагрузка; s – путь трения.

Эта зависимость в работе используется только как расчётный ориентир. Она не описывает весь процесс износа в двигателе, потому что в реальном узле дополнительно действуют масло, температура, шероховатость, загрязнения, качество сборки и режим работы. Но для первичного сравнения материалов формула полезна. При одинаковой нагрузке и одинаковом пути трения меньший объём изношенного материала указывает на более устойчивую поверхность.

Для покрытий Ni–SiC в опубликованных работах приводится снижение коэффициента трения примерно на 40–50 % [4]. Сам состав покрытия при этом не является единственным условием. Большое значение имеет технология нанесения. В литературе встречаются газотермическое напыление, магнетронное распыление и электроосаждение. Контроль структуры обычно выполняется методами SEM и XRD. Если слой получается неоднородным, то фактический ресурс может оказаться ниже расчётного.

Тепловое поведение материалов рассматривалось через базовую зависимость:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2)$$

где Q – количество тепла; m – масса детали; c – удельная теплоёмкость; ΔT – изменение температуры.

Эта формула даёт только общее представление о тепловом отклике материала. Для поршня, клапана или другого элемента двигателя этого недостаточно. Температура внутри детали распределяется неравномерно, особенно в зоне, близкой к камере сгорания. Поэтому дополнительно применялось моделирование в ANSYS и SolidWorks. В ANSYS анализировалось распределение температур, а в SolidWorks рассматривалась геометрия детали и возможные участки концентрации напряжений.

Механическая часть анализа выполнялась с использованием зависимости:

$$\sigma = F/A \quad (3)$$

где σ – напряжение; F – сила; A – площадь поперечного сечения, служит основой для анализа, однако современные исследования включают методы конечных элементов (FEM).

Для реальной детали двигателя такая формула является только первым приближением. В поршневой группе и клапанном механизме напряжения редко распределяются равномерно. Локальные перегрузки возникают на кромках, в переходах сечения, около отверстий и в зонах температурного градиента. Поэтому при обсуждении результатов учитывался подход FEM-моделирования, который применяется для оценки деталей при циклических нагрузках [2].

В итоговое сравнение включены коэффициент трения, температурная стойкость, оценочный ресурс, деформация при нагреве и прирост ресурса. Часть значений взята из опубликованных работ, часть использована как обобщённая расчётно-аналитическая оценка. Собственные моторные испытания в рамках статьи не проводились. По этой причине результаты следует рассматривать как предварительный инженерный анализ, а не как окончательное подтверждение ресурса.

Результаты и обсуждения

Сравнение материалов показало, что повышение ресурса ДВС нельзя объяснить одним свойством. Один материал лучше переносит температуру, другой снижает массу, третий эффективнее работает на поверхности трения. Поэтому результаты рассматривались не как рейтинг материалов, а как оценка их возможного применения в разных зонах двигателя.

Сталь 40Х в таблице 1 принята за базу. Для неё коэффициент трения составляет 0,70, температурная стойкость – 350 °С, оценочный ресурс – 1000 часов. Эти значения нужны как точка отсчёта. На их фоне проще увидеть, какой эффект дают титановые сплавы, керамика и покрытия Ni–SiC.

Титановые сплавы дают прирост ресурса около 35 %. Коэффициент трения у них принят 0,55. Это лучше, чем у стали, но заметно выше, чем у керамики и Ni–SiC. Поэтому главное преимущество титана в данном случае связано не с трением, а с массой детали. Для гибридной силовой установки снижение массы может быть полезно, так как уменьшаются инерционные нагрузки. Но как средство резкого снижения износа титановые сплавы выглядят ограниченно.

Керамика Al_2O_3 показывает другой характер преимущества. Её температурная стойкость в расчёте составляет 900 °С, что значительно выше показателей стали 40Х и титановых сплавов. Коэффициент трения принят равным 0,40. Такой материал подходит для участков, где высокая температура сочетается с контактной нагрузкой. Ограничение очевидное - хрупкость и сложность обработки. Поэтому керамику нельзя просто перенести на любую деталь без учёта конструкции.

Покрытия Ni–SiC имеют самый низкий коэффициент трения среди рассмотренных вариантов – 0,35. Оценочный ресурс принят 3000 часов. По сравнению со сталью 40Х прирост составляет около 200 %. Однако этот результат относится к сравнительной оценке поверхности, а не ко всему двигателю. В реальной эксплуатации многое будет зависеть от технологии нанесения, масла, температуры, шероховатости и режима работы. Тем не менее для рабочих поверхностей трения Ni–SiC выглядит наиболее перспективным решением.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики материалов для деталей ДВС

Материал	Коэффициент трения	Температурная стойкость (°C)	Оценочный ресурс (часов)	Прирост ресурса (%)
Сталь 40Х	0,70	350	1000	-
Титановые сплавы	0,55	500	1500	+35
Керамика Al_2O_3	0,40	900	2500	+150
Ni–SiC покрытия	0,35	650	3000	+200

Таблица 1 показывает постепенное снижение коэффициента трения от стали к покрытиям Ni–SiC. Для цилиндро-поршневой группы это имеет прямое значение. Высокое трение ускоряет износ и повышает локальную температуру в зоне контакта. При меньшем трении поверхность медленнее повреждается и дольше сохраняет рабочую геометрию.

Тепловые показатели сведены в таблицу 2. Лучший результат здесь даёт комплексное применение материалов. Для стали 40Х максимальная температура составляет 420 °C. Для титановых сплавов она снижается до 380 °C, для керамики Al_2O_3 - до 340 °C, для Ni–SiC - до 360 °C. При комбинированном подходе значение составляет 330 °C.

Таблица 2 – Влияние материалов на тепловые процессы в ДВС

Материал	Макс. температура (°C)	Снижение относительно стали (%)	Деформация при нагреве (%)	Устойчивость к термоциклам	Прирост ресурса (%)
Сталь 40Х	420	-	1,5	Средняя	-
Титановые сплавы	380	–10	1,2	Выше средней	12
Керамика Al_2O_3	340	–19	0,6	Высокая	22
Ni–SiC покрытия	360	–14	0,7	Высокая	20
Комплексный подход	330	–22	0,5	Очень высокая	30

Керамика снижает максимальную температуру на 19 % относительно стали. Деформация при нагреве уменьшается до 0,6 %. Для двигателя это важно из-за рабочих зазоров. При нагреве размеры детали меняются, а вместе с ними меняются контактные условия. Даже небольшая деформация может повлиять на шум, износ и стабильность работы узла.

Покрытия Ni–SiC по максимальной температуре уступают керамике, но дают более сбалансированный результат. Температура составляет 360 °C, деформация при нагреве – 0,7 %. С учётом низкого коэффициента трения такие покрытия подходят для зон, где одновременно действуют износ и тепловая нагрузка.

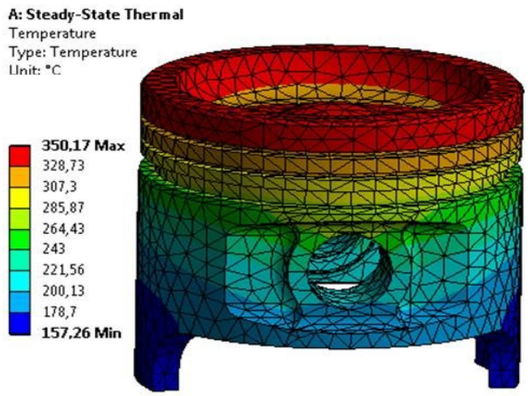


Рисунок 2 – Карта температурного распределения в поршневой группе ДВС

На рисунке 2 изображено температурное распределение в поршневой группе. Наиболее нагретая область находится в зоне днища поршня. Это ожидаемо, поскольку днище воспринимает основную тепловую нагрузку от процесса сгорания. Ниже по детали температура уменьшается. В результате появляется температурный градиент, который может вызывать дополнительные напряжения.

Для гибридного двигателя важна не только величина температуры, но и повторяемость нагрева и охлаждения. ДВС может отключаться, частично остывать, затем снова запускаться. Материал проходит через несколько циклов изменения температуры. В таблице 2 устойчивость к термоциклам у стали 40Х оценена как средняя, у керамики и Ni–SiC - высокая, у комплексного подхода – очень высокая. Поэтому сочетание материалов по зонам нагрузки выглядит более оправданным, чем выбор одного универсального варианта.

Таблица 3 – Перспективы внедрения современных материалов в автоиндустрию [11]

Материал / решение	Преимущества	Недостатки	Примеры применения
Титановые сплавы	Лёгкость, высокая прочность, термостойкость	Высокая стоимость	Авиация, спортивные авто
Керамика Al_2O_3	Высокая теплостойкость, износостойкость	Хрупкость, сложность обработки	Гибридные авто (Toyota Prius)
Ni–SiC покрытия	Снижение трения, долговечность	Стоимость нанесения	Серийные авто, опытные двигатели
Комплексный подход	Снижение массы, повышение ресурса на 30 %	Сложность внедрения	Перспективы массового производства
Интеллектуальные системы + материалы	Снижение нагрузки, ресурс +35 %	Требует новых алгоритмов	Экспериментальные гибриды

Таблица 3 отражает практическую сторону вопроса. Высокие расчётные показатели сами по себе ещё не означают лёгкое внедрение. Титановые сплавы дороги. Керамика сложна в обработке и имеет ограничение по хрупкости. Покрытия Ni–SiC требуют стабильной технологии нанесения. При дефектах слоя ресурс может оказаться ниже ожидаемого.

По этой причине наиболее реалистичным является выборочное применение материалов. Керамику целесообразно использовать в зонах повышенной температуры, Ni–SiC - на поверхностях трения, титановые сплавы - в деталях, где снижение массы действительно даёт технический выигрыш. Такой принцип соответствует схеме, приведённой на рисунке 3.

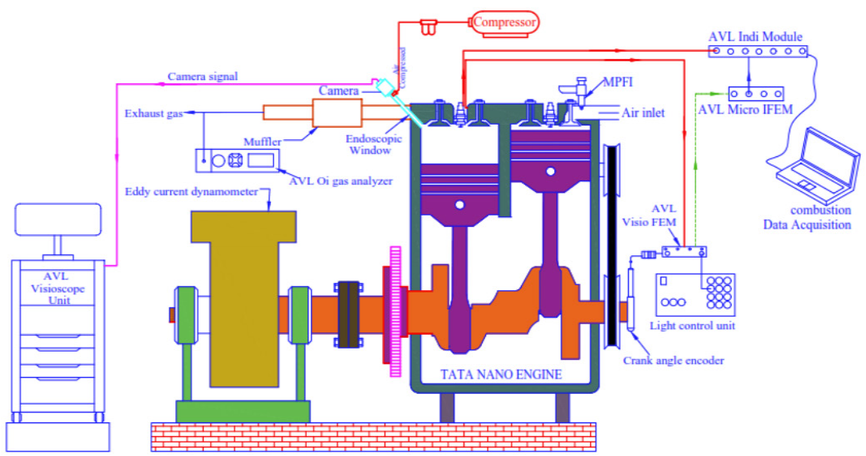


Рисунок 3 – Схема конструкции гибридного ДВС

Комплексный вариант снижает максимальную температуру на 22 %, уменьшает деформацию при нагреве до 0,5 % и даёт прирост ресурса около 30 %. Для гибридного автомобиля это выглядит обоснованно. Двигатель Toyota Prius 2ZR-FXE и другие ДВС гибридных установок работают с частой сменой режимов, поэтому материал должен выдерживать не только нагрузку, но и повторное изменение теплового состояния.

Экономическая сторона остаётся отдельным вопросом. Новые материалы увеличивают стоимость детали, а нанесение покрытия требует дополнительной технологической операции. Но если за счёт этого растёт межремонтный пробег и уменьшаются расходы на обслуживание, часть затрат может быть компенсирована. По обобщённой оценке срок окупаемости составляет 3–5 лет. Для массового автомобиля это заметный период, но для гибридной силовой установки с дорогими компонентами такой вариант может быть приемлемым при подтверждении испытаниями.

В целом результаты указывают на то, что ресурс ДВС следует оценивать через совокупность факторов. Одной прочности материала недостаточно. Необходимо учитывать трение, тепловую устойчивость, деформацию, технологию нанесения покрытия и режим работы двигателя. В дальнейших исследованиях материалы желательно рассматривать совместно с алгоритмами управления гибридным ДВС, поскольку режим работы двигателя напрямую влияет на тепловую и механическую нагрузку.

Выводы

В общем и целом, можно сказать, что ресурс деталей ДВС гибридного автомобиля зависит от нескольких факторов одновременно. Прочность материала важна, но сама по себе она не решает проблему износа. При оценке необходимо учитывать коэффициент трения, температурную стойкость, деформацию при нагреве и устойчивость к термоциклам.

Сталь 40Х в работе использована как исходная база для сравнения. На её фоне титановые сплавы, керамика Al_2O_3 и покрытия Ni–SiC показывают улучшение по разным направлениям. Титановые сплавы полезны за счёт снижения массы. Керамика лучше подходит для зон высокой температуры. Покрытия Ni–SiC имеют преимущество на поверхностях трения.

Наиболее обоснованным является комплексный подход, при котором материал выбирается под конкретную зону нагрузки. По расчётным данным он позволяет снизить максимальную температуру до 330 °С, уменьшить деформацию при нагреве до 0,5 % и получить прирост ресурса около 30–35 %. Для цилиндро-поршневой группы и клапанного механизма такой вариант выглядит более реалистичным, чем применение одного материала для всех элементов.

Моделирование в ANSYS и SolidWorks позволяет предварительно оценить температурные поля, деформации и участки концентрации напряжений. Но эти данные нельзя считать полной заменой испытаний. На реальный ресурс влияют масло, охлаждение, качество покрытия, режим эксплуатации и состояние поверхности детали.

Практическое применение титановых сплавов, керамики и Ni–SiC ограничивается стоимостью и технологической сложностью. Тем не менее при росте межремонтного пробега и снижении расходов на обслуживание такие решения могут быть оправданы. Следующий этап исследований следует связать с проверкой материалов на моторном стенде и с оценкой их работы вместе с алгоритмами управления гибридным ДВС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Hussain, I., Immanuel, R. J.** Composite materials and its advancements for a cleaner engine of future. In: Kumar, V., Agarwal, A. K., Jena, A., Upadhyay, R. K. (eds) Advances in Engine Tribology. – 2022. – Singapore: Springer Singapore. – P. 169 – 191. – https://doi.org/10.1007/978-981-16-8337-4_9

2 **Zerbst, U., Madia, M., Bruno, G., Hilgenberg, K.** Towards a Methodology for Component Design of Metallic AM Parts Subjected to Cyclic Loading // Metals. – 2021. – Vol. 11. – Art. 709. – https://doi.org/10.3390/met11050709.

3 **Liu, H., Wen, M., Yang, H., Yue, Z., Yao, M.** A review of thermal management system and control strategy for automotive engines. // Journal of Energy Engineering. – 2021. – Vol. 147(2). – 03121001. – https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000743.

4 **Shahbaz, M. H., Amin, A. A.** Design of active fault tolerant control system for air fuel ratio control of internal combustion engines using artificial neural networks // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 46022–46032. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9383214.

5 **Park, S., Shin, J. Y., Bae, C., Jung, J., & Lee, J.** Combustion phenomena affecting particle emission under boosting conditions in a turbocharged gasoline direct injection engine // Fuel. – 2021. – Vol. 286. – 119362. – [Electronic resource]. – https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120323589.

6 **Евфратов, Д. Ж., Булатов, Н. К.** Обзор направлений развития надежности гибридных транспортных средств по системам ДВС. // Материалы международной научно-практической конференции,посвященной 130-летию С.Сейфуллина. – 2024. – Ч.II. – С. 116–118. – [Electronic resource]. – https://kazatu.edu.kz/webroot/js/kcfinder/upload/files/Евфратов%20Д.Ж.pdf

7 **Kumar, S., Kumar, R.** Influence of processing conditions on the properties of thermal sprayed coating: a review. Surface Engineering. – 2021. – Vol. 37(11). – P. 1339–1372. – [Electronic resource]. – https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1080/02670844.2021.1967024.

8 **Sirna, A., Loprete, J., Ristow Hadlich, R., Assanis, D., Patel R., Mack J. H.** «ML-based Identification of Lactones for Blend Studies and Combustion Performance in a Spark-Ignition CFR Engine», SAE Technical Paper 2025-24-0071. – 2025. – https://doi.org/10.4271/2025-24-0071.

9 **Bryant, C. E., Rutledge, J. L.** Temperature Dependent Property Considerations for Biot Number Matching With Composite Materials. // J. Turbomach. Apr 2023. – Vol. 145(4). – 041010 (11 pages). – https://doi.org/10.1115/1.4055927.

10 **Dobrenizki, L., Brugnara, R.H., Schulz, E., Bagcivan, N., Tremmel, S., Wartzack, S.** A New Nanostructured Coating System for Energy Efficient Engine Components (Neues nanostrukturiertes Schichtsystem für energieeffizientere Motorenelemente). In: Liebl, J. (eds) Experten-Forum Powertrain: Reibung in Antrieb und Fahrzeug. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. – 2020. – https://doi.org/10.1007/978-3-658-28711-5_2

11 **Аманов, С. Р.** Плазменная наплавка выпускных клапанов двигателей внутреннего сгорания порошковыми сплавами: дисс. канд. техн. наук: 05.03.06 – Технология и машины сварочного производства. – ТолПИ. – Тольяти, 2000. – 124 с. – [Electronic resource]. – https://new-disser.ru/_avtoreferats/01000267172.pdf

REFERENCES

1 **Hussain, I., Immanuel, R. J.** Composite materials and its advancements for a cleaner engine of future. In: Kumar, V., Agarwal, A. K., Jena, A., Upadhyay, R. K. (eds) Advances in Engine Tribology. – 2022. – Singapore: Springer Singapore. – P. 169 – 191. – https://doi.org/10.1007/978-981-16-8337-4_9

2 **Zerbst, U., Madia, M., Bruno, G., Hilgenberg, K.** Towards a Methodology for Component Design of Metallic AM Parts Subjected to Cyclic Loading // Metals. – 2021. – Vol. 11. – Art. 709. – https://doi.org/10.3390/met11050709.

3 **Liu, H., Wen, M., Yang, H., Yue, Z., Yao, M.** A review of thermal management system and control strategy for automotive engines. // Journal of Energy Engineering. – 2021. – Vol. 147(2). – 03121001. – https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000743.

4 **Shahbaz, M. H., Amin, A. A.** Design of active fault tolerant control system for air fuel ratio control of internal combustion engines using artificial neural networks // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 46022–46032. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9383214.

5 **Park, S., Shin, J. Y., Bae, C., Jung, J., & Lee, J.** Combustion phenomena affecting particle emission under boosting conditions in a turbocharged gasoline direct injection engine // Fuel. – 2021. – Vol. 286. – 119362. – [Electronic resource]. – https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120323589.

6 **Evfratov, D. Zh., Bulatov, N. K.** Obzor napravlenij razvitiya nadezhnosti gibridnykh transportnykh sredstv po sistemam DVS [Overview of the directions of development of reliability of hybrid vehicles by internal combustion engine systems] // Materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 130th anniversary of S.Seifullin. – 2024. – Part II. – P. 116–118. – [Electronic resource]. – https://kazatu.edu.kz/webroot/js/kcfinder/upload/files/Евфратов%20Д.Ж.pdf

7 **Kumar, S., Kumar, R.** Influence of processing conditions on the properties of thermal sprayed coating: a review. Surface Engineering. – 2021. – Vol. 37(11). – P. 1339–1372. – [Electronic resource]. – https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1080/02670844.2021.1967024.

8 **Sirna, A., Loprete, J., Ristow Hadlich, R., Assanis, D., Patel R., Mack J. H.** «ML-based Identification of Lactones for Blend Studies and Combustion Performance in a Spark-Ignition CFR Engine», SAE Technical Paper 2025-24-0071. – 2025. – https://doi.org/10.4271/2025-24-0071.

9 **Bryant, C. E., Rutledge, J. L.** Temperature Dependent Property Considerations for Biot Number Matching With Composite Materials. // J. Turbomach. Apr 2023. – Vol. 145(4). – 041010 (11 pages). – https://doi.org/10.1115/1.4055927.

10 **Dobrenizki, L., Brugnara, R. H., Schulz, E., Bagcivan, N., Tremmel, S., Wartzack, S.** A New Nanostructured Coating System for Energy Efficient Engine Components (Neues nanostrukturiertes Schichtsystem für energieeffizientere Motorenelemente). In: Liebl, J. (eds) Experten-Forum Powertrain: Reibung in Antrieb

und Fahrzeug. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. – 2020. – https://doi.org/10.1007/978-3-658-28711-5_2

11 **Amanov, S. R.** Plazmennaya naplavka vypusknykh klapanov dvigatelej vnutrennego sgoraniya poroshkovymi splavami [Plasma surfacing of exhaust valves of internal combustion engines with powder alloys]: Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.03.06 – Technology and machines of welding production. – TolPI. – Tolyatti. – 2000. – 124 p. – [Electronic resource]. – https://new-disser.ru/_avtoreferats/01000267172.pdf

Поступило в редакцию 03.12.25.
Поступило с исправлениями 09.04.26.
Принято в печать 21.05.26.

Д. Ж. Евфратов[1], *Н. Қ. Болатов[2], О. Ш. Оразов[3]
[1]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2,3]А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті,
Қазақстан Республикасы, Көкшетау қ.
03.12.25 ж. баспаға түсті.
09.04.25 ж. түзетулерімен түсті.
21.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ІШКІ ЖАНУ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫНЫҢ РЕСУРСЫН ЖАҚСАРТЫЛҒАН ЖЫЛУ ТӨЗІМДІ ЖӘНЕ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІ ҚАСИЕТТЕРІ БАР МАТЕРИАЛДАРДЫ ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ АРТТЫРУ

Мақалада гибридті автомобильдің іштен жану қозғалтқышы бөлшектері үшін термотөзімділігі және тозуға төзімділігі жоғары материалдарды қолдану мәселесі қарастырылады. Мұндай қозғалтқыштарда бөлшектің ресурсы тек беріктік қорымен ғана анықталмайды. Нақты пайдалану жағдайында үйкеліс, қызу, саңылаулардың өзгеруі, жұмыс бетінің сапасы және қозғалтқыштың әртүрлі режимдер арасында жиі ауысуы қатар әсер етеді. Сондықтан жұмыста бір ғана көрсеткіш емес, пайдалану жағдайына жақын бірнеше параметр қарастырылды: үйкеліс коэффициенті, температураға төзімділік, қызу кезіндегі деформация және бағалау ресурсы.

Салыстыру үшін 40Х болаты, титан қорытпалары, Al_2O_3 керамикасы және Ni–SiC жабындары таңдалды. 40Х болаты салыстыру жүргізуге ыңғайлы базалық нұсқа ретінде алынды. Титан қорытпалары бөлшектердің массасын азайту тұрғысынан, керамика жоғары температура әсер ететін аймақтар үшін, ал Ni–SiC жабындары үйкеліс беттерін қорғау қабаты ретінде қарастырылды. Жұмыста жарияланған зерттеу деректері, қарапайым есептік тәуелділіктер және ANSYS пен SolidWorks бағдарламаларындағы модельдеу нәтижелері пайдаланылды. Алынған нәтижелер дәстүрлі материалдарды толық ауыстырудан гөрі, оларды жүктеме аймақтарына қарай таңдап қолдану тиімдірек екенін көрсетеді. Мұндай тәсілде ДВС бөлшектерінің есептік ресурсы шамамен 30–35 %-ға артуы мүмкін. Сонымен бірге бұл мәндерді нақты қозғалтқышта немесе мотор стендінде тексеру қажет, себебі ресурс жабын жағу технологиясына, майлау жағдайына, салқындатуға және пайдалану режиміне тәуелді.

Кілтті сөздер: гибридті көлік құралдары, іштен жану қозғалтқышы, заманауи материалдар, титан қорытпалары, керамика, композиттік жабындар, Ni–SiC, сенімділік.

D. Z. Yevfratov[1], *N. K. Bulatov[2], O. S. Orazov[3]
[1]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[2,3]A. Myrzakhmetov Kokshetau University,
Republic of Kazakhstan, Kokshetau.
Received 03.12.25.
Received in revised form 09.04.26.
Accepted for publication 21.05.26.

IMPROVING THE RESOURCE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES THROUGH THE USE OF MATERIALS WITH ENHANCED HEAT AND WEAR RESISTANT PROPERTIES

The article considers the use of heat-resistant and wear-resistant materials for internal combustion engine components in a hybrid vehicle. In such engines, the service life of a part is not determined only by its strength margin. Under real operating conditions, friction, heating, changes in clearances, surface quality, and frequent transitions between engine operating modes act at the same time. Therefore, the study focuses not on one parameter, but on several indicators that are closer to actual operation: friction coefficient, temperature resistance, thermal deformation, and estimated service life.

Steel 40Kh, titanium alloys, Al_2O_3 ceramics, and Ni–SiC coatings were selected for comparison. Steel 40Kh was used as a basic reference material for comparison. Titanium alloys were considered from the standpoint of reducing the mass of parts, ceramics as a material for high-temperature zones, and Ni–SiC coatings as a protective layer for friction surfaces. The study used published data, simple calculation relationships, and simulation in ANSYS and SolidWorks. The obtained results show that the most practical approach is not the complete replacement of conventional materials, but their selective application according to load zones. With this approach, the estimated service life of ICE components may increase by about 30–35%. At the same time, these values require verification on a real engine or an engine test bench, since service life strongly depends on coating technology, lubrication, cooling, and operating conditions.

Keywords: hybrid vehicles, internal combustion engine, advanced materials, titanium alloys, ceramics, composite coatings, Ni–SiC, reliability.

SRSTI 73.29.97

https://doi.org/10.48081/BGQF2242

A. Zhumashev[1], D. Imangazinova[2], M. Zhetibaeva[3], Zh. Karimova[4], D. Iskakov[5]

[1,2,3,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3193-1017

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3023-6042

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5622-6977

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2148-6096

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2017-5286

*e-mail: Zhumashevalisher@mail.ru

THEORETICAL STUDY OF THE PROCESS OF GAS DINAMIC CLEANING OF THE WAGON BODY

Corrosion of the body is an important problem during the operation and repair of wagons. Cleaning the body of a railway carriage before painting is the most important stage of preparation, ensuring the adhesion of paint to metal, removing rust, old coating, dirt and oils. High-quality cleaning prevents under-film corrosion, guarantees the durability of the paintwork and significantly prolongs the inter-repair life of the wagon. The article examines the process of gas dynamic cleaning of the metal surface of the railway carriage body. The process of interaction of the gas dynamic flow with the painted surface of the wagon body is considered. It is determined that the velocity of a particle that hits the surface of the body under gas pressure is ultimately determined by the velocity of the gas dynamic flow; the mass of the particle; the location of the particle in the flow; the surface area of the particle As a result, the dependences of the parameters of the flow effect on the old paintwork of the wagon, the actual cleaning speed and the productivity of the process were obtained.

Keywords: body cleaning, particle acceleration, particle flow velocity, wagon, gas dynamic cleaning.

Introduction

Cleaning of the exterior surface of passenger wagon bodies from old paintwork and operational contamination during major repairs is necessary due to corrosion wear of the wagon body, as well as damage to the paintwork itself during operation. Corrosion wear of a wagon body is damage to its structure as a result of aggressive environmental influences. Corrosion is the process of destruction of metals during their chemical, electrochemical or biochemical interaction with the environment. Corrosion, as a natural process, affects most of the rolling stock parts.

Corrosion wear causes significant economic damage across the railway industry, in particular, and the country as a whole. The edges of the windows and the lower part of the body are most susceptible to corrosion.

The metal floor covering requires 90 % replacement due to corrosion damage, the vertical support posts of the body at a height of 350 mm from the floor are also susceptible to corrosion (wear of more than 50 %), and the wear of the support shelves of the strapping profile of the body frame is 40 %. Every year, more than two thousand passenger wagon systems on the road network require major repairs. The main reason is corrosion.

The nominal service life of the new passenger wagon is 28 years. However, in our climatic conditions, after 10-12 years its body is subjected to significant corrosion wear. For this reason, a third of the passenger wagon systems that have been in operation for more than 20 years need major repairs. Scientists in this field have developed a number of technologies that make it possible, at relatively low financial costs, to increase the resource of expensive passenger wagon by at least 15 years. This saves the company a lot of money. According to current regulations, if a wagon is less than a third corroded, it can still be repaired, if more, it is written off.

The standard wagon repair process includes the operation of completely or locally cleaning the surface of the wagon from old paint before painting. The difficulty of cleaning before painting can be up to 70 % of the complexity of the painting itself. The cleaning methods used in a typical manufacturing process are based on a combination of chemical treatment and shot blasting. This combination leads to a significant increase in material consumption, man-made waste emissions, an increase in the number of process equipment and labor, and, ultimately, to the high cost of cleaning the process.

Materials and methods

Sandblasting refers to pneumatic abrasive cleaning methods. It is most widely used in cleaning parts and assemblies of rolling stock. It consists in the impact of an abrasive stream with high kinetic energy on the surface to be prepared. The abrasive is supplied by centrifugal force, compressed air or ejection. The abrasive can be injected into an air stream from a pressurized container, or carried away by this air stream during suction from a non-pressurized container.

This method is used to clean surfaces using sandblasters. Sandblasting is one of the main stages of surface preparation before applying various anticorrosive and decorative protective coatings. Sandblasting is carried out using mobile and stationary installations, which allows processing in the field and in workshops. Cleaning capacity is up to 10 m/hour, depending on the initial condition of the surface.

The degree of cleaning is the first or second, i.e. cleaning the surface to a «metallic sheen» without residues of third-party micro inclusions. The roughness of the treated surface is up to 30 microns per Kg, which allows the treatment to be applied for responsible anti-corrosion protection work. The use of sandblasting makes it possible in some cases to eliminate the stage of degreasing the surface before applying protective coatings.

The environmental performance of sandblasting, as with all abrasive blasting methods, is significantly higher, however, the use of sandblasting is limited in railway transport enterprises, as it causes lung diseases, despite the protection used.

The advantages of sandblasting include high quality; cleaning, convenience and flexibility of use; cost-effectiveness. The disadvantages are the harmfulness of production and the insufficient productivity of the process.

Shot blasting also applies to pneumatic abrasive cleaning methods, and represents an impact: on the surface to be cleaned by a stream, fractions. A shot is a crushed metal crumb of various sizes. The shot is made by casting; or crushing. Shot blasting is significantly higher in productivity due to the use of a larger abrasive. In shot blasting, cleaning is used; shot from various non-ferrous and ferrous metals and alloys.

Shot blasting. Unlike commonly used abrasive blasting equipment; in shot blasting plants, the shot is not supplied to the treated surface by compressed air energy, but is accelerated by the blades of a shot blasting turbine driven by an electric motor and rotating at a speed of about 3000 rpm. The crushing capacity of one shot-throwing wheel is 100-400 kg/min. Therefore, the productivity of shot blasting plants is significantly higher than that of abrasive blasting plants, and can reach up to 100 m/hour.

The design of shotguns is primarily determined by the geometry of the products to be processed. All shot blasting units are equipped with a mechanical abrasive collection and recovery system and a filtration system to remove dust from the treatment area and prevent it from entering the workshop. Shot blasting units are used where it is required to ensure high productivity and continuity of the processing process as one of the technological stages in conveyor production, and are integrated into the paint lines.

High-performance flow-through units are used for cleaning. The shot-throwing wheels are positioned perpendicular to the direction of the carriage's forward movement so that the entire surface is completely processed in one pass through the chamber. The spent contaminated abrasive falls through the collecting funnel of the chamber onto a conveyor leading to a bucket elevator, which lifts it to the abrasive cleaning system for repeated use. The cleaned abrasive is returned to the processing process. The units are equipped with a filter for cleaning the abrasive and exhaust air. The units can be equipped with a brushing and blowing unit to remove abrasives from the surface of large-area products. Shot blasting is very productive and allows cleaning one wagon per hour. This is due to its widespread use in railway transport.

Results and discussions

The main objective of this study is to calculate the velocity of particles before they hit the treated surface, which is a key step for subsequent calculations. Upon entering the air stream, the aerodynamic force P(H) generated by the air movement begins to act on the particle. The effect of the flow on the surface of the abrasive grain is due to the combination of forces resulting from the collision of the smallest air particles with the grain. In the field of aerodynamics, there is a specialized formula for determining the force R acting on a rigid body when it is immersed in an air stream.

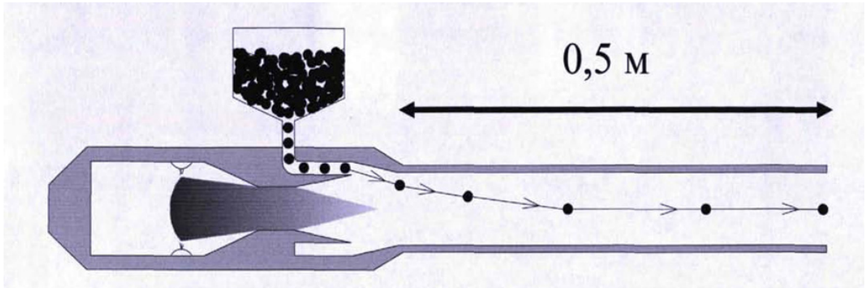


Figure 1 – The scheme of particle acceleration in the accelerating tube

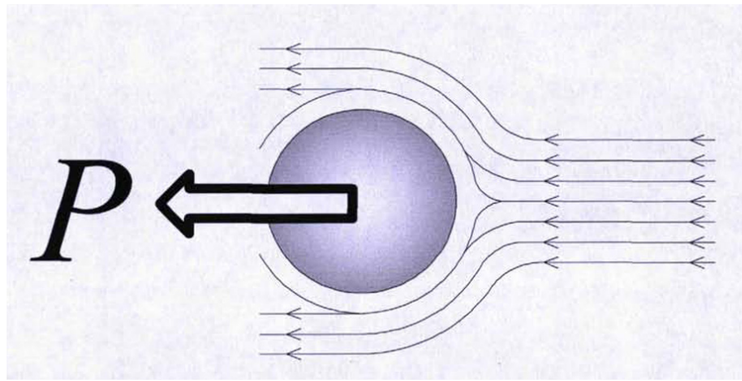


Figure 2 – The effect of the aerodynamic force on a particle in the flow

$$P = c_x F_{part} \rho_g \frac{(\vartheta - \omega)^2}{2} \quad (1)$$

where c_x – the coefficient that takes into account the shape of the particle and the mode of its flow,

F_{part} – the surface area of the particle affected by the flow (midsection of the particle),

ρ_g – the density of the gas,

ϑ – the velocity of the gas flow,

ω – the velocity of the particle.

Direct calculation of velocity using this formula is difficult, since its transformation relative to the velocity of a particle leads to complex differential equations. In this regard, it is advisable to apply a simplified speed calculation method. Its essence consists in dividing the acceleration section of a particle into several short segments, each of which assumes uniform motion. Let's divide the particle's path at a distance of 0.3 meters into 10 equal sections with a length of 1 cm. We assume that a constant force F acts on the particle at each site, ensuring uniform motion. At the beginning of each section,

the particle velocity is equal to ω_0, and at the end – ω. If the motion of a particle in the specified area is uniform, then the following equation can be written for it

$$l = \frac{at^2}{2} + \omega_0 t \tag{2}$$

where l is the length of the section.

Let us express from (2) the time

$$= \frac{\sqrt{\omega_0^2 + 2al} - \omega_0}{a} \tag{3}$$

If the flow velocity is greater than the particle velocity, then it works to accelerate the particle, i.e.

$$\omega = \omega_0 + at \tag{4}$$

Knowing the time, we can combine (3) and (4) to obtain an expression for the velocity of the particle (5) in a given area.: If the flow velocity is greater than the particle velocity, then it works to accelerate the particle, i.e.

$$\omega \quad = \omega_0 + a\left(\frac{\sqrt{\omega_0^2 + 2al} - \omega_0}{a}\right) \tag{5}$$

For subsequent sections

$$\omega_n = \sqrt{\omega_0 + al}; \tag{6}$$

Acceleration is determined based on the expression

$$a = \frac{P}{m} = c_x F_{part} \rho_g \frac{(\vartheta - \omega)^2}{2m} \tag{7}$$

where m is the mass of the particle. Substitute the acceleration value in (7) and we get that when the particle accelerates

$$\omega_i = \sqrt{\omega_{i-1}^2 + 2c_x F_{part} \rho_g \frac{(\vartheta - \omega)^2}{2m} l}; \tag{6}$$

where c_x – the coefficient that takes into account the shape of the particle and the mode of its flow,

F_{part} – the surface area of the particle affected by the flow (midsection of the particle),

ρ_g – the density of the gas,

ϑ – the velocity of the gas stream, is the velocity of the particle at the end of the section,

ω – the velocity of the particle at the beginning of the section.

It follows from equation (8) that the final velocity of a particle depends on the following parameters: gas dynamic flow rates; particle masses; its position in the flow; the cross-sectional area (the middle of the section). In equation (8), the unknown quantity is the velocity of the gas flow.

$$\vartheta_0 = \sqrt{\frac{k}{k-1} RT_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}}\right)} \tag{9}$$

where P_a – atmospheric air pressure,

P_0 – the air pressure in the combustion chamber,

k = 1.4 for air,

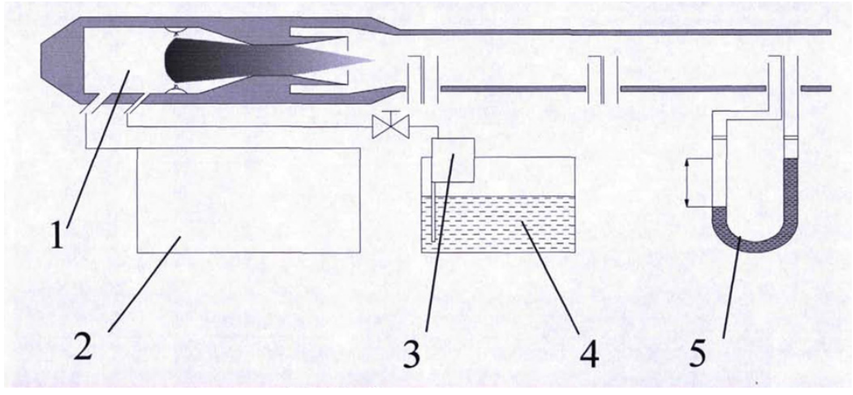
R = 287 j/kgk,

T_0 – the air temperature in the combustion chamber,

P_a – atmospheric pressure,

ϑ_0 – the gas velocity.

Direct calculation of the velocity using the formula (9) necessitates the determination of the temperature of the gas at the time of its entry into the nozzle. The temperature in the combustion chamber is determined by a variety of parameters, such as fuel consumption, pressure and air flow, as well as the characteristics of the ignition system. To directly measure the gas flow rate, bypassing the calculation of the temperature in the combustion chamber, it is advisable to use the test bench shown in Figure 3.



1 – combustion chamber, 2 – compressor,
3 – fuel supply valve, 4 – fuel tank, 5 – Pito tube
Figure 3 – Diagram of the test bench

In the future, experimental studies will be conducted with the development of a prototype test facility.

Conclusions

All of the above cleaning methods are used in the repair of rolling stock. In a typical technological process, it is proposed to combine abrasive blasting and washing operations for cleaning bodies. Abrasive action removes solid dirt and old paint, and washing liquids degrease the surface of the car before painting.

The productivity and quality of the wagon body cleaning process is determined by fuel consumption, the acceleration rate of the fraction particles and their mass. Simultaneous exposure to shot and heat flow helps to heat the surface to temperatures that ensure degreasing of surfaces for painting.

REFERENCES

1 Automated Quality Control Systems for Paint Coatings in Industry / A. A. Kulkov, A. Y. Korytov, A. Y. Popov, M. A. Larionov // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS 2019), Sochi. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 277–279. – https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928352.

2 **Битюцкий, А. А.** Пути повышения эффективности грузовых вагонов, выпускаемых российскими вагоностроительными предприятиями / А. А. Битюцкий // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 29–33.

3 Problems of corrosion wear of wagons during the operation of rolling stock and ways to solve them using the thermoabrasive gasdynamic method: Scientific and practical conference «Week of Science» / A. A. Kulkov, D. G. Evseev // Science – transport. – 2007. – № IV. – P. 41.

4 **Chrysalidis, A.** Applied Cleaning Methods of Oil Residues from Industrial Tanks / A. Chrysalidis, G. Z. Kyzas // Processes. – 2020. – Vol. 8, Iss. 5. – Art. 569. – https://doi.org/10.3390/pr8050569.

5 **Koblenzer, G.** Trends in automotive parts cleaning / G. Koblenzer // IST International Surface Technology. – 2017. – Vol. 10. – P. 36–37. – https://doi.org/10.1007/s35724-017-0012-4.

6 **Faber, J.** Understanding technical cleanliness : importance, assessment, maintenance / J. Faber, K. Brodjik, M. Nycz // Combustion Engines. – 2021. – Vol. 186. – № 3. – P. 41–50.

7 **Voropai, V.** Development of a design-experimental methodology for the prediction of reliable exploitation of freight railway cars / V. Voropai // Transport Problems. – 2017. – Volume 12. – Issue 3. – P. 21–34.

8 **Lovska, A.** Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge / A. Lovska // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 49–54.

9 ГОСТ 27.002—2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2017–03–01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 24 с.

10 **Jinling Zhao.** Design of Cleaning Machine for Passenger Car Bogie / Jinling Zhao, Mei Tian // Proceedings of the 6th International Conference on Management, Education, Information and Control (MEICI 2016). – Atlantis Press, 2016.

REFERENCES

1 Automated Quality Control Systems for Paint Coatings in Industry / A. A. Kulkov, A. Y. Korytov, A. Y. Popov, M. A. Larionov // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS 2019), Sochi. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 277–279. – https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928352.

2 **Bityutsky, A. A.** Puti povysheniya effektivnosti gruzovyh vagonov, vypuskaemyh rossijskimi vagonostroitel'nymi predpriyatiyami [Ways to increase the efficiency of freight cars produced by Russian car-building enterprises] [Text]. In Tyazheloe mashinostroenie [Heavy Heavy Power Machine Building]. – 2008. – №. 2. – P. 29–33.

3 Problems of corrosion wear of wagons during the operation of rolling stock and ways to solve them using the thermoabrasive gasdynamic method: Scientific and practical conference «Week of Science» / A. A. Kulkov, D. G. Evseev // Science – transport. – 2007. – № IV. – P. 41.

4 **Chrysalidis, A.** Applied Cleaning Methods of Oil Residues from Industrial Tanks / A. Chrysalidis, G. Z. Kyzas // Processes. – 2020. – Vol. 8, Iss. 5. – Art. 569. – https://doi.org/10.3390/pr8050569.

5 **Koblenzer, G.** Trends in automotive parts cleaning / G. Koblenzer // IST International Surface Technology. – 2017. – Vol. 10. – P. 36–37. – https://doi.org/10.1007/s35724-017-0012-4.

6 **Faber, J.** Understanding technical cleanliness: importance, assessment, maintenance / J. Faber, K. Brodjik, M. Nycz // Combustion Engines. – 2021. – Vol. 186. – № 3. – P. 41–50.

7 **Voropai, V.** Development of a design-experimental methodology for the prediction of reliable exploitation of freight railway cars / V. Voropai // Transport Problems. – 2017. – Volume 12. – Issue 3. – P. 21–34.

8 **Lovska, A.** Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge / A. Lovska // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 49–54.

9 GOST 27.002—2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Dependability in technics. Terms and definitions] [Text]. – Moscow : Standartinform, 2016. – 24 p.

10 **Jinling Zhao.** Design of Cleaning Machine for Passenger Car Bogie / Jinling Zhao, Mei Tian // Proceedings of the 6th International Conference on Management, Education, Information and Control (MEICI 2016). – Atlantis Press, 2016.

Received 20.05.26.
Received in revised form 06.06.26.
Accepted for publication 10.06.26.

А. С. Жумашев[1], Д. Б. Имангазинова[2], М. М. Жетибаева[3], Ж. Р. Каримова[4], Д. К. Искаков[5]
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
20.05.26 ж. баспаға түсті.
06.06.25 ж. түзетулерімен түсті.
10.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ВАГОН ШАНАҒЫН ГАЗДИНАМИКАЛЫҚ ТАЗАРТУ ПРОЦЕСІН ТЕОРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Вагондарды пайдалану және жөндеу кезінде корпустың коррозиясы маңызды мәселе болып табылады. Бояу алдында теміржол вагонының корпусын тазалау-бояудың металға жабысуын, тотты, ескі жабынды, кір мен майларды кетіруді қамтамасыз ететін дайындықтың маңызды кезеңі. Жоғары сапалы тазалау пленка коррозиясының алдын алады, бояу жабынының беріктігіне кепілдік береді және вагонның жөндеу аралық қызмет ету мерзімін едәуір ұзартады. Мақалада теміржол вагонының металл бетін газдинамикалық тазарту процесі қарастырылады. Газ-динамикалық ағынның вагон корпусының боялған бетімен өзара әрекеттесу процесі қарастырылады. Газ қысымымен дененің бетіне соғылатын бөлшектің жылдамдығы, сайып келгенде, газ-динамикалық ағынның жылдамдығымен анықталады; бөлшектің массасы; бөлшектің ағындағы орны; бөлшектің бетінің ауданы, нәтижесінде тәуелділіктер пайда болады, ағынның ескі вагон бояуларына әсер ету параметрлері, нақты тазарту жылдамдығы және процестің өнімділігі алынды.

Кілтті сөздер: шанақты тазарту, бөлшектердің үдеуі, бөлшектер ағынының жылдамдығы, вагон, газ-динамикалық тазарту.

А. С. Жумашев[1], Д. Б. Имангазинова[2], М. М. Жетибаева[3], Ж. Р. Каримова[4], Д. К. Искаков[5]
[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 20.05.26.
Поступило с исправлениями 06.06.26.
Принято в печать 10.06.26.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ КУЗОВА ВАГОНА

Коррозия кузова является важной проблемой при эксплуатации и ремонте вагонов. Очистка кузова железнодорожного вагона перед покраской - важнейший этап подготовки, обеспечивающий адгезию краски к металлу, удаление ржавчины, старого покрытия, грязи и масел. Качественная очистка предотвращает подпленочную коррозию, гарантирует долговечность лакокрасочного покрытия и значительно продлевает межремонтный срок службы вагона. В статье рассматривается процесс газодинамической очистки металлической поверхности кузова железнодорожного вагона.

Рассмотрен процесс взаимодействия газодинамического потока с окрашенной поверхностью кузова вагона. Определено, что скорость частицы, которая ударяется о поверхность тела под давлением газа, в конечном счете определяется скоростью газодинамического потока; массой частицы; местоположением частицы в потоке; площадью поверхности частицы, в результате чего получены зависимости были получены параметры воздействия потока на старое лакокрасочное покрытие вагона, фактическая скорость очистки и производительность процесса.

Ключевые слова: очистка кузова, ускорение частиц, скорость потока частиц, вагон, газодинамическая очистка.

МРНТИ 73.31.75

https://doi.org/10.48081/BGQF2243

***Т. С. Ибраимов[1], Ж. Ж. Альтаева[2], Н. С. Сауханов[3]**

[1,2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

3Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республика Казахстан, г. Актобе.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9298-7612

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1027-9159

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

*e-mail: taras_ibraimov@mail.ru

ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА

В статье проведена оценка транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса Западного региона Республики Казахстан как фактора устойчивости грузоперевозок и интеграции в международные транспортные потоки. Эмпирическая база сформирована на основе официальной статистики и материалов за 2019–2024 гг., публикаций и отчётов международных организаций. Транспортно-логистический потенциал раскрыт через систему индикаторов, характеризующих состояние дорожной инфраструктуры, технический уровень автопарка, обеспеченность логистическими узлами, результативность перевозок, инвестиционную активность и уровень цифровизации управления перевозками. Для сопоставимой интерпретации данных использованы межрегиональный сравнительный анализ, SWOT- и PESTEL-анализы. Количественная проверка динамики параметров выполнена с применением корреляционного анализа (коэффициент Пирсона) между объёмами инвестиций, долей дорог в удовлетворительном состоянии и объёмом грузоперевозок. Для обоснования рекомендаций построены прогнозные оценки на 2025–2030 гг. методами экстраполяции и экспоненциального сглаживания (модель Холта). Подход к оптимизации транспортных потоков представлен в виде транспортной задачи линейного программирования, что позволяет оценить эффект перераспределения грузопотоков между ключевыми узлами при минимизации суммарных затрат на перевозки. Полученные результаты позволяют выделить приоритеты модернизации дорожной и логистической инфраструктуры, обновления автопарка, инвестиционной политики и внедрения цифровых решений управления перевозками.

Ключевые слова: автотранспортный комплекс, SWOT-анализ, PESTEL-анализ, грузоперевозки, современные технологии, конкурентоспособность, оптимизация.

Введение

Конкурентное задействование транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса Западного региона Казахстана представляет собой прикладной интерес для развития автотранспортных предприятий и усиления транспортной связанности территории, включающей Актюбинскую, Западно-Казахстанскую и Мангистаускую области. Расположение региона на ключевых направлениях, обеспечивающих транзитные и экспортно-импортные потоки между Европой и Азией, обуславливает повышенные требования к надежности и устойчивости перевозок, а также к уровню развития дорожно-транспортной и логистической инфраструктуры.

Актуальность исследования связана с увеличением объёмов грузоперевозок и усложнением логистических цепочек на фоне структурных преобразований в экономике. В такой ситуации результативность автотранспортного комплекса всё в большей мере зависит от состояния автомобильной сети, степени обновления подвижного состава, уровня развития логистических терминалов и масштаба внедрения цифровых систем управления перевозками, что прямо отражается на себестоимости и сроках доставки грузов, а также на конкурентных позициях региональных перевозчиков.

Цель исследования заключается в оценке транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса Западного региона Республики Казахстан и выявлении факторов, ограничивающих его использование. Для реализации поставленной цели предполагается: проанализировать основные характеристики инфраструктуры и автопарка, определить внешние и внутренние условия функционирования отрасли, обосновать приоритетные направления повышения эффективности перевозочного процесса и предложить рекомендации по модернизации инфраструктуры и совершенствованию логистического управления.

Научная новизна исследования заключается в разработке и апробации для Западного региона Республики Казахстан интегрированной схемы оценки транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса. Предложенный подход включает: 1) расчет интегрального индекса на основе нормированных инфраструктурных, транспортных, инвестиционных, логистических и технологических показателей; 2) количественную оценку взаимосвязи между объемом инвестиций, состоянием дорожной сети и объемом грузоперевозок; 3) сценарное прогнозирование ключевых параметров развития на 2025–2030 годы; 4) модель оптимизации распределения грузопотоков между опорными транспортными узлами региона.

В отличие от исследований, ограничивающихся преимущественно описательным анализом, разработанная схема позволяет не только фиксировать текущее состояние транспортно-логистической системы, но и выявлять количественные зависимости между инфраструктурными ограничениями и результативностью перевозочного процесса. Это обеспечивает возможность обоснования приоритетных направлений модернизации автотранспортного

комплекса, ориентированных на снижение удельных транспортных затрат на 8–12 % и улучшение прогнозных параметров его развития.

Материалы и методы

Интегральная оценка транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса Западного региона Республики Казахстан проведена с использованием сочетания данных официальной статистики, ведомственных источников и аналитических методов, что позволило обеспечить сопоставимость показателей по регионам и выделить факторы, сдерживающие развитие перевозочной деятельности.

Информационная база и временные рамки исследования. Эмпирическая база исследования (2019–2024 гг.) включает официальные статистические данные по Западному региону (Актюбинская, Западно-Казахстанская, Мангистауская области) и другим регионам РК по протяжённости и состоянию дорожной сети, структуре грузового автопарка, объёмам грузоперевозок, грузооборота и инвестиций в транспортную инфраструктуру, ведомственные и отраслевые материалы уполномоченных государственных органов (программные документы и отчётность), а также научные работы и отчёты международных организаций (Всемирный банк, ЕБРР), использованные для сопоставительного анализа и интерпретации данных.

2 Операционализация показателя «транспортно-логистический потенциал». Оценка транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса выполнялась по набору количественных индикаторов, отражающих состояние дорожной инфраструктуры (протяжённость сети, доля дорог в удовлетворительном состоянии), техническое состояние автопарка (число грузовых автомобилей, средний возраст и износ подвижного состава), развитость логистической инфраструктуры (количество логистических терминалов и узлов), результативность перевозок (объёмы грузоперевозок), инвестиционную активность (объёмы вложений в транспорт и сопутствующую инфраструктуру) и технологический уровень управления перевозками (степень внедрения цифровых решений – GPS-мониторинг, элементы автоматизации логистических процессов по данным отраслевых источников).

Для обеспечения сопоставимости разнородных характеристик и их перевода в единую количественную форму был рассчитан интегральный индекс транспортно-логистического потенциала региона (TLP-index). Его построение основывалось на нормированных показателях, сгруппированных в пять блоков: инфраструктурный, производственно-транспортный, инвестиционный, логистический и технологический. Нормирование исходных показателей осуществлялось методом min–max.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (1)$$

для стимуляторов, и

$$z_{ij} = \frac{x_j^{max} - x_{ij}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (2)$$

для дестимуляторов (например, средний возраст автопарка).

Интегральный индекс рассчитывался по формуле:

$$TLP_i = \sum_{j=1}^{n} w_j z_{ij} \quad (3)$$

где w_j – вес j-го показателя, $\sum w_j = 1$.

В базовой версии расчета применялось равновзвешенное агрегирование показателей. Для оценки устойчивости полученных результатов дополнительно был проведен анализ чувствительности, предусматривающий повышение весов инфраструктурного и инвестиционного блоков.

3 Методы анализа. Для получения верифицируемых и сопоставимых результатов в исследовании был использован комплекс взаимодополняющих методов. Выбор примененных методов обусловлен необходимостью перехода от описательного анализа автотранспортного комплекса к его формализованной оценке. Межрегиональное сопоставление использовалось для выявления относительных инфраструктурных и организационных диспропорций; корреляционно-регрессионный анализ – для количественной оценки согласованности динамики ключевых факторов; прогнозирование на основе модели Холта – для получения расчетных оценок по коротким временным рядам с выраженной трендовой составляющей; транспортная задача линейного программирования – для апробации вариантов снижения издержек при перераспределении грузопотоков. Применение данного комплекса методов обеспечило взаимосвязь диагностического, прогностического и прикладного уровней исследования в рамках единой аналитической схемы. Межрегиональный сравнительный анализ применялся для сопоставления показателей Западного региона с другими регионами Казахстана по ключевым индикаторам транспортно-логистического потенциала. SWOT-анализ позволил систематизировать сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы на основе количественных расчетов и результатов межрегионального сопоставления. PESTEL-анализ использовался для выявления политических, экономических, социальных, технологических, экологических и правовых факторов, влияющих на развитие автотранспортного комплекса, и для интерпретации их воздействия на существующие ограничения и перспективы роста.

Корреляционный анализ проводился в два этапа. На первом этапе рассчитывались парные коэффициенты корреляции Пирсона между объемом инвестиций, долей автомобильных дорог, находящихся в удовлетворительном состоянии, средним возрастом автопарка и объемом грузоперевозок. На втором

этапе для уточнения направленности выявленных взаимосвязей использовалась простая регрессионная модель, в которой объем грузоперевозок выступал зависимой переменной, а инвестиции, качество дорожной сети и возраст автопарка – объясняющими переменными. С учетом ограниченной длины временного ряда результаты данного этапа интерпретировались как оценка согласованности динамики показателей, а не как окончательное подтверждение причинно-следственных зависимостей.

Дополнительно применялось моделирование транспортной сети в форме классической транспортной задачи линейного программирования, что позволило определить варианты оптимизации распределения грузопотоков между ключевыми узлами Западного региона при минимизации совокупных транспортных затрат.

4 Методы прогнозирования. В целях обоснования выводов и практических рекомендаций по развитию автотранспортного комплекса Западного региона РК в исследовании использованы методы прогнозирования динамики ключевых показателей: объёма автомобильных грузоперевозок, объёма инвестиций в транспортную и дорожную инфраструктуру, доли автомобильных дорог в удовлетворительном состоянии и среднего возраста грузового автопарка. Прогноз построен на основе официальных статистических данных за 2019–2024 гг. на период 2025–2030 гг. с применением экстраполяции временных рядов (линейная и полиномиальная аппроксимация), а также метода экспоненциального сглаживания с трендом (модель Холта).

В модели Холта прогнозное значение показателя рассчитывается по формуле 4:

$$\hat{y}_{t+1} = l_t + b_t \quad (4)$$

где l_t характеризует сглаженный уровень временного ряда, а b_t – оценку трендовой составляющей.

В условиях ограниченности временного ряда по ключевым показателям рамками 2019–2024 гг. для построения прогноза были выбраны методы, применимые к коротким рядам наблюдений и позволяющие учитывать трендовую составляющую без излишнего усложнения модели. В качестве основной прогнозной модели использовалась экспоненциальная модель Холта, тогда как линейная и полиномиальная аппроксимации применялись как дополнительные инструменты для сравнительного анализа результатов. Для прикладной интерпретации полученных прогнозных оценок были разработаны три сценария развития: инерционный, сценарий умеренной модернизации и сценарий ускоренной модернизации. Различия между ними определялись темпами роста инвестиций, интенсивностью обновления автопарка и масштабами внедрения цифровых систем управления перевозками.

5 Обработка данных. Обработка и анализ исходной информации осуществлялись с использованием базовых статистических методов (группировка, расчёт

относительных величин, анализ динамики, представление результатов в табличной и графической форме). Такой подход позволил дать целостную характеристику текущего состояния автотранспортного комплекса и аргументировать приоритетные направления модернизации инфраструктуры и повышения результативности транспортно-логистической системы Западного региона.

6 Практическая апробация модели была проведена в целях проверки прикладной значимости предложенного подхода. В рамках апробации выполнено моделирование распределения грузопотоков между ключевыми транспортными узлами Западного региона – Актобе, Уральском и Актау. На основе матрицы удельных транспортных затрат, а также параметров предложения и спроса был рассчитан оптимальный план перевозок, что позволило определить направления, по которым снижение инфраструктурных ограничений обеспечивает наибольший экономический эффект. Данная постановка подтверждает возможность использования модели в качестве инструмента обоснования региональных инвестиционных приоритетов.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования показывают, что транспортно-логистический потенциал сектора автомобильных грузоперевозок в Западном Казахстане определяется главным образом состоянием дорожной сети, возрастной структурой автопарка, наличием логистических узлов и масштабом инвестиционной деятельности. Используя данные за 2019–2024 годы, исследование включает межрегиональное сравнение, расчет интегрированного индекса транспортно-логистического потенциала, корреляционный анализ, прогнозирование на 2025–2030 годы, а также модельную проверку оптимизации грузопотока между ключевыми узлами региона. Это позволило выйти за рамки общего описания сектора [1–4] и дать количественную оценку факторов, влияющих на эффективность грузоперевозок.

Для перехода от качеательного описания к формализованной оценке в исследовании последовательно были реализованы несколько аналитических этапов. На первом этапе рассчитан интегральный индекс транспортно-логистического потенциала, на втором – проведены межрегиональные сопоставления по его структурным компонентам, на третьем – выполнена статистическая проверка согласованности ключевых факторов, на четвёртом – осуществлено прогнозирование динамики показателей на 2025–2030 гг., а на заключительном этапе проведена модельная апробация оптимального перераспределения грузопотоков между опорными узлами региона.

Расчеты показывают, что для западного региона наиболее важны четыре группы факторов: качество дорожной сети, техническое состояние автопарка, уровень развития логистической инфраструктуры и инвестиционная активность. Именно в этих областях регион отстает от ряда сопоставимых территорий [5; 6], что делает их ключевыми приоритетами для дальнейшей модернизации.

Проведенный анализ [7–10] показывает, что цифровизацию управления транспортом, развитие терминальной инфраструктуры и постоянную

инвестиционную поддержку следует рассматривать не как второстепенные меры, а как ключевые условия для роста транспортно-логистического потенциала региона. Их влияние проявляется в снижении эксплуатационных расходов, сокращении времени обработки грузов и улучшении координации транспортных потоков.

Автотранспортный комплекс Западного региона Республики Казахстан представляет собой важный сегмент транспортной инфраструктуры страны, обеспечивающий как внутренние, так и международные перевозки, однако его ключевые параметры нуждаются в дополнительном анализе. Основная проблема связана с состоянием автодорог: более 10 000 км общественных дорог находятся в неудовлетворительном состоянии, около 30% их протяжённости требует ремонта (по данным Бюро национальной статистики РК и ведомственной отчётности МИИР/МТ РК за 2023–2024 гг.), что приводит к снижению скорости движения, увеличению расхода топлива и затрат на техническое обслуживание, а также росту риска дорожно-транспортных происшествий.

Существенным ограничением является также изношенность автопарка и применяемых технологий грузоперевозок: при наличии свыше 50 000 единиц грузового автотранспорта (по данным Бюро национальной статистики РК за 2024 г.) значительную долю составляют морально и физически устаревшие машины, что ведёт к росту эксплуатационных затрат и снижению надёжности функционирования. Дополнительно ситуацию осложняют недостаточная пропускная способность инфраструктуры, ограниченное количество логистических терминалов и отсутствие развитых систем управления грузовыми перевозками.

Одновременно в регионе прослеживаются предпосылки для дальнейшего развития: использование современных технологий, средств автоматизации и GPS-навигации позволяет оптимизировать маршруты и сокращать сроки доставки, а механизмы государственно-частного партнёрства открывают возможности для привлечения инвестиций в транспортную инфраструктуру. Последующие показатели рассчитаны по данным официальной статистики за 2019–2024 гг.; для сопоставления применялись значения за 2024 г. либо средние величины за указанный период. В таблице 1 приведён сравнительный анализ автотранспортного комплекса Западного региона с другими регионами Казахстана.

Таблица 1 – Сравнительный анализ

Показатель	Западный регион	Восточный регион	Северный регион	Южный регион	Центральный регион
Протяженность автодорог (км)	10,000	8,500	9,200	7,800	6,500
Доля дорог в удовл. состоянии (%)	70%	85%	80%	75%	90%
Количество грузовых автомобилей	50,000	45,000	60,000	55,000	40,000
Средний возраст автопарка (лет)	15	10	12	8	9
Объем грузоперев. (млн тонн)	5,5	6,0	7,5	8,0	4,5
Кол-во логистич. терминалов	10	15	12	8	5

Межрегиональное сравнение показывает, что основным ограничением в западном регионе является не протяженность дорожной сети, а более низкое качество инфраструктуры и менее эффективное ее использование. Несмотря на наличие одной из самых больших дорожных сетей, регион отстает по доле дорог в хорошем состоянии, среднему возрасту автопарка и количеству логистических терминалов. Это говорит о том, что будущий рост грузоперевозок будет в большей степени зависеть от модернизации существующей инфраструктуры и улучшения организационно-технологической базы транспортных операций, чем от простого расширения сети.

С целью усиления научной обоснованности выводов и перехода от описательного изложения к аналитическому моделированию на основе статистических данных за 2019–2024 гг. выполнён прогноз ключевых параметров развития автотранспортного комплекса Западного региона Республики Казахстан: объёма грузоперевозок автомобильным транспортом, объёма инвестиций в транспортно-дорожную инфраструктуру, доли автомобильных дорог в удовлетворительном состоянии и среднего возраста грузового автопарка. Прогнозирование проводилось методами экстраполяции временных рядов и экспоненциального сглаживания (модель Холта) на период 2025–2030 гг., что позволило учитывать устойчивые тенденции и сгладить краткосрочные флуктуации. В таблице 2 представлены результаты базового прогноза, полученные на основе модели Холта.

Таблица 2 – Реальные и прогнозируемые значения основных показателей автотранспортного комплекса Западного региона

Показатель	2019	2021	2023	2024	2025*	2027*	2030*
Объём грузоперевозок, млн тонн	4,8	5,1	5,4	5,5	5,7	6,1	6,8
Инвестиции в транспортную инфраструктуру, млрд тг	210	235	260	275	295	330	380
Доля дорог в удовлетворительном состоянии, %	66	68	69	70	72	75	78
Средний возраст грузового автопарка, лет	16,2	15,8	15,3	15,0	14,6	13,8	12,9
* прогнозные значения							

В целях разграничения базового прогноза и сценарного анализа необходимо отметить, что значения, представленные в таблице 2, отражают базовую траекторию изменения показателей. На её основе в дальнейшем были сформированы три сценария развития: инерционный, сценарий умеренной модернизации и сценарий ускоренной модернизации.

Прогнозные расчеты показывают, что при сохранении текущих тенденций потенциал западного региона будет реализован лишь частично: по инерционному сценарию объемы грузоперевозок к 2030 году достигнут лишь около 6,1 млн тонн. В то же время умеренная модернизация, основанная на стабильном росте

инвестиций и постепенном обновлении автопарка, позволяет достичь 6,8–7,0 млн тонн, а ускоренная модернизация повышает этот показатель до 7,3–7,6 млн тонн. Это означает, что различия между сценариями определяются не только объемом финансирования, но и тем, насколько сильно инвестиции сконцентрированы на ключевых коридорах, насколько быстро обновляется автопарк и насколько широко внедряется цифровое управление транспортом.

Вариант ускоренной модернизации, опирающийся на расширение инструментов государственно-частного партнёрства и приоритетное финансирование ключевых транспортных коридоров, даёт возможность прогнозировать более заметное улучшение состояния дорожной сети (до 78 % дорог в удовлетворительном состоянии) и устойчивый рост логистической результативности региона.

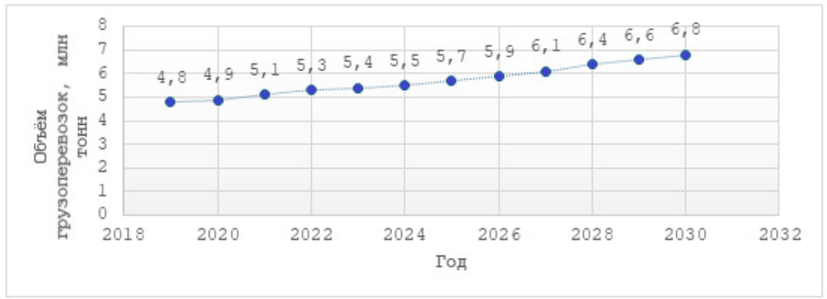


Рисунок 1 – Изменение и прогнозные значения объёма автомобильных грузоперевозок в Западном регионе Республики Казахстан в 2019–2030 гг

Таким образом, результаты прогнозных расчётов показывают, что при отсутствии ускоренной модернизации инфраструктуры и обновления автопарка потенциал развития автотранспортного комплекса Западного региона реализуется лишь частично, что свидетельствует о необходимости целенаправленных инвестиционных и управленческих мер.

Для количественной оценки связи между инвестициями и параметрами транспортно-логистического потенциала проведён корреляционный анализ по данным 2019–2024 гг. Рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между: объёмом инвестиций в транспортную инфраструктуру и долей дорог в удовлетворительном состоянии; объёмом инвестиций и объёмом грузоперевозок; долей дорог в удовлетворительном состоянии и объёмом грузоперевозок. Итоги приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Корреляционная матрица по данным 2019–2024 гг.

Показатели	Инвестиции, млрд тг	Доля дорог в удовлетворительном состоянии, %	Объём грузоперевозок, млн тонн
Инвестиции, млрд тг	1,00	0,82	0,88
Доля дорог в удовл.состоянии, %	0,82	1,00	0,79

Объём грузоперевозок, млн тонн	0,88	0,79	1,00

Корреляционный анализ подтвердил, что инвестиции являются одним из ключевых факторов роста транспортно-логистического потенциала региона. Наиболее сильные взаимосвязи были выявлены между объемом инвестиций и грузооборотом (r = 0,88), а также между инвестициями и долей дорог в хорошем состоянии (r = 0,82). Это указывает на то, что инвестиционная деятельность влияет не только на параметры инфраструктуры, но и на общую эффективность транспортных операций. При этом ее влияние проявляется через состояние автопарка, качество дорог и пропускную способность логистических узлов. Следовательно, инвестиции следует рассматривать как системообразующий фактор, действующий в сочетании с другими условиями модернизации.

Средний возраст автопарка Западного региона достигает 15 лет, что существенно превышает показатели Южного и Восточного регионов и ведёт к росту эксплуатационных расходов и снижению надёжности перевозок. Объём грузоперевозок здесь в несколько раз меньше, чем в Южном и Центральном регионах, что обусловлено слабым развитием логистической инфраструктуры, устаревшим подвижным составом и ограниченным количеством логистических терминалов, затрудняющих и замедляющих обработку грузов. Вместе с тем регион располагает значительным потенциалом развития автотранспортного сектора за счёт улучшения состояния дорожной сети, обновления автопарка, расширения логистической инфраструктуры, внедрения современных технологий и наращивания инвестиционной активности. Автотранспортный комплекс Западного региона является важным фактором обеспечения транспортной доступности и экономического роста, а степень реализации его потенциала определяется совокупным влиянием указанных условий, рисунок 2.

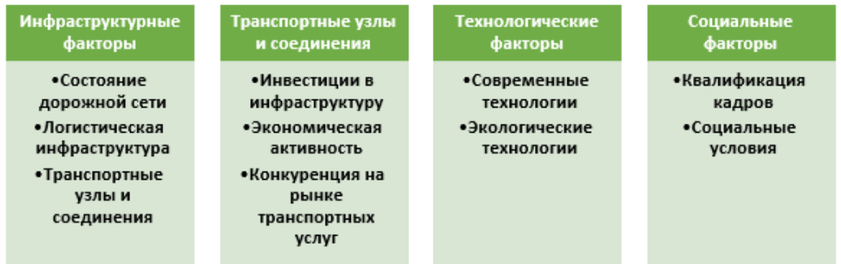


Рисунок 2 – Факторы, влияющие на потенциал автотранспортного комплекса Западного региона

Результаты факторной интерпретации свидетельствуют о неоднородном влиянии отдельных компонентов транспортно-логистического потенциала. Для Западного региона к числу ключевых ограничивающих факторов относятся: качество дорожной сети, оказывающее непосредственное влияние на стоимость

и надёжность перевозок; высокий средний возраст автопарка, обусловливающий рост эксплуатационных издержек; недостаточная обеспеченность логистическими терминалами и узлами, сдерживающая перераспределение грузопотоков; а также недостаточный уровень цифровой координации перевозочного процесса. В то же время транзитное положение региона и возможности привлечения инвестиций с использованием механизмов государственно-частного партнёрства формируют его потенциальные преимущества. Однако степень реализации этих преимуществ определяется темпами модернизации инфраструктуры и уровнем институциональной координации участников логистической системы.

Совместная интерпретация межрегионального сравнения, результатов прогнозирования и факторного анализа показывает, что сильные стороны западного региона заключаются в его транзитном положении, разветвленной дорожной сети и наличии ключевых транспортных узлов. Основные ограничения связаны с состоянием дорог, высоким средним возрастом автопарка и ограниченным развитием логистических терминалов. Возможности роста связаны с государственно-частным партнерством, расширением инвестиций и цифровизацией транспортных операций, в то время как основные риски обусловлены ростом эксплуатационных расходов и сохранением инфраструктурных узких мест.

Внешняя среда сектора автомобильного транспорта была дополнительно проанализирована с использованием подхода PESTEL. Результаты показывают, что политические и правовые факторы определяют стабильность инвестиций в инфраструктуру и реализацию государственно-частного партнерства, экономические факторы влияют на динамику затрат и спрос на транспортные услуги, технологические факторы определяют темпы цифровизации, экологические факторы направляют обновление автопарка, а социальные факторы влияют на доступность рабочей силы. При этом в данном исследовании эти факторы не рассматриваются как отдельный описательный блок, а анализируются с точки зрения их влияния на измеримые показатели потенциала транспортной и логистической отрасли.

В отличие от преимущественно описательного применения PESTEL-анализа, в данном исследовании внешняя среда рассматривается через её воздействие на измеряемые параметры транспортно-логистического потенциала. Политико-правовые факторы определяют масштабы и устойчивость инфраструктурных инвестиций; экономические – уровень эксплуатационных затрат и динамику спроса на перевозки; технологические – темпы сокращения транзакционных и операционных издержек; экологические – направления обновления автопарка; социальные – обеспеченность отрасли квалифицированными кадрами. В этой связи PESTEL-анализ используется не как автономный описательный раздел, а как аналитический инструмент интерпретации различий между сценариями развития.

В целом, результаты согласуются с теоретическими подходами в области управления цепочками поставок [4–8], оптимизации транспорта и устойчивого развития, но их практическая ценность заключается в адаптации к региональному уровню анализа. В отличие от общих описаний отраслевых проблем, данное

исследование фокусируется на количественной оценке того, как инфраструктура, инвестиции, а также организационные и технологические факторы влияют на эффективность грузоперевозок.

Для формализации подхода к оптимизации транспортных потоков в условиях Западного региона Республики Казахстан применена классическая транспортная задача линейного программирования, позволяющая определить план распределения грузопотоков между узлами сети при минимальных совокупных затратах на перевозку.

Обозначим через x_{ij} объём груза, перевозимого из пункта отправления i (поставщик/узел формирования груза) в пункт назначения j (потребитель/логистический узел), через c_{ij} – удельные транспортные затраты (тенге/т · км или тенге/т), через a_i – объём предложения (производство/отгрузка), а через b_j – объём спроса (потребление/перераспределение). Тогда постановка задачи записывается следующим образом:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij} \tag{5}$$

с ограничениями:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \le a_i, \quad i = 1, \dots, m \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \ge b_j, \quad j = 1, \dots, n \qquad x_{ij} \ge 0 \tag{7}$$

В модели в качестве узлов транспортной сети Западного региона рассматриваются основные центры формирования и перераспределения потоков (в частности, Актобе, Уральск, Актау), а матрица затрат c_{ij} формируется с учётом расстояний, состояния дорожного покрытия и действующих тарифов на перевозку.

Таблица 5 – Матрица удельных транспортных затрат c_{ij} между узлами Западного региона

Узел (i) → Узел (j)	Актобе	Уральск	Актау
Актобе	–	18	22
Уральск	17	–	25
Актау	21	24	–

Таблица 6 – Значения объёмов предложения и спроса в узлах транспортной сети

Узел	Предложение (a_i), тыс. т/год	Спрос (b_j), тыс. т/год
Актобе	420	350
Уральск	260	300
Актау	180	210
Итого	860	860

Транспортная задача была решена методом линейного программирования с использованием Excel Solver, в результате чего получен оптимальный план распределения потоков x_{ij}, минимизирующий общие затраты на перевозку (уравнение 2) за счёт перераспределения грузопотоков на направления с более низкими удельными затратами c_{ij} при соблюдении ограничений по объёмам предложения и спроса; полученный план x_{ij} далее использован для обоснования приоритетных направлений модернизации дорожной сети и развития логистических узлов, дающих наибольшее снижение издержек перевозочного процесса.

Таким образом, модель рассматривалась не только как формализованная математическая конструкция, но и как прикладной инструмент оценки экономического эффекта перераспределения грузопотоков и обоснования приоритетных направлений инфраструктурной модернизации.

Таблица 7 – Оптимальное распределение перевозок x_{ij}, тыс. т

Откуда \ Куда	Актобе (спрос 350)	Уральск (спрос 300)	Актау (спрос 210)	Предложение (a_i)
Актобе (420)	150	270	0	420
Уральск (260)	200	60	0	260
Актау (180)	0	0	180	180
Спрос (b_j)	350	300	210	860

Результаты транспортной модели показывают, что перераспределение грузовых потоков между Актюбе, Уральском и Актау на основе критерия минимизации затрат может снизить общие удельные транспортные издержки на 8–12 %. Основная выгода достигается за счет концентрации потоков по более дешевым маршрутам и сокращения доли перевозок по менее эффективной инфраструктуре. Это говорит о том, что даже без масштабного строительства, более эффективная организация грузовых потоков может служить самостоятельным источником повышения эффективности в секторе автомобильных перевозок.

Оптимальный план демонстрирует сосредоточение потоков на направлениях с более низкими c_{ij}, что обеспечивает минимизацию общих затрат при сохранении баланса между предложением и спросом.

В совокупности результаты показывают, что ограничения транспортно-логистического потенциала западного региона обусловлены не отдельными факторами, а их сочетанием: ограничениями инфраструктуры, устаревающим автопарком, недостаточно развитыми логистическими центрами и неполной цифровой координацией транспортных операций. Это подтверждает необходимость комплексного подхода к модернизации, сочетающего инвестиционные, организационные и технологические меры.

Анализ сценариев подтвердил, что без активной инвестиционной и технологической политики потенциал сектора автомобильных перевозок в западном регионе не будет реализован в полной мере. Инерционный сценарий отражает сохранение инфраструктурных ограничений, в то время как умеренная и ускоренная модернизация приводят к росту объемов грузоперевозок, улучшению

состояния дорог и снижению среднего возраста автопарка. Наибольший эффект достигается при сочетании роста инвестиций с развитием государственно-частного партнерства, модернизацией терминальной инфраструктуры и внедрением цифровых систем координации перевозок.

Сценарный анализ показывает, что без активной инвестиционной и технологической политики потенциал автотранспортного комплекса Западного региона реализуется лишь частично, тогда как переход к умеренному и ускоренному сценариям обеспечивает устойчивый рост и повышение эффективности транспортно-логистической системы. Вместе с тем прогнозы ограничены коротким временным рядом (2019–2024 гг.) и чувствительны к внешним шокам (цены на ГСМ, изменения транзитных потоков, регуляторные факторы), поэтому по мере появления данных за 2025–2026 гг. они подлежат пересмотру и уточнению.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования предложенного инструментария региональными органами управления транспортной сферой и логистическими операторами для ранжирования инфраструктурных проектов по ожидаемому эффекту, определения приоритетных направлений ремонта и модернизации дорожной сети, обоснования программ обновления автопарка, оценки целесообразности развития логистических терминалов и формирования сценариев цифровизации управления перевозочным процессом. В отличие от обобщённых рекомендаций, представленных в ряде обзорных исследований, предложенный подход обеспечивает увязку управленческих решений с количественно оцениваемыми параметрами ожидаемого транспортно-логистического эффекта.

Выводы

Проведённый анализ транспортно-логистического потенциала автотранспортного комплекса Западного региона Республики Казахстан выявил ряд системных ограничений: при одной из наибольших протяжённостей автодорожной сети (около 10 тыс. км) доля дорог в удовлетворительном состоянии ниже, чем в ряде других регионов, средний возраст грузового автопарка достигает около 15 лет, логистическая сеть включает лишь 10 терминалов. Прогнозирование временных рядов методом экспоненциального сглаживания (Holt) на период 2025–2030 гг. показало, что в инерционном сценарии объём грузоперевозок к 2030 г. составляет около 6,1 млн тонн при повышении доли дорог в удовлетворительном состоянии до 72–73 %, тогда как при сценариях умеренной и ускоренной модернизации (ежегодный рост инвестиций на 10–15 %, расширение ГЧП, цифровизация управления перевозками) объём перевозок возрастает до 6,8–7,6 млн тонн, а доля дорог в удовлетворительном состоянии – до 75–80 % и более, что свидетельствует о необходимости активизации инвестиционной политики.

Межрегиональное сравнение и факторный анализ показали, что ключевыми детерминантами развития автотранспортного комплекса выступают состояние дорожной сети, темпы обновления автопарка, уровень обеспеченности логистическими терминалами, инвестиционная активность и технологическое

оснащение перевозочного процесса (системы мониторинга и управления, GPS, автоматизация). Корреляционный анализ за 2019–2024 гг. дополнительно выявил тесную положительную связь между объёмом инвестиций, улучшением состояния дорожей и ростом грузоперевозок, что усиливает обоснованность мер по наращиванию инвестиций и модернизации инфраструктуры.

Теоретические подходы SCM и оптимизации транспортных потоков использованы как аналитическая основа интерпретации эмпирических данных: выявленные ограничения связаны с недостаточной координацией участников перевозочного процесса и инфраструктурно-технологическими разрывами. Формализация оптимизации перевозок в виде транспортной задачи линейного программирования показала, что перераспределение потоков между ключевыми узлами и устранение инфраструктурных «узких мест» снижает совокупные издержки и обосновывает приоритет модернизации коридоров с наибольшим эффектом в функции затрат. Результаты PESTEL-анализа подтвердили значимое влияние внешних факторов (государственная поддержка, макроэкономическая ситуация, регуляторные требования) на возможности обновления инфраструктуры и автопарка.

В 2025–2027 гг. необходимо обеспечить опережающий рост инвестиций в дорожную и логистическую инфраструктуру (не менее 10–15 % в год к уровню 2024 г.), поскольку сохранение текущего уровня финансирования фиксирует инерционный сценарий и сдерживает рост грузоперевозок и снижение издержек. Ключевые приоритеты укрепления транспортно-логистического потенциала Западного региона – модернизация и восстановление основных участков дорожной сети, обновление парка грузовых автомобилей, развитие логистических терминалов и узлов, расширение использования цифровых систем управления перевозками при скоординированном участии государства и бизнеса (включая механизмы ГЧП и программную поддержку инфраструктурных проектов).

Количественно обоснованные результаты исследования позволяют выделить следующие приоритетные направления развития автотранспортного комплекса Западного региона: увеличение доли автомобильных дорог, находящихся в удовлетворительном состоянии, до 75–80 % к 2030 году; снижение среднего возраста грузового автопарка до 13 лет и менее; расширение сети логистических терминалов и узлов до параметров, сопоставимых с регионами-лидерами; обеспечение устойчивого ежегодного прироста инвестиций в транспортную инфраструктуру на уровне не ниже 10–15 %; внедрение цифровых систем мониторинга и координации перевозок на ключевых маршрутах региона.

Обоснованность данных направлений подтверждается результатами корреляционного анализа, сценарного прогнозирования и модельной апробации транспортной задачи, выявившей возможность снижения совокупных удельных транспортных затрат на 8–12 % за счет рационального перераспределения грузопотоков. Это позволяет рассматривать предлагаемые меры не как декларативные положения, а как расчетно подтвержденные направления практической модернизации автотранспортного комплекса региона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Wedha, B.** Optimizing Transportation Logistics through Enterprise Architecture: A Case Study of Integrated Management Systems // Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing. – 2023. – № 5. – P. 693–702. – https://doi.org/10.47709/cnahpc.v5i2.2779.

2 **Sied, A.** A Study on Essential of Effective Transportation System for Supply Chain Efficiency, Cost Reduction and Enhancing Customer Satisfaction. – 2024. – https://doi.org/10.5281/zenodo.11124157.

3 **Pečený, L., Mesko, P., Kampf, R., Gašparík, J.** Optimisation in Transport and Logistic Processes // Transportation Research Procedia. – 2020. – № 44. – P. 15–22. – https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.003.

4 **Smirnov, A., Smolokurov, E., Mazhazhikhov, A., Tsukanova, E.** Innovations in passenger transport aimed at reducing the negative impact on the environment and the problems associated with their implementation // E3S Web of Conferences. – 2022. – №363(4). – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236303011.

5 **Сулейменов, Т. Б., Арпабеков, М. И.** Транспортная логистика (I часть): Учебник пособие для студентов технических специальностей вузов // ЕНУ имени Л. Н. Гумилева / Т. Б. Сулейменов, М. И. Арпабеков, – Астана, 2012. – 211 с.

6 **Султанов, М. К.** Развитие автотранспортного комплекса Казахстана: проблемы и решения // Журнал «Транспорт и логистика». – 2019. – № 12(3). – С. 45–52.

7 **Вечкинзова, Е. А.** Современные тенденции и перспективы развития транспортно-логистического комплекса Казахстана / Е. А. Вечкинзова // Экономика, предпринимательство и право. – 2020. – Т. 10. – № 12. – С. 3297–3308. – https://doi.org/10.18334/epp.10.12.111519.

8 **Петров, С. Е.** Информационные технологии в управлении грузоперевозками // Журнал информационных технологий. – 2020. – № 9(2). – С. 45–54.

9 Министерство транспорта РК. Стратегия развития транспортной инфраструктуры. – [Электронный ресурс]. – https://mt.gov.kz.

10 World Bank. Kazakhstan: Transport Sector Review. – 2021. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.worldbank.org

REFERENCES

1 **Wedha, B.** Optimizing Transportation Logistics through Enterprise Architecture: A Case Study of Integrated Management Systems // Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing. – 2023. – № 5. – P. 693–702. – https://doi.org/10.47709/cnahpc.v5i2.2779.

2 **Sied, A.** A Study on Essential of Effective Transportation System for Supply Chain Efficiency, Cost Reduction and Enhancing Customer Satisfaction. – 2024. – https://doi.org/10.5281/zenodo.11124157.

3 **Pečený, L., Mesko, P., Kampf, R., Gašparík, J.** Optimisation in Transport and Logistic Processes // Transportation Research Procedia. – 2020. – № 44. – P. 15–22. – https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.003.

4 **Smirnov, A., Smolokurov, E., Mazhazhikhov, A., Tsukanova, E.** Innovations in passenger transport aimed at reducing the negative impact on the environment and the problems associated with their implementation // E3S Web of Conferences. – 2022. – №363(4). – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236303011.

5 **Suleimenov, T. B., Arpabekov, M. I.** Transportnaya logistika (I chast): Uchebnik posobie dlya studentov tekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov [Transport logistics (Part I): Textbook for students of technical specialties of universities] // L. N. Gumilyov Eurasian National University / T. B. Suleimenov, M. I. Arpabekov. – Astana, 2012. – 211 p.

6 **Sultanov, M. K.** Razvitie avtotransportnogo kompleksa Kazakhstana: problemy i resheniya [evelopment of the motor transport complex of Kazakhstan: problems and solutions] // Journal «Transport and Logistics». – 2019. – № 12 (3). – P. 45–52.

7 **Vechkinzova, E. A.** Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya transportno-logisticheskogo kompleksa Kazakhstana [Modern trends and prospects for the development of the transport and logistics complex of Kazakhstan] / E.A. Vechkinzova // Economy, entrepreneurship and law. – 2020. – Vol. 10. – № 12. – P. 3297–3308. https://doi.org/10.18334/epp.10.12.111519.

8 **Petrov, S. E.** Informatsionnye tekhnologii v upravlenii gruzoperevozkami [Information technologies in freight transportation management] // Journal of Information Technologies. – 2020. – № 9(2). – P. 45–54.

9 Ministerstvo transporta RK. Strategiya razvitiya transportnoy infrastruktury [Ministry of Transport of the Republic of Kazakhstan. Transport Infrastructure Development Strategy]. [Electronic resource]. – https://mt.gov.kz.

10 World Bank. Kazakhstan: Transport Sector Review. – 2021. [Electronic resource]. – https://www.worldbank.org

Поступило в редакцию 19.02.26.
Поступило с исправлениями 02.03.26.
Принято в печать 22.05.26.

Т. С. Ибраимов[1], Ж. Ж. Альтаева[2], Н. С. Сауханов[3]
[1,2]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.
19.02.26 ж. баспаға түсті.
02.03.25 ж. түзетулерімен түсті.
22.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ БАТЫС АЙМАҒЫНЫҢ АВТОКӨЛІК КЕШЕНІНІҢ КӨЛІК-ЛОГИСТИКАЛЫҚ ӘЛЕУЕТІН БАҒАЛАУ

Бұл мақалада Қазақстан Республикасының батыс аймағындағы жол-көлік кешенінің көліктік-логистикалық әлеуеті жүк тасымалының тұрақтылығы мен халықаралық көлік ағындарына интеграциялануының факторы ретінде бағаланады. Эмпирикалық база 2019–2024 жылдарға арналған ресми статистика мен материалдарға, сондай-ақ халықаралық ұйымдардың жарияланымдары мен есептеріне негізделген. Көлік-логистикалық әлеует жол инфрақұрылымының жағдайын, көлік паркінің техникалық деңгейін, логистикалық хабтардың қолжетімділігін, тасымалдау тиімділігін, инвестициялық белсенділікті және тасымалдауды басқаруды цифрландыру деңгейін сипаттайтын көрсеткіштер жүйесі арқылы ашылады. Деректерді салыстырмалы түрде түсіндіруді қамтамасыз ету үшін аймақаралық салыстырмалы талдау, SWOT және PESTEL талдаулары қолданылды. Инвестиция көлемі, қанағаттанарлық жағдайдағы жолдардың үлесі және жүк тасымалы көлемі арасындағы корреляциялық талдауды (Пирсон коэффициенті) қолдана отырып, параметрлер динамикасын сандық тексеру жүргізілді. Ұсыныстарды негіздеу үшін экстраполяция және экспоненциалды тегістеу әдістерін (Хольт моделі) қолдана отырып, 2025–2030 жылдарға арналған болжамдық бағалаулар жасалды. Көлік ағындарын оңтайландыру тәсілі сызықтық бағдарламалау мәселесі ретінде ұсынылған, бұл бізге жүк ағындарын негізгі хабтар арасында қайта бөлудің әсерін бағалауға мүмкіндік береді, сонымен бірге жалпы көлік шығындарын азайтады. Алынған нәтижелер бізге жол және логистикалық инфрақұрылымды жаңғыртуға, автопаркті жаңартуға, инвестициялық саясатқа және цифрлық көлік басқару шешімдерін енгізуге басымдық беруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: автокөлік кешені, SWOT талдау, PESTEL талдау, жүк тасымалдау, заманауи технологиялар, бәсекеге қабілеттілік, оңтайландыру.

T. S. Ibraimov[1], Zh. Zh. Altaeva[2], N. S. Saukhanov[3]
[1,2]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe.
Received 19.02.26.
Received in revised form 02.03.26.
Accepted for publication 22.05.26.

ASSESSMENT OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS POTENTIAL OF THE MOTOR TRANSPORT COMPLEX OF THE WESTERN REGION OF KAZAKHSTAN

This article assesses the transport and logistics potential of the road transport complex in the western region of the Republic of Kazakhstan as a factor in the sustainability of freight transportation and integration into international transport flows. The empirical base is formed based on official statistics and materials for

2019–2024, as well as publications and reports of international organizations. The transport and logistics potential is revealed through a system of indicators characterizing the state of road infrastructure, the technical level of the vehicle fleet, the availability of logistics hubs, transportation efficiency, investment activity, and the level of digitalization of transportation management. An interregional comparative analysis, SWOT and PESTEL analyses were used to ensure a comparable interpretation of the data. A quantitative verification of the parameter dynamics was performed using correlation analysis (Pearson's coefficient) between investment volumes, the proportion of roads in satisfactory condition, and the volume of freight traffic. To substantiate the recommendations, forecast estimates for 2025–2030 were constructed using extrapolation and exponential smoothing methods (Holt's model). The approach to optimizing traffic flows is presented as a linear programming problem, allowing us to evaluate the effect of redistributing freight flows between key hubs while minimizing total transportation costs. The results obtained allow us to prioritize road and logistics infrastructure modernization, fleet renewal, investment policy, and the implementation of digital transportation management solutions.

Keywords: motor transport complex, SWOT analysis, PESTEL analysis, cargo transportation, modern technologies, competitiveness, optimization.

SRSTI 73.31.21

https://doi.org/10.48081/BGQF2244

N. Kamzanov[1], B. Asanov[2], A. Tashmuhanbetov[3], *A. Abekova[4]

[1,2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6907-8603

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

*e-mail: abekova310792@gmail.com

IMPROVING THE PRODUCTIVITY OF THE AUTOMOBILE ASSEMBLY LINE AT THROUGH REENGINEERING OF PROCESS OPERATIONS

This article examines ways of improving the productivity of a automobile manufacturer's assembly line through the re-engineering of technological and logistical operations. Particular attention is paid to the implementation of automated transport systems, including the EMS (Elevated Monorail System) conveyor and AGV (Automated Guided Vehicles), which are used in modern car manufacturing. The assembly shop at Hyundai Trans Kazakhstan, where automation elements have been implemented as part of the Industry 4.0 concept, is examined as the subject of the study. An analysis is carried out of changes to the production system before and after modernisation, including an increase in the number of assembly stations, the introduction of robotic systems and changes to the structure of in-shop logistics. Based on literature sources and practical data, the effectiveness of using EMS and AGVs within a unified production system has been substantiated. The research results demonstrate a reduction in transport operation times, an increase in the stability of the production flow, and a decrease in the level of work in progress. It has also been found that the most effective approach is a combined model utilising fixed conveyor systems and flexible transport vehicles. The conclusions drawn can be applied to the design and optimisation of production systems in the automotive industry. The proposed re-engineering model can be adapted for other enterprises in the automotive industry.

Keywords: re-engineering, AGV, assembly line, EMS system, productivity, Industry 4.0.

Introduction

Modern automotive plants are characterised by highly complex assembly processes, significant volumes of intra-workshop movements, and strict requirements for the synchronisation of operations. One of the key factors limiting productivity is the inefficient organisation of transport flows.

Traditional transport methods (manual delivery, use of forklift trucks) lead to increased waiting times, a build-up of work in progress and disruption to the assembly rhythm.

In these circumstances, it is essential to apply re-engineering approaches aimed at radically redesigning processes using modern automation technologies.

Business Process Reengineering involves a fundamental rethinking and radical redesign of processes to achieve significant improvements in performance indicators.

Issues concerning the improvement of production system efficiency through process re-engineering are widely discussed in contemporary academic literature. The concept of Business Process Reengineering, proposed in the works of Michael Hammer and James Champy [1], forms the basis of this field. The authors demonstrated the necessity of a radical overhaul of business processes to achieve a substantial increase in efficiency.

These ideas were further developed within the framework of the concept of Lean Manufacturing, based on the principles of the Toyota Production System [2]. In the works of Taiichi Ohno, it is shown that a significant proportion of waste is associated with transport and waiting [3].

Recent research in the field of Industry 4.0 confirms that AGVs are a key component of digital manufacturing systems [9; 10]. Their use enables increased productivity, reduced costs and improved safety in manufacturing processes.

According to research in the field of production automation, the introduction of AGVs reduces transport times by 20–50 % and improves the stability of production processes [5]. This is particularly relevant in mechanical engineering and aircraft manufacturing due to the complexity of logistics flows [6].

At the same time, scientific studies note that the maximum effect is achieved only through the comprehensive application of AGVs as part of process re-engineering, rather than through their isolated implementation [7].

More recent studies focus particularly on the tasks of optimising AGV routing and dispatching, which directly influence the efficiency of production systems [13;14].

Materials and methods

The methodology for investigating ways to improve productivity in the conveyor assembly line at an automotive plant is based on the principles of Business Process Reengineering and modern Industry 4.0 approaches, which involve the integration of digital technologies into production processes [9–10].

An analysis of the production system at Hyundai Trans Kazakhstan shows that the assembly shop uses an EMS (Elevated Monorail System) type automatic conveyor system, designed to transport car bodies between workstations.

An analysis of the structure of the EMS transport system reveals a branched rail network comprising straight, switch and curved sections of varying lengths. This system ensures strictly defined routes for the movement of car bodies and high synchronisation with the assembly line cycle.

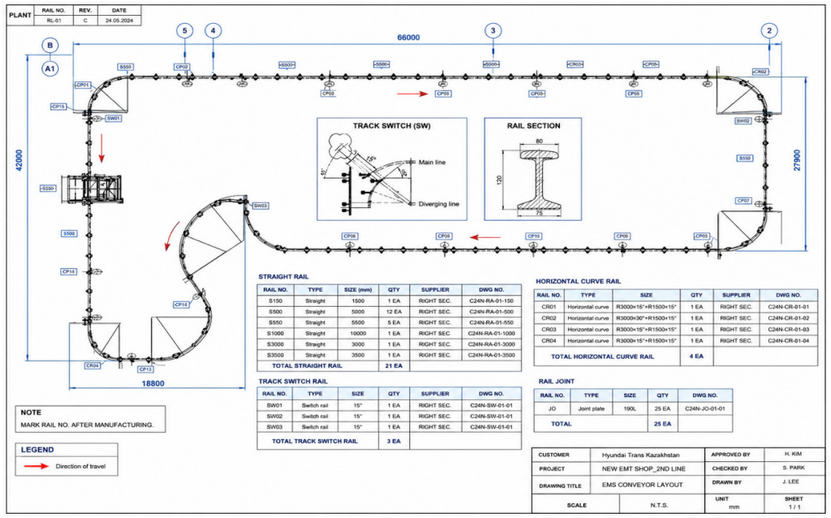


Figure 1 – Diagram of the EMS conveyor

1. STRAIGHT RAIL

RAIL NO.	TYPE	SIZE (mm)	Q'TY	BUS-BAR	DWG NO.
S01	Straight	6000L	10 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1101
S02	Straight	4150L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1102
S03	Straight	5850L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1103
S04	Straight	1450L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1104
S05	Straight	3330L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1105
S06	Straight	5535L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1106
S07	Straight	5460L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1107
S08	Straight	4010L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1108
S09	Straight	2430.8L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1109
S10	Straight (Repair rail)	6000L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1110
S11	Straight (End rail)	1200L	1 EA	NONE	C02-01-OP1111
TOTAL STRAIGHT RAIL			21 EA		

2. TRACK SWITCH RAIL

RAIL NO.	TYPE	SIZE (mm)	Q'TY	BUS-BAR	DWG NO.
SW01	Straight	1620L	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1130
SW02	Hor' curve rail	310+1500R×45°+352.6 (END 45°) BUS-BAR : IN SIDE	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1131
TOTAL TRACK SWITCH RAIL			2 EA		

3. HORIZONTAL CURVE RAIL

RAIL NO.	TYPE	SIZE (mm)	Q'TY	BUS-BAR	DWG NO.
C01	Horizontal curve	500+R2500x90°+500 BUS-BAR : IN SIDE	4 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1120
C02	Horizontal curve	500+R2500x120°+500 BUS-BAR : OUT SIDE	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1121
C03	Horizontal curve	500+R2500x120°+500 BUS-BAR : IN SIDE	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1122
C04	Horizontal curve	(END 45°)428.2+R2500x45°+500 BUS-BAR : IN SIDE	1 EA	RIGHT SIDE	C02-01-OP1123
TOTAL HORIZONTAL CURVE RAIL			7 EA		

NOTE
MARK RAIL NO. AFTER MANUFACTURING.

LEGEND
Rail
Direction of travel

Figure 2 – Specifications of EMS Conveyor Rail Components

Total length of straight sections: $L_{starting}$=39415 mm;
Total length of the EMS route:

$$L_{total}=39{,}4 \cdot 1{,}2 = 47{,}3m.$$

Duration of one complete cycle:

$$T = \frac{L}{V} = \frac{47,3}{1,5} = 31,5c; \quad (1)$$

Recording stops at checkpoints:

$$T_{stop} = 11 \cdot 12 = 132\ c$$

Total EMS cycle time:

$$T_{cycle} = T_{stop} \cdot T = 31,5 + 132 = 163,5\ c \quad (2)$$

The actual travel time for a single body via the EMS is 2.7 minutes.

An analysis of the EMS rail system's layout has shown that the average length of the transport route is approximately 47 metres, taking into account both straight and curved sections. At an average speed of 1.5 m/s, the travel time for a body is approximately 31 seconds.

Taking into account process stops at assembly stations (on average 10–12 operations), the total cycle time is approximately 2.5–3 minutes.

However, the fixed structure of the rail tracks limits the flexibility of the logistics system, which justifies the need to use alternative solutions, such as AGV trolleys, to improve the adaptability of in-plant logistics.

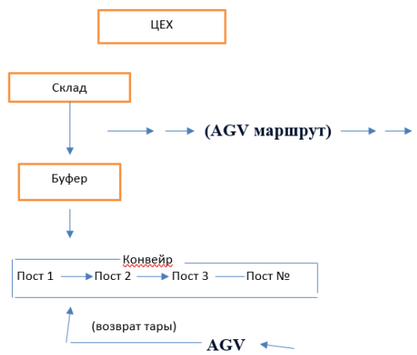


Figure 3 – AGV layout plan in the assembly hall

The number of AGVs is determined by:

$$N = \frac{Q \cdot T_{\text{пр}}}{3600 \cdot q} \quad (3)$$

where:

N – number AGV

Q – parts throughput (units per hour)

Тгр – Duration of a single transport cycle (sec)

q – capacity of a single AGV (units of cargo)

If the line's throughput is 30 AGVs per hour, each AGV requires 20 sets of parts. The parts flow is 600 units per hour. The AGV cycle time (round trip) is 300 seconds (5 minutes), with a capacity of 10 sets.

Therefore, the number of AGVs is 5. Adding a safety factor of 1.2 gives a total of 6

The calculation of the number of AGV trolleys has shown that 5 units of equipment are required to ensure an uninterrupted supply of components at the specified line throughput. Taking into account redundancy and possible downtime, it is advisable to use 6 AGVs, which ensures the stability of the logistics system and prevents any shortage in the supply of materials

Results and discussion

An analysis of the production system at the assembly workshop of Hyundai Trans Kazakhstan has shown that the company is currently undergoing an active transformation of its production processes in line with the principles of Industry 4.0 and lean manufacturing.

The assembly shop functions as the final stage of small-unit vehicle assembly, where the body is integrated following the welding, painting and polishing stages.

The implementation of EMS and AGV systems resulted in measurable operational improvements. In particular, the average transport time between assembly stations decreased from approximately 45–50 seconds to 30–35 seconds, corresponding to a reduction of nearly 30 %. The increase in the number of assembly stations from 16 to 25 improved line balancing and reduced workstation overloads. In addition, the introduction of automated logistics reduced the level of work-in-progress inventory and increased the stability of material supply to the assembly line. These indicators confirm the effectiveness of process re-engineering and automation within the Industry 4.0 framework.

As part of the analysis of the company's production system, a comparison of key indicators before and after modernisation was carried out. The results are presented in Table 1:

Table 1 – Comparison of key indicators before and after modernisation

Indicator	Before modernisation	After modernisation	Change
Assembly line length	16 stations	25 stations	+56%
Body transport method	partially mechanised	AGV trolleys + EMS conveyor	Automation
Number of AGVs	None	4 units (SM AGVs)	Implemented
Robotisation of operations	Limited	Yaskawa robots + manipulators	Extended
In-plant logistics	Disjointed	Partially automated	Improved
Number of staff	201 people	278 people	+38%

Material supply stability	Low / medium	Medium / high	Enhanced
Synchronisation with production line cycle time	Partial	Enhanced (EMS + AGV)	Enhanced
Level of automation	Medium	High (Industry 4.0 elements)	Increasing

Data analysis shows that the introduction of automated systems, including AGVs and robotic systems, has led to a significant increase in the level of automation, the stabilisation of logistics flows and an increase in production capacity.

One of the key outcomes of the re-engineering was the extension of the assembly line from 16 to 25 stations.

This has led to:

– a reduction in the workload at individual workstations;

– a more even distribution of operations;

– increased flexibility of the production flow;

– improved line balancing.

From a process re-engineering perspective, this aligns with the principle of redistributing operations to eliminate bottlenecks.

The implementation of AGVs has further contributed to improving logistics efficiency by reducing transport time by approximately 30 %, which is consistent with findings reported in the literature (20–50 %). This reduction leads to improved synchronisation between workstations, minimisation of delays, and a decrease in the level of work in progress. In addition, the automation of transport operations reduces the influence of human factors and increases the reliability of the production system.

From a system perspective, the most significant effect is achieved through the combined use of EMS and AGV technologies. The EMS system provides high stability, precise routing, and strict synchronisation with the production cycle, while AGVs introduce flexibility and adaptability to changing production conditions. Such a hybrid logistics model corresponds to modern Industry 4.0 concepts, where rigid and flexible systems are integrated into a unified digital production environment.

At the same time, the analysis has shown that the current use of AGVs is limited and does not yet cover all logistics operations within the workshop. Consequently, further improvements in productivity can be achieved through the expansion of AGV applications and their integration into a unified production management system. This includes the implementation of dynamic routing algorithms, integration with MES/ERP systems, and the use of digital twin technologies for real-time optimisation of logistics processes.

Overall, the results demonstrate that the re-engineering of technological and logistics operations leads to increased productivity, improved stability of material flows, and enhanced efficiency of the assembly process. However, the maximum effect is achieved not through isolated automation, but through comprehensive system-level re-engineering and integration of all elements of the production system into a single coordinated environment.

Conclusions

This study examines ways of improving the efficiency of the assembly line at an automotive plant through the re-engineering of production and logistics operations using automated guided vehicle systems.

An analysis of the production system at Hyundai Trans Kazakhstan has shown that the implementation of modern solutions, such as the EMS (Elevated Monorail System) conveyor system, robotic complexes and AGV trolleys, facilitates a transition to a higher level of automation in line with the Industry 4.0 concept.

It has been established that the use of the EMS system stabilises the flow of vehicle bodies, improves the synchronisation of operations and ensures positioning accuracy at assembly stations. At the same time, the use of AGV technologies increases the flexibility of in-plant logistics and reduces the production process's dependence on fixed infrastructure.

A comparative analysis showed that modernising the production line (increasing the number of stations, introducing automated systems and robotisation) leads to improved stability of material supply, reduced logistical delays and increased equipment utilisation.

However, it has been found that to achieve maximum efficiency, further development of an integrated logistics system is required, combining EMS and AGV into a single digital production environment.

Thus, the re-engineering of technological operations at the enterprise contributes to increased productivity, reduced losses and the formation of a sustainable 'smart manufacturing' model; however, further optimisation is possible through the expanded use of flexible automated guided vehicle systems and their integration into a unified production management system.

REFERENCES

1 **Hammer, M., Champy, J.** Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution [Text]. – New York : Harper Business. – 1993. – 223 p.

2 **Womack, J. P., Jones, D. T.** Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation [Text]. – New York : Simon & Schuster, 2003. – 396 p.

3 **Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J.** Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. [Text]. – Frankfurt : Acatech. – 2013. – 82 p.

4 **Vis, I. F.** A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems [Text] // European Journal of Operational Research. – 2006. – Vol. 170. – № 3. – P. 677–709.

5 **Boysen, N., Briskorn, D., Emde, S.** Sequencing of mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique [Text]. // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 192. – № 2. – P. 349–373.

6 **Groover, M. P.** Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. [Text]. — Upper Saddle River: Pearson, 2015. — 817 p.

7 **Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D.** Supply chain management in the era of Industry 4.0 [Text]. // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 181. – P. 97–109.

8 **Mehami, J., Nawi, M., Zhong, R.** Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0[Text] // Procedia Manufacturing. – 2018. – Vol. 26. – P. 1077–1086.

9 **Gnap, J., Kubasáková, I., Kubáňová, J., Pauer, D.** Application of automated guided vehicles in production logistics: case study [Text] // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – № 17.

10 **Tang, Q., Wang, H.** Data-driven scheduling optimization considering AGV obstacle avoidance [Text] // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15.

11 **Zhang, X. et al.** Intelligent AGV scheduling for manufacturing systems[Text]. // Swarm and Evolutionary Computation. – 2025.

12 **Azangoo, M., Taherkordi, A., Blech, J., Vyatkin, V.** Digital twin-assisted control of AGVs in manufacturing systems [Text] // IEEE Access. – 2021.

13 **Bui, V.-P. et al.** Digital twin for autonomous guided vehicles using integrated sensing and communication. – 2024.

14 **Iob, P., Schiavo, M., Cenedese, A.** Industrial AGV systems: architecture and implementation[Text]. – 2024.

Received 01.05.26.
Received in revised form 03.05.26.
Accepted for publication 12.05.26.

Н. Камзанов[1], Б. Асанов[2], А. Ташмуханбетов[3], *А. Абекова[4],
[1,2,3,4]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
01.05.26 ж. баспаға түсті.
03.05.25 ж. түзетулерімен түсті.
12.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АВТОМОБИЛЬ КӘСІПОРЫНДАРЫНДА АВТОМОБИЛЬДІ ҚҰРАСТЫРУ ЖЕЛІСІНІҢ ӨНІМДІЛІГІН ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ОПЕРАЦИЯЛАРДЫ ҚАЙТА ҚҰРУ АРҚЫЛЫ АРТТЫРУ

Мақалада автомобиль кәсіпорнының конвейерлік құрастыру өндірісінің өнімділігін технологиялық және логистикалық операцияларды реинжинирингтеу арқылы арттыру мәселелері қарастырылады. Заманауи автомобиль өндірісінде қолданылатын EMS (Elevated Monorail System) конвейері және AGV автономды көлік құралдарын қоса алғанда, автоматтандырылған көлік жүйелерін енгізуге ерекше назар аударылған. Зерттеу нысаны ретінде Hyundai Trans Kazakhstan кәсіпорнының құрастыру цехы алынған, онда Industry 4.0 тұжырымдамасы аясында автоматтандыру элементтері енгізілген. Модернизацияға дейінгі және кейінгі өндірістік жүйедегі өзгерістерге талдау жүргізілді, оның ішінде құрастыру станциялары санының артуы, роботтандырылған кешендердің енгізілуі және цехішілік логистика құрылымының өзгеруі қарастырылды. Әдеби деректер мен практикалық мәліметтер негізінде EMS және AGV жүйелерін біртұтас өндірістік жүйеде қолданудың тиімділігі негізделді. Зерттеу нәтижелері көлік операциялары уақытының қысқарғанын, өндірістік ағын тұрақтылығының артқанын және аяқталмаған өндіріс деңгейінің төмендегенін көрсетеді. Сонымен қатар, бекітілген конвейерлік жүйелер мен икемді көлік құралдарын біріктіретін аралас модельдің ең тиімді екені анықталды. Алынған қорытындыларды автомобиль өнеркәсібіндегі өндірістік жүйелерді жобалау және оңтайландыру кезінде қолдануға болады. Ұсынылған реинжиниринг моделі автомобиль өнеркәсібінің басқа кәсіпорындарына да бейімделуі мүмкін.

Кілтті сөздер: реинжиниринг, AGV, конвейерлік құрастыру, EMS жүйесі, өнімділік, Industry 4.0.

Н. Камзанов[1], Б. Асанов[2], А. Ташмуханбетов[3], *А. Абекова[4],
[1,2,3,4]Satbayev university, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 01.05.26.
Поступило с исправлениями 03.05.26.
Принято в печать 12.05.26.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОНВЕЙЕРНОЙ СБОРКИ АВТОМОБИЛЕЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ ЗА СЧЁТ РЕИНЖИНИРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

В статье рассматриваются вопросы повышения производительности конвейерной сборки автомобильного предприятия за счёт реинжиниринга технологических и логистических операций. Особое внимание уделено внедрению автоматизированных транспортных систем, включая конвейер EMS (Elevated Monorail System) и автономные транспортные средства AGV, применяемые на современном автомобильном производстве. В качестве объекта исследования рассмотрен сборочный цех предприятия Hyundai Trans Kazakhstan, где внедрены элементы автоматизации в рамках концепции Industry 4.0. Проведён анализ изменений производственной системы до и после модернизации, включая увеличение количества сборочных станций, внедрение роботизированных комплексов и изменение структуры внутрицеховой логистики. На основе литературных источников и практических данных выполнено обоснование эффективности применения EMS и AGV в единой производственной системе. Результаты исследования показывают снижение времени транспортных операций, повышение стабильности производственного потока и уменьшение уровня незавершённого производства. Также выявлено, что наиболее эффективной является комбинированная модель использования фиксированных конвейерных систем и гибких транспортных средств. Полученные выводы могут быть использованы при проектировании и оптимизации производственных систем в автомобилестроении. Предложенная модель реинжиниринга может быть адаптирована для других предприятий автомобильной промышленности.

Ключевые слова: реинжиниринг, AGV, конвейерная сборка, система EMS,, производительность, Industry 4.0.

ҒТАМР 73.31.41

https://doi.org/10.48081/BGQF2245

***А. К. Каукаров[1], Б. У. Жаманбаев[2], М. К. Куанышев[3],**
А. Ж. Мурзагалиев[4], Н. С. Сауханов[5]
[1,3,4,5]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[2]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5681-5469
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-9540
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8307-3675
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4964-681X
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7292-4752
*e-mail: altynbek-79@mail.ru

ІШТЕН ЖАНАТЫН ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРДАҒЫ ПОРШЕНДІК САҚИНАЛАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖЕТІЛДІРУ ЖОЛДАРЫ

Бұл мақалада ішten жану қозғалтқыштарының негізгі түйіні болып табылатын цилиндр-поршендік топтың құрылымындағы аса маңызды элемент – поршендік сақиналардың конструкциялық ерекшеліктері, олардың жұмыс режиміндегі жағдайы және жалпы қозғалтқыштың энергетикалық, экологиялық және механикалық тиімділігіне тигізетін ықпалы жан-жақты қарастырылды. Зерттеу барысында поршеньді сақиналардың негізгі функционалдық түрлері талданды: сығымдау, май қырғыш және қосарланған аралас, сонымен қатар олардың геометриялық пішінінің (бөшке тәрізді, конустық, тікбұрышты профильдер), бүйір бетінің конфигурациясының және жанасу бетінің модификациясының цилиндр аймағындағы ныгыздалуы мен үйкеліс деңгейіне әсері сипатталды. Пайдалану сенімділігіне қолданылатын әртүрлі материалдардың әсері көрсетілген: шойын, легирленген шойын, болат негізіндегі сақиналар және олардың тозуға төзімді жабындары: хром, молибден, нитрид, плазма. Сонымен бірге компрессиялық сақиналардың қазіргі заманауи нұсқаларына арналған патенттік зерттеу нәтижелері талданды. Әлемдік патенттік базалардағы инновациялық шешімдерге – қалыңдығын айнымалы ету, термоэластикалық деформацияны төмендететін арнайы ойықтар, төмен үйкелісті беттеме технологиялары, жарықшақтарды оптимизациялау және газ өткізбеу қабілетін арттыратын конструкциялық жаңалықтар жатады. Жүргізілген талдаулар ішten жану қозғалтқыштарының тиімділігін арттыруда поршендік сақиналардың құрылымдық параметрлерін жетілдірудің маңызды рөл атқаратынын көрсетті. Ғылыми жұмыстың басты мақсаты – заманауи материалдар мен инженерлік-конструкторлық әдістерді пайдалана отырып, поршендік сақиналардың құрылымын оңтайландыру арқылы үйкеліс пен тозуды азайту, цилиндр-поршендік топтың ресурсын ұлғайту және қозғалтқыштың энергия тиімділігін жоғарылату жолдарын анықтау болып табылады.

Кілтті сөздер: ішten жану қозғалтқышы, поршень, компрессиялық сақина, үйкеліс, цилиндр-поршендік топ, патенттік талдау.

Кіріспе

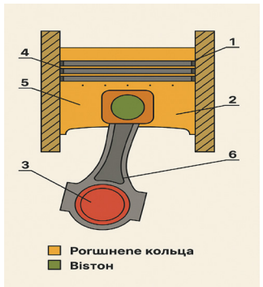
Елімізде автомобиль және қозғалтқыш өндірісін дамытуға үлкен мән берілуде. Қазақстанның көлік саласының қазіргі жағдайы өндірістің құлдырауымен, инвестициялық белсенділіктің төмендеуімен, бағалардың өсуімен, ішкі саяси тұрақсыздықпен сипатталатын ағымдағы жағдаймен анықталады. Бұл тасымалдауға сұраныстың төмендеуіне, оның көлемінің қысқаруына, көлік компанияларының қаржылық жағдайының нашарлауына, көлік құралдарының тозуы мен тозуына алып келді.

Мақсат – ең алдымен автокөліктің сенімділігі, қауіпсіздік талаптары және қоршаған ортаны қорғау көрсеткіштері бойынша халықаралық бәсекелестер деңгейіне жету. Осы бағыттарға байланысты ішten жану қозғалтқыштары (ІЖҚ) – автокөлік және машина жасау салаларында ең кең тараған қуат көздерінің бірі. Қозғалтқыштың тиімділігі мен сенімділігі оның цилиндр-поршендік тобының (ЦПТ) жұмысына тікелей байланысты. Бұл топтың негізгі элементтерінің бірі – поршендік сақиналар. Олар жану камерасындағы газдардың өтіп кетуін болдырмайды және май шығынын реттейді. Поршендік сақиналардың конструкциялық құрылымын жетілдіру ІЖҚ-ның қуатын, тиімділігін және ұзақ мерзімділігін арттырудың маңызды бағыты болып табылады.

Материалдар мен әдістер

Ғылыми зерттеу жұмыстарының барысында классикалық ішten жану қозғалтқыштарының цилиндр-поршендік тобының стандарттық конструкциялық сызбалары мен материалдық құрамдары талданып, яғни поршень, шатун, иінді білік және сақиналардың өзара әсер ету принциптері қарастырылды[1]..

ІЖҚ жұмысының тиімділігі мен сенімділігі ЦПТ құрамындағы барлық компоненттердің дұрыс өзара әрекеттесуіне байланысты (1-сурет).



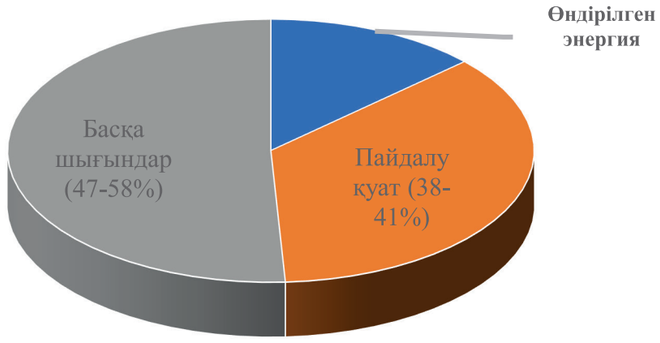
1-сурет – Қуатты цилиндр жүйесі
1 – цилиндр, 2 – поршень, 3 – иінді білік, 4 – поршендік сақиналар,
5 – поршеннің өстік бағыттаушысы, 6 – шатун

ЦПТ экстремалды жағдайларда жұмыс істейді – жоғары температура, үлкен жүктемелер және тұрақты үйкеліс оның функционалдығы мен ұзақ қызмет етуіне айтарлықтай әсер етеді. Цилиндрдегі жанармай қоспасы жанған кезде температура 2000–2500°C-қа дейін жетуі теориялық негізінде дәлелденген. Мұндай жоғары температура бөлшектердің термиялық кеңеюін, деформациясын және тіпті материал құрылымының өзгеруін тудыруы ықтимал.

ЦПТ жанармай жану және қысымды механикалық жұмысқа түрлендіру кезінде пайда болатын үлкен динамикалық жүктемелерді қабылдайды. Бұл жүктемелер қозғалтқыштың айналу жиілігі мен қуатына байланысты өзгереді. Цилиндр ішіндегі қысым камерасында, әсіресе жоғары айналымда жұмыс істегенде, 80–100 бардан асып кетуі мүмкін, бұл поршенге, шатунға және иінді білікке үлкен күштер түсіреді.

Поршень, цилиндр және сақиналар арасындағы үйкеліс қозғалыс кезінде үнемі жүреді, бұл ЦПТ-ның тозуына және тиімділігінің төмендеуіне әкеледі. Поршендік сақиналар тозуға аса бейім, себебі олар поршеннің цилиндр қабырғасына тығыз жанасуын қамтамасыз етуі керек.

Қазіргі іштен жану қозғалтқыштары жоғары тиімділігіне қарамастан, өндірілген энергияның тек шамамен 40 %-ын ғана пайдалы қуатқа айналдырады. Бұл энергияның 4–15%-ы үйкеліс салдарынан механикалық шығын ретінде жоғалады, ал қалған бөлігі – мысалы, жылу беру немесе газдардың өтіп кетуі сияқты басқа да шығындарға кетеді, бұл 2-суреттегі Ричардсонның зерттеуінде көрсетілген [2].



2 сурет – Іштен жану қозғалтқыштарындағы қуаттың бөлінуі

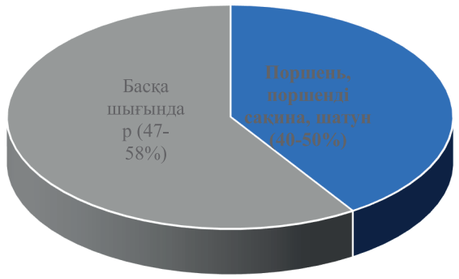
Механикалық үйкеліс шығындарының шамамен жартысы қуатты цилиндр жүйесіне – яғни поршенге, поршендік сақиналарға және шатунға тиесілі, бұл 2-суретте көрсетілген [2]. Қалған шығындар клапан механизмі жүйесі, иінді білік мойынтіректері және басқа құрамдастардағы үйкеліспен байланысты.

Механикалық үйкеліс шығындарының шамамен жартысы поршень, поршендік сақиналар және шатун кіретін қуатты цилиндр жүйесіндегі үйкеліс есебінен

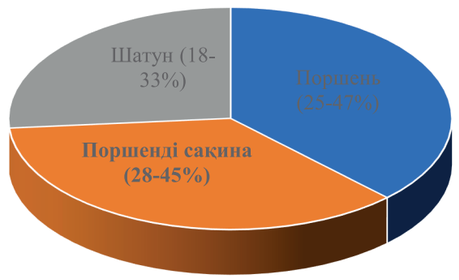
болады, бұл 3-суретте көрсетілген [2]. Қалған шығындар клапан механизмі жүйесі, иінді білік мойынтіректері және басқа да элементтердегі үйкеліс нәтижесінде туындайды.

Қуатты цилиндр жүйесіндегі поршень, поршендік сақиналар және шатун арасындағы үйкеліс шығындарының бөлінуі 4-суретте көрсетілген [2]. Көріп отырғанымыздай, үйкеліс шығындары бойынша ең үлкен үлес поршень мен поршендік сақиналарға тиесілі, шатунға қарағанда әлдеқайда жоғары.

Қуатты цилиндр жүйесіндегі поршень, поршендік сақиналар және шатун арасындағы үйкеліс шығындарының бөлінуі 4-суретте көрсетілген [2]. Бұл суреттен үйкелістегі ең үлкен шығын поршень мен поршендік сақиналар үлесіне тиесілі екені байқалады, шатунмен салыстырғанда әлдеқайда көп. Температураны бақылау және реттеу – жобалау кезінде ескерілетін негізгі аспектілердің бірі. Поршень жоғарғы компрессиялық сақинаны жоғарыға ығыстырып, оның поршень төбесінен арақашықтығын әдеттегі 7,5–8 мм-ден 3–3,5 мм-ге дейін қысқартады. Бұл конструкциялық ерекшелік 1990-жылдардың соңында поршень конструкциясына енгізілген және 1995 жылы шығарылған көптеген іштен жану қозғалтқыштарында кездеседі.



3-сурет – Үйкеліс салдарынан болатын механикалық шығындардың бөлінуі



4-сурет – Қуатты цилиндр жүйесіндегі үйкеліс шығындарының бөлінуі

ІЖҚ-дағы сығылу тактасы процесінің кезінде сақиналар арасындағы жүріс жолдарын азайту жанармайдың толық жанбай қалу ықтималдығын төмендетеді.

Жанудың бастапқы кезеңінде бұл аймақ процеске қатыспайды, бұл энергияның едәуір жоғалуына әкеледі. Алайда, сақинаның орнын өзгерту поршеннің құрылымдық тұтастығына әсер етуі мүмкін [3].

Бұл жұмыста поршеньдік сақиналарды жетілдірудің ұсынылған нұсқасы үйкеліс пен тозуды азайтуға бағытталған цилиндр поршенді топтың майлау үйкелісі мен сырғанау жұптарының тозуы туралы классикалық және заманауи ғылыми-практикалық идеяларды талдауға негізделген. Бұл мәселені шешу жанасатын беттерді лазерлік текстуралау сияқты заманауи әдістер мен тәсілдерді жүзеге асырумен байланысты, бұл әртүрлі конфигурациялардың микро тереңдіктерін құру арқылы майлау әсерін едәуір арттыруға және микродинамикалық мойынтіректің өте перспективалы әсерін қолдану мүмкіндіктерінің пайда болуына септігін тигізеді [4, 5, 6, 7].

Трибология ғылымының соңғы жетістіктері иондық майлау материалдарын зерттеумен, 3D беттерін сипаттаумен, майлау материалдарымен байланысты нанотрибологиядағы заманауи тенденциялармен, үйкеліс жұптарының беттерінің инновациялық жабындарымен, үйкеліс жұптарының конструкцияларында заманауи композиттік материалдарды қолданумен байланысты.

Майлау моделінің негізіне Паттер-Чанг моделі жатқызылады, ол майлау пленкаларының жұқа қабаттары үшін Рейнольдс теңдеулерін шешуге байланысты, өз кезегінде микро шығыңқы жерлер мен кедір-бұдырларды есепке алуға мүмкіндік береді. Есептеу аппараты сақиналарға бойлық және қалыпты қысым функцияларын, жұптасу жұбының кинематикалық және режимдік параметрлерін ескеретін көп қабатты құрылымдар үшін Арчард моделіне негізделген [8].

Молибден дитиокарбоматына (MoDTC) негізделген қоспаларды қолдану бұл болат пен алмаз тәрізді көміртекті (DLC) беттерде үйкелістің төмендеуін көрсетті, сонымен бірге DLC беттерінің тозуын арттырды. Алайда, гидрогенизацияланған DLC құрамында Mo бар тиісті қосылыстармен майланған кезде тозудың үдеуін көрсетпеді, бұл осы бағытта перспективаны ашады [9].

Поршеньдік сақина қатты дене ретінде емес, газ күштерінің әсерінен бұралып, бүгілуі мүмкін серпімді құрылым ретінде қарастырылады. ҚР патентімен қорғалған поршеньді сақиналардың түпнұсқа конструкциясы газ құрылымдарының түйісу алаңдары арқылы серпілісін азайтуға, құрамында графиті бар сақина толтырғыш материалының сақиналарды бұрау әсерін азайту арқылы сақиналар бетінің цилиндрлер гильзасымен түйісуінің конструктивті жергілікті ауданын сақтауға мүмкіндік береді.

Поршеньдік жүйелерде (қозғалтқыштарда) дәстүрлі металл сақиналарға балама ретінде немесе тығыздағыш элементтерінде қолданылатын жоғары температураға төзімді термоэластикалық материалдарға мыс пен графит қолданылды. Бұл материалдар үйкеліс коэффициентін азайтып, тозуға, химиялық әсерге және жоғары температураға (темір-графит жүйесінің фазалық диаграммасында эвтектикалық және эвтектоидтық түрленулердің температуралары сәйкесінше+738оС дан +1153°С-қа дейін) төзімділік танытады.

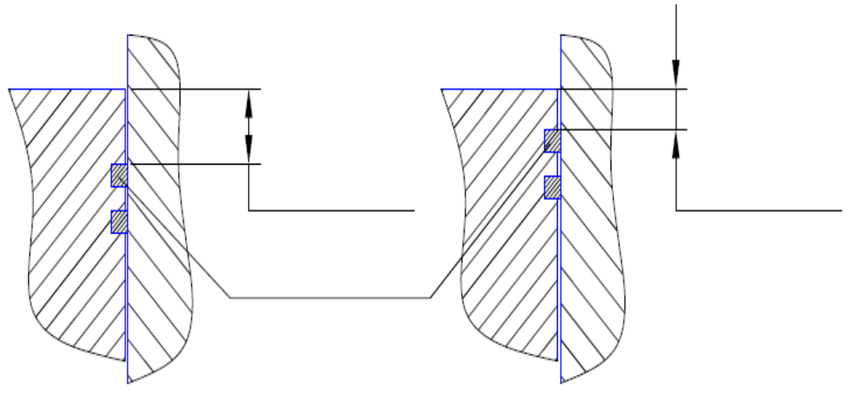
Ұнтақталған графит жылу техникасы саласында жоғары температурада жұмыс істейтін жылу оқшаулағыш материалдарды, термопараларды және басқа да компоненттерді жасау үшін қолданылады. Ол жоғары жылу өткізгіштікке және экстремалды жағдайларда тұрақтылыққа ие. Графит қалыпты пайдалану жағдайында адамдарға улы емес.

Бұл сақинаны жобалау кезінде ескерілетін екі негізгі факторлардың бірі. Ең алдымен, сақина мен поршеннің жоғарғы бөлігі 500°С-қа дейінгі температура әсеріне ұшырайды. Жоғары температура жағдайында материалдың деформациялану және беткі қабаттарда микроқатпарлардың пайда болу ықтималдығы артады. Поршень тәжіндегі (коронка) ойық аймағындағы материалдың қалыңдығы азайған сайын, жарықтардың пайда болу қаупі артады. Бұл жұмыс процесінде материал көлемінің азаюнан поршеннің әлсірейтіндігімен байланысты (5-суретте көрсетілген) [10].

Графитті қолдана отырып, композиттік поршеньдік сақиналардың кернеулі деформацияланған күйін зерттеу барысында әзірленген тәсілдің тиімділігін растайтын маңызды мәліметтер алынды. Нақты пайдалануға жақын жағдайларда материалдың әрекетін бағалау үшін статикалық және соққы жүктемелері қолданылды.

Сандық модельдеу әдістерін қолдану есептеулердің дәлдігін едәуір жақсартуға және поршеньдік сақиналардың конструкцияларын жобалау кезінде тәуекелдерді азайтуға мүмкіндік береді.

Жоғарыда айтылған мәселелерді болдырмау үшін поршеннің жоғарғы бөлігі анодтау процесінен өтеді. Бұл бөлшектің қызмет ету мерзімін арттыруы мүмкін. Алайда, анодталған поршень де жұмысқа оңтайлы температурадан жоғары жағдайда істен шығуы мүмкін. Расс Хейс поршенді жобалау кезінде жылуды тиімді өткізу үшін поршеннің жоғарғы бөлігінен төменгі жағына қарай конус тәрізді бет жасалғанын атап өтті. Поршень жұмыс істегенде жану процесі жүреді және ол біртіндеп қызып, бетінде жұқа тозған жолақ пайда болады [11].



5-сурет – Поршеньдік сақинаның орналасу орндарының өзгеруі

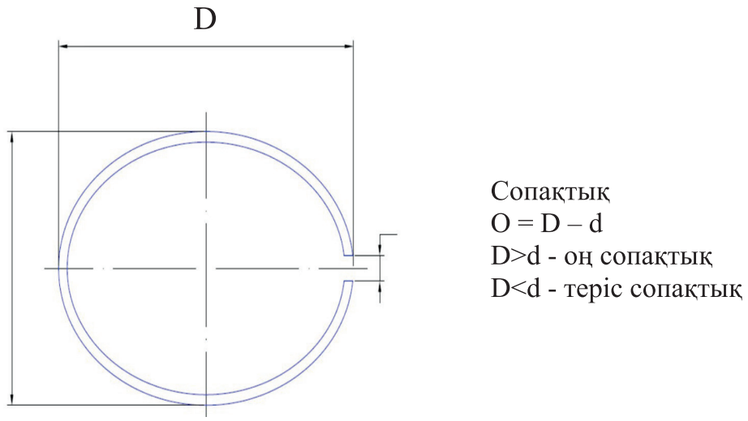
Поршень конструкциясының тағы бір ерекшелігі – оның жоғарғы бөлігінің диаметрі төменгі бөлігімен салыстырғанда кіші болуы. Бұл жоғарғы бөлікке жұмыс кезінде жылулық кеңею үшін көбірек орын береді. Соның арқасында поршень жоғары температураға деформациясыз төтеп бере алады.

Поршень конструкциясына өзгертуді еңгізудің нәтижесінде оның салмағы 750 г-нан 600 г-ға дейін азайтылды. Сонымен қатар, поршендік саусақтың өлшемін D=38,1/43,18 мм-ден D=30,48/33,02 мм-ге дейін өзгертуге мүмкіндік туды. Бұл ірі көлемді шатунды пайдалануға жағдай жасады, ал бұл өз кезегінде қозғалтқыштың айналу моментін жақсартып, мойынтіректер мен сақиналарға түсетін жүктемені азайтты.

Қарастырылған стандарттық поршень конструкциясында юбканың ұзындығы шамамен L=38,1 мм болады. Алайда жаңа үлгілерде бұл ұзындық L=30,48 мм-ге дейін қысқартылды. Бұл поршенді жетілдіруде бірқатар артықшылықтар береді. Бағыттаушы юбка ұзындығының қысқаруына байланысты тесіктен поршенге дейінгі саңылау қазір небәрі 0,04–0,06 мм-ді құрайды. Қазіргі уақытта кейбір поршень өндірушілері үйкеліс коэффициенті өте төмен жабындарды қолдануда, бұл нөлдік саңылаумен орнатуға мүмкіндік береді. Мұндай технология поршень мен цилиндр арасындағы үйкелісті азайтып, қозғалтқыштың тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз етеді [12].

Поршенді жобалаудағы тағы бір маңызды аспект – оның басы (тәжі). Оның күрделі конструкциясы жанармайдың тиімді жануын қамтамасыз етіп қана қоймай, жанармай мен ауа арасындағы арақатынасты да реттейді. Инженерлерді алаңдатқан ең үлкен мәселелердің бірі – детонация болды. Дегенмен, поршень жобалау саласындағы жетістіктердің арқасында қазір арнайы жану тәжінің пішіндерін жасауға болады, бұл қозғалтқыштың жоғары деңгейдегі детонацияға қауіпсіз төтеп беруіне мүмкіндік береді.

Поршенді іштен жану қозғалтқыштарды зерттеу мен әзірлеу саласында контакт қысымының таралуын сипаттайтын «сопақтылық» термині қолданылады [10]. Сақинаның сопақтылығын есептеу үшін бұрыштары 1800 тан 900 ығысуына байланысты 1800 нүктелеріндегі саңылау айырмасын анықтау қажет. Егер сопақтылық оң болса, бұл саңылау маңында (S) қысымның жоғары екенін көрсетеді. Егер сопақтылық теріс болса, онда керісінше, қысым төмен болады. Бұл 6-суретте көрсетілген.



6-сурет – Сақинаның конструктивті сопақтығы

Тікбұрышты қимасы бар компрессиялық сақина өзінің пішініне байланысты ол қалыпты пайдалану жағдайында жеткілікті деңгейде тығыздықты қамтамасыз етеді. Сақина параболалық беткеймен қапталуы немесе тегіс жиектермен фаскалануы мүмкін. Бұл үздіксіз майлау үшін жағдай жасауға мүмкіндік береді.

Поршень сақиналарының алдында тұрған әртүрлі тапсырмалар бір ғана сақина түрімен шешілмейді. Сондықтан қазіргі кезде қолданылатын поршень сақиналарының түрлерін классификациялау мағынаға ие болды. Бұл классификация DIN ISO 6621 стандартында көрсетілген, 7- суретке сәйкес.

Соңғы жылдары поршень сақиналарының ені айтарлықтай азайды. Бүгінде бензинді қозғалтқыштардағы жеңіл автомобильдердің компрессиялық сақиналары әдетте 1,2–1,0 мм енімен жасалады.

Олар сондай-ақ үйкеліс, сақиналардың дірілі және үрлеу тұрғысынан жақсы пайдалану қасиеттерін көрсетеді.

Сондықтан поршень сақиналарының ойықтарын дәл өңдеу өте маңызды. Радиалды поршень сақинасының енінің өстік поршень сақинасының енімен экстремалды қатынасы кезінде поршень сақиналары тұрақсыз болады.

Бірінші поршеньдік сақина жану камерасына жақын орналасқан, яғни ол өте жоғары механикалық және жылулық жүктемелерге ұшырайды.

Екінші поршеньдік сақина оның түріне байланысты екі функцияны орындайды: ол газ қысымын көтеріп, цилиндр қабырғасынан майды тазартады; сонымен қатар бірінші поршень сақинасына жеткілікті майлау қамтамасыз етуі керек. Екінші поршень сақинасы күшейтілген құрылыммен жасалған, бұл оған майды тиімді түрде тазартып, оның қосымша май түсіру сақинасы функциясын орындауына мүмкіндік береді. Зерттеу барысында анықталғандай, оң сопақтылық сақиналардың герметизациясын жақсартады, ал теріс сопақтылық май шығынын арттырады. Поршендік сақиналардың микрожабындары үйкеліс коэффициентін төмендетіп, қозғалтқыштың ресурсын арттырады. Жаңа технологиялар поршень

мен сақиналардың арасындағы саңылауды азайту арқылы қысу дәрежесін жоғарылатады.

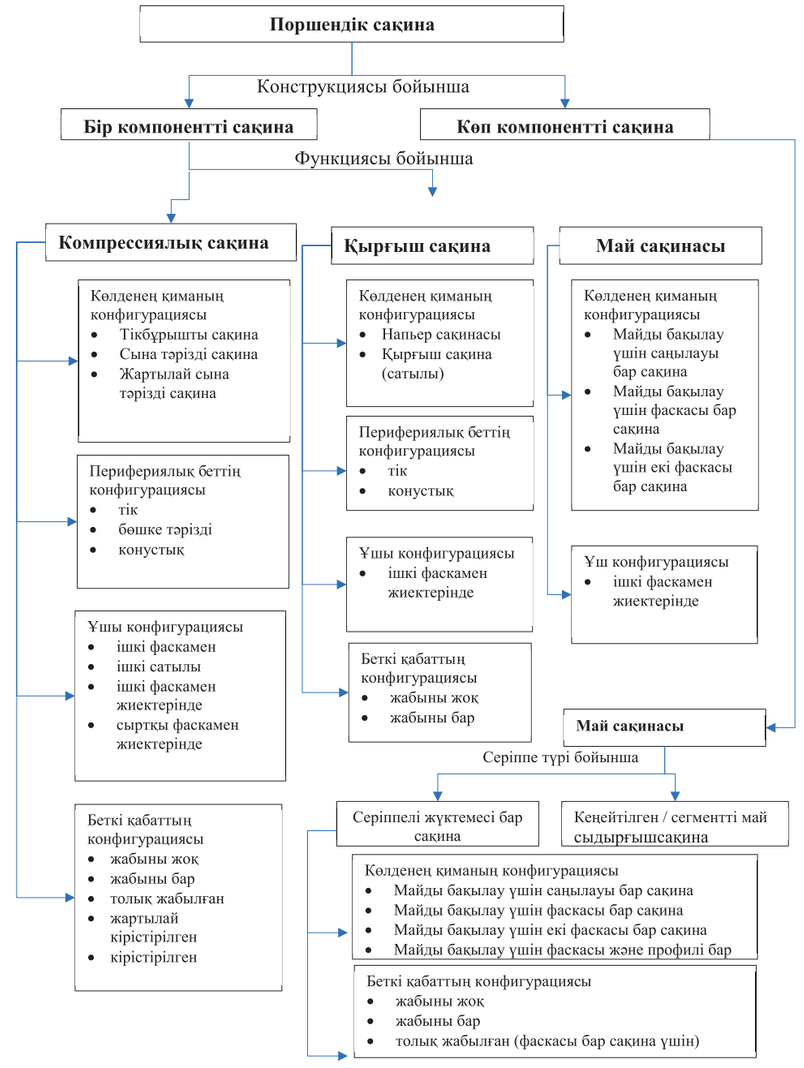
Ғылыми зерттеу барысында патенттік ақпараттың әртүрлі көздері қолданылды [13]:

– Жаһандық деректер базалары – Espacenet (Еуропалық патенттік ведомствосы) және WIPO Patentscope,

– Ұлттық патенттік базалар (USPTO (АҚШ), JPO, CNIPA (Қытай), Роспатент және т.б.),

– Іздеу жүйелері (Google Patents, freepatent.ru).

Ізденіс сұранысында халықаралық патенттік жіктеу (ХПЖ) бойынша F16J9/00 (поршендік сақиналар), F02F5/00 (цилиндр бөлшектері, поршендік сақиналар) және аралас кіші кластары, сондай-ақ «piston ring» (поршендік сақина), «compression ring» (компрессиялық сақина), «compression piston ring» (компрессиялық поршендік сақина), «piston ring for internal combustion engine» (ішten жанатын қозғалтқыштың поршендік сақинасы), «sealing ring for cylinder» (цилиндрге арналған тығыздағыш сақина), «ring coating for piston» (поршень сақинасының жабыны) сияқты негізгі сөздер, сондай-ақ басқа тілдердегі: ピストンリング (жапонша), 活塞环 (қытайша), «Kolbenring» (немісше) сөздер қолданылды.



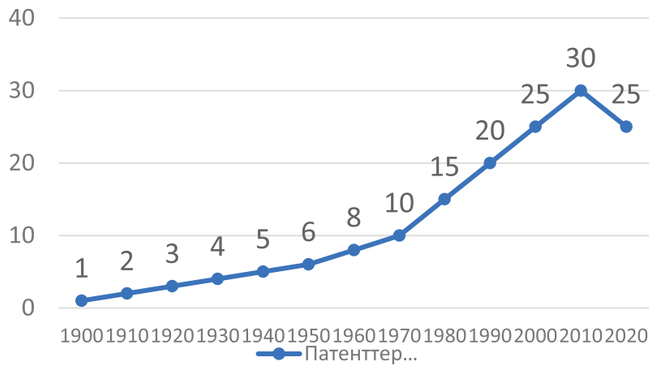
7-сурет – DIN ISO6621 бойынша поршень сақиналарының классификациясы [7]

Нәтижелер мен талқылау

Жүргізілген жаһандық ізденіс нәтижесінде поршеньді қысу сақиналары тақырыбы бойынша шамамен 2500–3000 сәйкес патенттер мен патенттік өтінімдер (кең мағынада, оның ішінде поршеньді үстіңгі тығыздағыш сақиналарға қатысты шешімдер) талданды, олардың ішінде 320 патент сәйкес деп таңдалды, ал 69 патент ішкі жану қозғалтқыштарына арналған қысу сақиналарына тікелей қатысты [14–17].

Тарихи тұрғыда поршендік сақиналар бойынша патенттік белсенділік қозғалтқыш жасау саласының дамуымен бірге айтарлықтай өсті. Егер XIX ғасырдың соңы – XX ғасырдың басында жыл сайын бірен-саран өнертабыстар тіркелсе (бірінші кесілген сақина, 1850-жылдардағы конструкциялардың жетілдірілуі), XX ғасырдың ортасына қарай патенттер ағыны жылына бірнешеуге, ал ғасыр соңында жылына ондаған патентке дейін артты.

1960-жылдары автомобиль өнеркәсібінің дамуымен сақиналардың жұмыс беттерін хромдау арқылы олардың тозуға төзімділігін арттыруға бағытталған көптеген патенттер пайда болды. 1980–1990-жылдары жаңа материалдар мен экологиялық талаптарға байланысты өтінімдер саны одан әрі өсті. Патенттік белсенділіктің шарықтау шегі 2000–2010 жылдарға келді, бұл кезде компрессиялық сақиналар тақырыбы бойынша жылына 20–30 жаңа патент жарияланған [14,15]. Соңғы жылдары патенттік белсенділіктің белгілі бір тұрақтануы немесе төмендеуі байқалды (2020 жылдары жылына ~ 15–20 патент), бұл поршеньдік сақина технологиясының белгілі бір қанығуымен және саланың басқа салаларға (мысалы, электромобильдердің дамуы) назарының ауысуымен байланысты болуы мүмкін. Нәтижесінде бірнеше мың патенттік құжаттары талдауға алынды.



9 сурет – Патенттік жарияланымдар санының жылдар бойынша таралуы

Жалпы алғанда, компрессиялық сақиналар бойынша патенттік ландшафт 150 жылдан астам уақытта қалыптасты және қарапайым шойын сақиналардан қатты материалдармен қапталған жоғары технологиялық бөлшектерге дейінгі технологиялар эволюциясын көрсетеді.

Көптеген патенттер осы материалдарды легірлеуге немесе жаңа қорытпаларды пайдалануға қатысты. Мысалы, жоғары жылу өткізгіштігі бар мыс қорытпалары қазіргі уақытта әртүрлі композиттік материалдар сияқты жоғарғы қысу сақиналары үшін кеңінен қолданылады. Жабындарға ерекше назар аударылады: хромдау (бұрын кеңінен қолданылған), нитридтер (CrN, TiN), алмаз тәрізді жабындар (DLC) және т.б. – барлығы патенттерде көрсетілген.

Қорытынды

Цилиндр-поршендік топ (ЦПТ) – іштен жанатын қозғалтқыштардың ең маңызды құрамдас бөлігі болып табылады, ол энергияны түрлендіруде және қозғалтқыштың сенімді жұмысын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Қазіргі іштен жанатын қозғалтқыштардың жоғары тиімділігіне қарамастан, энергияның едәуір бөлігі цилиндрлік күш жүйесінің құрамына кіретін поршень, поршень сақиналары және шатун сияқты бөлшектердегі үйкелістен жоғалады. Жұмыстық беттегі үйкелістің ең үлкен шығыны поршень мен поршень сақиналарына тиесілі. Бұл бөлшектердің жоғары температура, динамикалық жүктемелер және үйкеліс сияқты жұмыс жағдайлары олардың тозуына әкеліп, қозғалтқыштың жұмыс сапасына кері әсерін тигізеді.

Компрессиялық сақиналар тағайындалуына қарай әртүрлі пішін мен құрылыста болады. Кең таралған түрлерінің бірі – цилиндрлік жұмыс беті бар тіктөртбұрышты сақина. Сонымен қатар, конус тәрізді және бөшкетәрізді жұмыс беті бар сақиналар қолданылады, олар тозуды азайтып, қозғалтқыштың тиімділігін арттырады. Екінші поршень сақинасының ролі де маңызды – ол цилиндрдің қабырғасындағы майды алып тастап, бірінші сақинаның жақсы майлануын қамтамасыз етеді. Нарықта жеңіл автокөліктерден бастап коммерциялық энергетикалық қондырғыларға дейінгі түрлі типтегі поршень сақиналары ұсынылады.

Қарастырылған жаңа компрессиялық сақиналары іштен жанатын қозғалтқыштардың тиімділік жұмысына тиімді әсер етеді. Олар жану газдарының өтпеуін қамтамасыз ету, поршеннен жылуды шығару, поршеннің бойлық жүрісіндегі тербелісін азайту, үйкеліс коэффициентін төмендету және цилиндр бетінде майлы пленканы ұстап тұру сияқты бірнеше функцияларды атқарады. Бұл функцияларды дұрыс орындау үшін сақиналар қатаң конструкциялық және пайдалану талаптарына сай болуы қажет.

Басты назарға алынатын жайт – поршень сақиналарының жоғары геометриялық дәлдігі мен пішіні, олар газдардың өтуін болдырмау және майдың шығынын азайту үшін тығыз жанасуды және минималды саңылауларды қамтамасыз етуі тиіс. Сақиналардың минималды қалыңдығы үйкеліс күшін азайтып, қозғалтқыштың жалпы тиімділігін жақсартып, бөлшектердің қызмет мерзімін ұзартады.

Материал тұрғысынан поршень сақиналары жоғары жылу өткізгіштік қасиетке ие болуы тиіс, бұл поршеннен жылуды тиімді шығарып, цилиндр-поршень топ элементтерінің температурасын төмендетеді. Жоғары тозуға және жылуға төзімділік сақиналардың ұзақ қызмет етуіне қажет. Сонымен қатар, олардың коррозияға төзімділігі мен төмен тығыздығы қозғалтқыштың жалпы өнімділігін арттырып, механикалық шығындарды азайтады.

Осылайша, компрессиялық поршендік сақиналарының функциялары мен жұмыс шарттарын, сондай-ақ олардың конструкциясы мен материалдарына қойылатын талаптарды ескеру – қозғалтқыштың тығыздалу жүйесін сенімді әрі тиімді ету және оның жалпы жұмыстық ресурстарын арттыру үшін аса маңызды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Белоусов, Ю. А., Коган, Я. Д.** Теория и расчет двигателей внутреннего сгорания. – Москва : Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана. – 2019. – 520 с.

2 **Richardson, D. E.** Review of power cylinder friction for diesel engines // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2000. – Vol. 122. – № 4. – P. 506–519.

3 **Скубачевский, С. Е.** Двигатели внутреннего сгорания. Конструкция, теория, расчет. – Москва: Лань. – 2016. – 480 с.

4 **Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W.** Engineering Tribology. 4th Edition. Butterworth-Heinemann. – 2013. – 864 p.

5 **Путинцев, С. В., Аникин, С. А.** Математическое моделирование трибосопряжений поршневой группы ДВС. Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. – Серия Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 88–101.

6 **Etsion, I.** State of the Art in Laser Surface Texturing. Journal of Tribology. – 2005. – Vol. 127. – № 1. – P. 248–253.

7 **Richardson, D. E.** Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines. SAE Technical Paper. – 2000. – № 2000-01-2840. – https://doi.org/10.4271/2000-01-2840.

8 **Bayada G., Martin S., Vázquez C.** An Average Flow Model of the Reynolds Roughness Including a Mass-Flow Preserving Cavitation Model. Journal of Tribology. – 2005. – 127 (4). – P. 793–802.

9 **Yousfi, A. and Schipper, D. J.** Friction and Wear of DLC Coatings in Reciprocating Contacts. Tribology International. – 2015. – Vol. 82. – P. 51–59.

10 **Dickinson, M.** Dynamic Modelling of Compression Ring Conformability in High Performance Engines. – PhD Thesis. – London : Imperial College London. – 2014. – 207 p.

11 **Hayes, R.** Modern Piston Design for High-Performance Engines // Mechanical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 7. – № 2. – P. 34–42.

12 **Fedorov, A., Ivanov, S.** Analysis of Piston Ring Wear in Diesel Engines // Journal of Tribology. – 2021. – Vol. 143. – № 3. – P. 1–9.

13 DIN ISO 6621. Piston Rings. – Terminology. – Berlin : ISO. – 2019. – 55 p.

14 Eureka. Патентная и аналитическая платформа [Электронный ресурс]. – [Электронный ресурс]. – https://eureka.patsnap.com/application-patents-piston-rings (дата обращения: 10.10.2025).

15 IPqwery. Патенты на изобретение класса МПК F02F 5/00 [Электронный ресурс]. – [Электронный ресурс]. – https://www.ipqwery.com (дата обращения: 24.10.2025).

16 IPqwery. Патенты на изобретение класса МПК F16J 9/00 [Электронный ресурс]. – [Электронный ресурс]. – https://www.ipqwery.com (дата обращения: 07.11.2025).

17 Espacenet Patent Database (European Patent Office) [Электронный ресурс]. – https://worldwide.espacenet.com (дата обращения: 21.11.2025).

REFERENCES

1 **Belousov Yu. A., Kogan Ya. D.** Teoriya i raschet dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Theory and calculation of internal combustion engines]. – Moscow : ex-in MGTU im. N. E. Baumana, 2019. – 520 p.

2 **Richardson, D. E.** Review of power cylinder friction for diesel engines // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2000. – Vol. 122. – № 4. – P. 506–519.

3 **Skubachevskij S. E.** Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Konstrukciya, teoriya, raschet [Internal combustion engines. Construction, theory, calculation]. – Moscow: Lan Publ., 2016. – 480 p.

4 **Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W.** Engineering Tribology. 4th Edition. Butterworth-Heinemann. – 2013. – 864 p.

5 **Putincev S. V., Anikin, S. A.** Matematicheskoe modelirovanie tribosopryazhenij porshnevoj gruppy` DVS. [Mathematical modeling of tribo-conjugations of an internal combustion engine piston group]. Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The Mechanical Engineering series. – 2012. – № 2. – P. 88–101

6 **Etsion, I.** State of the Art in Laser Surface Texturing. Journal of Tribology. – 2005. – Vol. 127. – № 1. – P. 248–253.

7 **Richardson, D. E.** Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines. SAE Technical Paper. – 2000. – № 2000-01-2840. – https://doi.org/10.4271/2000-01-2840.

8 **Bayada G., Martin S., Vázquez C.** An Average Flow Model of the Reynolds Roughness Including a Mass-Flow Preserving Cavitation Model. Journal of Tribology. – 2005. – 127 (4). – P. 793–802.

9 **Yousfi, A. and Schipper, D. J.** Friction and Wear of DLC Coatings in Reciprocating Contacts. Tribology International. – 2015. – Vol. 82. – P. 51–59.

10 **Dickinson, M.** Dynamic Modelling of Compression Ring Conformability in High Performance Engines. – PhD Thesis. – London : Imperial College London. – 2014. – 207 p.

11 **Hayes, R.** Modern Piston Design for High-Performance Engines // Mechanical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 7. – № 2. – P. 34–42.

12 **Fedorov, A., Ivanov, S.** Analysis of Piston Ring Wear in Diesel Engines // Journal of Tribology. – 2021. – Vol. 143. – № 3. – P. 1–9.

13 DIN ISO 6621. Piston Rings. – Terminology. – Berlin : ISO. – 2019. – 55 p.

14 Eureka. Patentnaya i analiticheskaya platform [Patent and analytical platform]. – [Electronic resource]. – https://eureka.patsnap.com/application-patents-piston-rings (date of request: 10.10.2025).

15 IPqwery. Patenty` na izobretenie klassa MPK F02F 5/00 [IPC class patents F02F 5/00]. – [Electronic resource]. – https://www.ipqwery.com (date of request: 24.10.2025).

16 IPqwery. Patenty` na izobretenie klassa MPK F16J 9/00 [IPC Class patents F16J 9/00]. – [Electronic resource]. – https://www.ipqwery.com (date of request: 07.11.2025).

17 Espacenet Patent Database (European Patent Office) [Electronic resource]. – https://worldwide.espacenet.com (date of request: 21.11.2025).

08.12.25 ж. баспаға түсті.
01.02.25 ж. түзетулерімен түсті.
21.04.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. К. Каукаров[1], Б. У. Жаманбаев[2], М. К. Куанышев[3],
А. Ж. Мурзагалиев[4], Н. С. Сауханов[5]
[1,3,4,5]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Актобе;
[2]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;
Поступило в редакцию 08.12.25.
Поступило с исправлениями 01.02.26.
Принято в печать 21.04.26.

ПУТИ КОНСТРУКТИВНОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В данной статье подробно рассмотрены конструктивные особенности поршневых колец-важнейшего элемента в структуре цилиндро – поршневой группы, являющейся основным узлом двигателей внутреннего сгорания, их состояние в режиме работы и влияние на энергетическую, экологическую и механическую эффективность двигателя в целом. В ходе исследования были проанализированы основные функциональные типы поршневых колец: компрессионные, маслосъемные и двойные комбинированные, а также описано влияние их геометрической формы (бочкообразные, конические, прямоугольные профили), конфигурации боковой поверхности и модификации контактной поверхности на степень уплотнения и трения в области цилиндра. Показано влияние различных применяемых материалов на надежность эксплуатации: чугун, легированный чугун, кольца на основе стали и их износостойкие покрытия: хром, молибден, нитрид, плазма. В то же время были проанализированы результаты патентного исследования современных версий компрессионных колец. К инновационным решениям на мировых патентных базах относятся-изменение толщины, специальные пазы, снижающие термоэластическую деформацию, технологии бетонирования с низким коэффициентом трения, оптимизация трещин и конструктивные новшества, повышающие газонепроницаемость. Проведенный анализ показал, что важную роль в повышении эффективности двигателей внутреннего сгорания играет совершенствование конструктивных параметров поршневых колец. Основной целью научной работы является определение путей снижения трения и износа за счет оптимизации конструкции поршневых колец с использованием современных материалов и инженерно-конструкторских

методов, увеличения ресурса цилиндро-поршневой группы и повышения энергоэффективности двигателя.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, поршень, компрессионное кольцо, трение, цилиндро-поршневая группа, патентный анализ.

A. K. Kaukarov[1], B. U. Zhamanbayev[2], M. K. Kuanyshev[3],
A. Zh. Murzagaliev[4], N. S. Saukhanov[5]
[1,3,4,5]Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[2]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 08.12.25.
Received in revised form 01.02.26.
Accepted for publication 21.04.26.

WAYS OF CONSTRUCTIVE IMPROVEMENT OF PISTON RINGS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

This article discusses in detail the design features of piston rings-the most important element in the structure of the cylinder – piston group, which is the main unit of internal combustion engines, their condition in operation and the impact on the energy, environmental and mechanical efficiency of the engine as a whole. In the course of the study, the main functional types of piston rings were analyzed: compression, oil-removing and double combined, and the influence of their geometric shape (barrel-shaped, conical, rectangular profiles), configuration of the side surface and modification of the contact surface on the degree of sealing and friction in the cylinder area was described. The influence of various materials used on the reliability of operation is shown: cast iron, alloy cast iron, steel-based rings and their wear-resistant coatings: chromium, molybdenum, nitride, plasma. At the same time, the results of a patent study of modern versions of compression rings were analyzed. Innovative solutions on the world's patent databases include thickness changes, special grooves that reduce thermoelastic deformation, low-friction concreting technologies, crack optimization, and design innovations that increase gas tightness. The analysis showed that an important role in improving the efficiency of internal combustion engines is played by improving the design parameters of piston rings. The main purpose of the scientific work is to identify ways to reduce friction and wear by optimizing the design of piston rings using modern materials and engineering methods, increasing the life of the cylinder-piston group and increasing the energy efficiency of the engine.

Keywords: internal combustion engine, piston, compression ring, friction, cylinder-piston group, patent analysis.

МРНТИ 73.01.77

https://doi.org/10.48081/BGQF2246

***Ж. К. Кегенбеков[1], А. К. Конгуева[2], А. Н. Алипова[3],**
С. Бердали[4], М. Е. Каниев[5]
[1,2,3,4,5]Казахстанско-Немецкий университет,
Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8175-7440
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6338-1028
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5172-4687
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5856-4982
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6583-2559
*e-mail: kegenbekov@dku.kz

РОЛЬ ДАТА-ЦЕНТРИЧНОГО ПОДХОДА В ОБЕСПЕЧЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕПОЧЕК ПОСТАВОК СТРАТЕГИЧЕСКИХ МИНЕРАЛОВ

В условиях ускоренной цифровизации, глобальной декарбонизации и роста геополитической неопределённости устойчивость цепочек поставок полупроводников и стратегически значимых минералов приобретает ключевое значение для экономической и технологической безопасности государств. Настоящее исследование направлено на анализ структурных уязвимостей глобальных цепочек поставок критически важных ресурсов и обоснование потенциала дата-центричного подхода как инструмента повышения их резилентности. Методологическую основу исследования составляют анализ международных статистических баз данных, отраслевых аналитических отчётов, а также применение ресурсно-ориентированного подхода (Resource-Based View) в его расширенной сетевой интерпретации (network-RBV). Показано, что высокая концентрация переработки и технологических мощностей в ограниченном числе стран формирует системные логистические и институциональные риски, тогда как наличие сырьевой базы само по себе не обеспечивает устойчивых конкурентных преимуществ. Установлено, что Казахстан, обладая значительным потенциалом стратегических минералов и выгодным транзитно-географическим положением, остаётся преимущественно upstream-участником глобальных цепочек создания стоимости. Обосновано, что внедрение дата-центричного подхода, основанного на использовании больших данных, интернета вещей и методов машинного обучения, позволяет перейти от реактивного к предиктивному управлению цепочками поставок, повысить их прозрачность и адаптивность. Сделан вывод о целесообразности формирования в Казахстане дата-центричной логистической экосистемы, способной трансформировать роль страны в глобальных цепочках поставок от поставщика сырья к региональному аналитическому и логистическому хабу.

Ключевые слова: глобальные цепи поставок, полупроводники, стратегически значимые минералы, датацентричный подход, большие данные, интернет вещей (IoT), машинное обучение.

Введение

Мировая экономика переживает этап ускоренной трансформации, где переход к низкоуглеродной энергетике, цифровизация и рост потребности в высокотехнологичной продукции напрямую зависят от устойчивости поставок критически важных минералов (КВМ) и полупроводниковых материалов. Эти ресурсы становятся не просто сырьем, а основой стратегической безопасности и конкурентоспособности государств. В последние годы внимание исследователей и политиков сосредоточено не только на геологии и добыче полезных ископаемых, но и на том, как выстраиваются многоуровневые цепочки поставок, включающие транспорт, переработку, стандартизацию и торговлю.

Глобальная декарбонизация [1; 2] и цифровизация [3; 4] сталкиваются с физическими ограничениями цепочек поставок минералов и материалов [5]. Батареи, двигатели с постоянными магнитами, силовая электроника, электролизеры и современные полупроводники зависят от небольшого набора исходных материалов, добыча и переработка которых географически сконцентрированы. Международное энергетическое агентство (МЭА) сообщает, что средняя доля рынка трех ведущих стран по переработке ключевых энергетических минералов выросла с ~82 % в 2020 году до 86 % в 2024 году, причем примерно 90 % роста поставок приходится на одного ведущего поставщика в каждой цепочке создания стоимости (Индонезия для никеля; Китай для кобальта, графита и редкоземельных элементов) [6]. Прогнозируется, что концентрация останется высокой до 2035 года и снизится лишь незначительно, даже если объявленные проекты будут реализованы [7].

Казахстан, обладая значительным потенциалом в добыче и переработке стратегических минералов, а также географически выгодным положением на пересечении транзитных коридоров Евразии, может сыграть ключевую роль в формировании устойчивых и диверсифицированных цепочек поставок. Однако для этого необходимо переосмысление традиционных подходов к управлению логистикой и внедрение современных цифровых инструментов анализа и прогнозирования.

В «Стратегии развития Казахстана до 2050 года», в ежегодных Посланиях Президента Республики Казахстан Касым-Жомарта Токаева, а также в Национальном проекте «Устойчивое экономическое рост и развитие» подчёркивается необходимость укрепления экономической безопасности, повышения технологического суверенитета и интеграции Казахстана в глобальные цепочки добавленной стоимости.

Особое значение в контексте данного исследования имеет Послание Президента Республики Казахстан Касым-Жомарта Токаева от 8 сентября 2025 года, в котором обозначены ключевые ориентиры социально-экономического

и технологического развития страны. В документе подчёркивается необходимость ускоренной цифровизации, создания Министерства искусственного интеллекта и цифрового развития, принятия Цифрового кодекса и формирования экосистемы цифровых активов [7]. Эти инициативы свидетельствуют о стратегическом курсе государства на развитие дата-центричных решений и технологий обработки больших данных, что напрямую коррелирует с задачами исследования по повышению устойчивости цепочек поставок.

Президент также акцентировал внимание на необходимости сокращения зависимости от импортных поставок и укрепления национальной базы в стратегически важных отраслях. В этом контексте дата-центричный подход к управлению цепочками поставок полупроводников и критически значимых минералов становится инструментом, позволяющим не только снизить внешнюю уязвимость Казахстана, но и укрепить его позиции как надёжного звена глобальной экономики.

Кроме того, в Послании подчёркивается важность развития мультимодальных маршрутов и контейнерных перевозок, а также формирования эффективной тарифной политики с учётом различных видов транспорта. Эти приоритеты создают основу для практического применения цифровых и аналитических решений в логистике, позволяя обеспечить прозрачность, эффективность и резилентность транспортно-логистических систем.

Одним из наиболее перспективных направлений является дата-центричный подход, основанный на систематическом использовании больших данных, машинного обучения и инструментов предиктивной аналитики для мониторинга и оптимизации процессов в реальном времени. Такой подход позволяет не только повысить прозрачность цепочек поставок, но и предвидеть возможные сбои, минимизировать риски и выстраивать более резилентные (устойчивые и адаптивные) логистические системы.

Материалы и методы

Современная экономика всё более зависит от устойчивых поставок полупроводников и стратегически значимых минералов, таких как литий, кобальт, редкоземельные элементы, вольфрам, тантал и никель. Эти ресурсы являются основой для развития высокотехнологичных отраслей - электроники, возобновляемой энергетики, телекоммуникаций и военной промышленности. Нарушения в цепочках поставок напрямую влияют на национальную безопасность, цифровой суверенитет и конкурентоспособность стран.

Для проведения анализа были использованы:

– Международные статистические базы: UN Comtrade, USGS (United States Geological Survey), ITC Trade Map.

– Отраслевые отчёты: SEMI, IC Insights, McKinsey, BloombergNEF.

– Национальные документы: данные Бюро национальной статистики РК, Министерства транспорта РК, таможенной службы.

– Нормативно-правовая база: Послание Президента РК от 1 сентября 2023 г. и от 8 сентября 2025 г., где акцент сделан на цифровизации, развитии

обрабатывающей промышленности и внедрении дата-центричных технологий управления.

Мировой рынок полупроводников в 2023 г. составил около 520 млрд долл. США, ожидается рост до 1 трлн долл. к 2030 г. (таблица 1).

Казахстан входит в топ-10 стран по запасам урана, а также обладает значительными запасами лития, бериллия, вольфрама и редкоземельных металлов.

Рисунок 1 – Потенциал Казахстана в обеспечении стратегически значимыми минералами и редкоземельными ресурсами

Казахстан пока не имеет собственного производства полупроводников, но активно развивает политику по привлечению инвестиций в микроэлектронику (например, в рамках индустриальных зон и проектов с Китаем и Южной Кореей).

В Казахстане данная тема приобретает особое значение, учитывая наличие значительных запасов стратегических минералов и растущую интеграцию страны в глобальные производственно-логистические сети.

Казахстан играет роль стратегического поставщика сырья для Европы и Китая. Основные маршруты экспорта проходят через:

– Китай (авто- и ж/д транспорт, включая коридор Китай – Европа через Казахстан).

– Черное море и Каспий (коридор ТМТМ).

Проблема - низкая глубина переработки: Казахстан экспортирует в основном сырьё, а не готовые материалы для аккумуляторов или микросхем.

Таблица 1 – Мировой рынок полупроводников

№	Основные производители	Компании	Ключевая проблема	Логистические риски

1	Тайвань	TSMC, ≈ 60% мирового рынка контрактного производства	Географическая концентрация производства (более 80% высокотехнологичных чипов производится в Восточной Азии).	Зависимость от морских маршрутов через Тайваньский пролив и Южно-Китайское море
2	Южная Корея	Samsung, SK Hynix		
3	США	Intel, Qualcomm		
4	Китай	SMIC		
Примечание -составлено авторами на основании [6]				

Сбор и анализ данных о поставках и объёмах производства полупроводников и стратегически значимых минералов показывает, что Казахстан имеет уникальное преимущество как поставщик редких ресурсов, однако пока остаётся зависимым от импорта высокотехнологичной продукции. Применение дата-центричного подхода позволит повысить прозрачность, предсказуемость и резилентность цепочек поставок, что отвечает приоритетам, обозначенным в государственных стратегических документах и Посланиях Президента Республики Казахстан.

Настоящее исследование разработано с использованием ресурсно-ориентированного подхода (Resource-Based View, RBV) для анализа цепочек создания стоимости в сфере критически важных минералов. В рамках классической трактовки RBV устойчивое конкурентное преимущество связывается с обладанием ресурсами, обладающими характеристиками ценности, редкости, трудной имитируемости и незаменимости. Однако применительно к цепочкам критически важных минералов определяющее значение приобретает не столько наличие минерально-сырьевой базы как таковой, сколько совокупность организационных, институциональных и сетевых способностей, обеспечивающих доступ к перерабатывающим звеньям, технологическим стандартам и механизмам долгосрочной контрактной координации.

Предлагаемая концепция network-RBV рассматривает преимущества как результат оркестрации многоуровневых систем:

– upstream-доступ к лицензиям и правам на добычу;

– midstream-компетенции в разделении, рафинировании, металлургии, производстве магнитов и катализаторов;

– институциональные ресурсы в виде стандартов, протоколов сертификации, процедур лицензирования;

– социальный капитал - альянсы, оффтейк-контракты, совместные предприятия.

Ресурсно-ориентированный подход (Resource-Based View, RBV) с конца XX века занимает центральное место в теории стратегического менеджмента. В его основе лежит концепция, сформулированная в работах Э. Пенроуз (1959), Б. Вернерфельта (1984) и Дж. Барни (1991), согласно которой устойчивое конкурентное преимущество возникает в случае обладания организацией

ресурсами, характеризующимися ценностью, редкостью, трудной имитируемостью и незаменимостью (VRIN). В рамках классической интерпретации RBV к таким ресурсам относились материальные активы, технологические возможности, управленческие компетенции и организационные рутины, формирующие барьеры для имитации и обеспечивающие долгосрочную экономическую эффективность.

Одним из ключевых понятий расширенной сетевой интерпретации ресурсно-ориентированного подхода (Network-RBV) является кумулятивный эффект накопления знаний и доверия. Повторяющиеся взаимодействия между предприятиями, исследовательскими организациями и государственными структурами в рамках процедур сертификации, совместных поставок и технологических консорциумов приводят к возникновению нелинейного эффекта сетевого обучения. В результате формируются устойчивые институционализированные практики, включая стандартизированные протоколы обмена информацией, механизмы совместной верификации качества, а также неформальные репутационные барьеры для входа новых участников. Данные элементы обладают высокой степенью контекстной и исторической обусловленности, что делает их практически невоспроизводимыми в краткосрочной перспективе или в изолированном виде. Следовательно, конкурентоспособность цепочек поставок критически важных минералов определяется не отдельными технологиями или активами, а эмерджентными свойствами сети как социально-институциональной системы.

Для анализа устойчивости цепочек поставок стратегически значимых минералов и полупроводников использован комплексный междисциплинарный подход, объединяющий методы экономического анализа, сетевого моделирования и инструментов анализа данных. Методологическая база исследования включает статистический анализ международных торговых потоков, построение сетевой модели цепочки поставок и применение методов предиктивной аналитики для оценки логистических рисков [11].

Эмпирической базой исследования послужили международные статистические базы данных UN Comtrade, USGS (United States Geological Survey), ITC Trade Map, а также аналитические отчёты отраслевых организаций и исследовательских центров. Для анализа географии добычи, переработки и распределения стратегических минералов использованы агрегированные данные о производстве и торговых потоках, позволяющие определить степень концентрации глобальных цепочек поставок.

Для оценки устойчивости цепочек поставок применена модель интегрального индекса резилентности цепи поставок (Supply Chain Resilience Index), отражающая влияние ключевых структурных факторов:

$$SCI = \omega_1 H + \omega_2 D + \omega_3 T + \omega_4 R \quad (1)$$

где SCI – интегральный индекс устойчивости цепочки поставок;

H – индекс концентрации поставщиков (на основе индекса Херфиндаля – Хиршмана);

D – уровень цифровизации логистической инфраструктуры;

T – эффективность транспортной системы;

R – диверсификация маршрутов поставок;

w_i – весовые коэффициенты факторов [11].

Высокие значения индекса SCI свидетельствуют о более устойчивой и диверсифицированной структуре цепи поставок, способной адаптироваться к внешним шокам и геополитическим ограничениям.

Для анализа структуры глобальных цепочек поставок применён сетевой подход, в рамках которого цепочка поставок рассматривается как ориентированный граф:

$$G = (V, E) \quad (2)$$

где V – множество узлов (страны добычи, переработки, производства и логистические хабы);

E – множество связей, отражающих торговые и транспортные потоки между участниками цепочки поставок.

Использование графовой модели позволяет оценить центральность ключевых узлов, выявить структурные узкие места и определить потенциальные риски каскадных нарушений поставок.

Дополнительно для анализа потенциальных сбоев в цепях поставок применён сценарный подход и методы моделирования рисков. Вероятность возникновения логистических нарушений оценивается как функция совокупности факторов:

$$P_{distruption} = f\ (F_t, T_D, G_T)\pi r^2 \quad (3)$$

где $P_{disruption}$ – вероятность нарушения цепи поставок;

F_t – интенсивность торговых потоков;

T_d – задержки транспортировки;

G_r – уровень геополитических рисков.

Для повышения точности прогнозирования логистических процессов рассматривается использование методов машинного обучения, включая алгоритмы случайного леса (Random Forest) для прогнозирования спроса на транспортные мощности, рекуррентные нейронные сети (LSTM) для анализа временных рядов грузопотоков и методы Монте-Карло для моделирования сценариев сбоев поставок.

В рамках дата-центричного подхода цепочка поставок рассматривается как интегрированная цифровая система, в которой данные о производстве, транспортировке и торговых операциях агрегируются в единой аналитической

среде. Архитектура такой системы включает четыре функциональных уровня (рисунок 1).

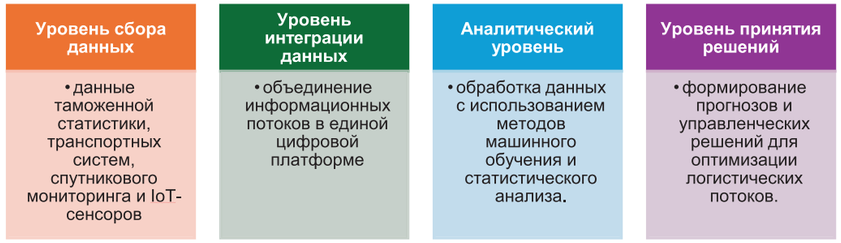


Рисунок 2 – Интегрированная цифровая система дата-центричного подхода цепочка поставок

Применение данной методологической рамки позволяет перейти от описательного анализа глобальных цепочек поставок к количественной оценке их устойчивости и моделированию возможных сценариев развития.

Результаты и обсуждение

Результаты проведённого исследования подтверждают, что устойчивость глобальных цепочек поставок полупроводников и стратегически значимых минералов в значительной степени определяется не только объёмами минерально-сырьевых ресурсов, но и уровнем цифровой зрелости логистических, производственных и институциональных механизмов их координации. Анализ статистических данных, международных аналитических обзоров и отраслевых отчётов выявил высокую степень концентрации перерабатывающих, производственных и технологических мощностей в ограниченном числе стран, что формирует системные логистические, экономические и геополитические риски для мировой промышленности.

В условиях возрастающей зависимости высокотехнологичных отраслей от стабильности поставок критически важных минералов и полупроводников даже локальные сбои способны вызывать масштабные последствия для глобальных производственных систем, международной торговли и технологической безопасности государств.

Дополнительно установлено, что существующие цепочки поставок характеризуются высокой степенью взаимосвязанности и чувствительности к внешним воздействиям, включая торговые ограничения, дефицит транспортной инфраструктуры, энергетические кризисы, колебания спроса, а также политические конфликты. В этой связи возрастает роль цифровых инструментов мониторинга, прогнозирования и управления цепочками поставок, включая технологии искусственного интеллекта, цифровых двойников, анализа больших данных и платформенной интеграции участников логистических сетей.

Одним из ключевых факторов роста значимости устойчивости цепочек поставок является динамичное расширение мирового рынка полупроводников, обусловленное ускоренным развитием цифровой экономики, искусственного

интеллекта, электромобилей, телекоммуникационных систем и технологий возобновляемой энергетики.

Рост спроса на высокотехнологичную продукцию приводит к увеличению потребности в стратегически значимых минералах и усиливает нагрузку на глобальные логистические сети. Динамика мирового рынка полупроводников представлена в таблице 1.

Таблица 2 – Географическая концентрация добычи и переработки критически важных минералов, используемых в полупроводниковой промышленности

Минерал	Основные страны-добытчики, доля %	Основные страны-переработчики, доля %
Редкоземельные элементы (REE)	Китай ≈ 69%	Китай ≈ 92%
	США ≈ 12%	
	Австралия ≈ 8%	
Литий	Австралия ≈ 47%	Китай ≈65% Чили ≈15% Аргентина ≈10%
	Чили ≈ 26%	
	Китай ≈ 18%	
Кобальт	ДР Конго ≈ 70%	Китай ≈73%
	Индонезия ≈ 6%	
	Россия ≈5%	
Никель (для баттарей)	Индонезия ≈48%	Китай ≈40% Индонезия ≈30% Индонезия ≈30%
	Филиппины ≈11%	
	Россия ≈9%	
Галий	Китай ≈80%	Китай ≈95%
	Германия ≈ 5%	
	Казахстан ≈ 2%	
Германий	Китай ≈ 68%	Китай ≈ 85%
	Канада ≈ 8%	
	Россия ≈ 6%	
Примечание -составлено авторами на основании [6;7].		

Результаты анализа мирового рынка полупроводников и критически важных минералов свидетельствуют о выраженной асимметрии между странами-добытчиками и странами - держателями технологий глубокой переработки и производства конечной продукции. Высокая степень концентрации добычи и особенно переработки и производства конечной продукции. Высокая степень концентрации добычи особенно переработки стратегических минералов подтверждается данными, предоставленными в таблице 2.

Несмотря на наличие значительных запасов стратегических минералов, Казахстан, как и большинство ресурсно-ориентированных экономик, остаётся преимущественно upstream-участником цепочек создания стоимости. Это подтверждает вывод о том, что наличие редких ресурсов само по себе не формирует устойчивого конкурентного преимущества в логике классического RBV, если оно сопровождается развитием перерабатывающих, логистических компетенции.

Долгосрочный рост спроса на критически важные минералы, используемые в высокотехнологичном производстве, иллюстрируется динамикой мирового производства редкоземельных металлов.

Выявленные логистические риски включают:

– зависимость от ограниченного числа транспортных коридоров;

– высокую чувствительность к геополитическим ограничениям;

– недостаточную прозрачность потоков сырья и полуфабрикатов;

– отсутствие механизмов раннего предупреждения сбоев поставок.

Эти факторы усиливаются при экспорте сырья без глубокой переработки, что ограничивает возможности страны по управлению ценовыми и контрактными рисками.

Таблица 3 – Типология участия стран в глобальных цепочки создания стоимости

Тип участия	Характеристика	Примеры стран
Upstream	Добыча сырья	Казахстан, Перу, Чили
Midstream	Переработка	Китай
Downstream	Высокотехнологичное производство	США, Тайвань, Южная Корея
Data-driven	Аналитика и координация потоков	ЕС
Примечание -составлено авторами на основании [8]		

Внедрение дата-центричного подхода способно существенно повысить резилентность цепочек поставок за счёт интеграции разрозненных потоков данных в единую аналитическую среду. Использование больших данных, IoT-сенсоров и алгоритмов машинного обучения позволяет:

– повысить точность прогнозирования спроса и транспортной загрузки;

– сократить временные лаги в принятии управленческих решений;

– выявлять узкие места в мультимодальных маршрутах;

– моделировать сценарии сбоев и их каскадные эффекты.

Особое значение имеет переход от реактивного управления логистикой к предиктивному, при котором решения принимаются на основе вероятностных сценариев, а не постфактум. Для Казахстана это открывает возможность трансформации транзитной функции в активную роль логистического и аналитического узла региональных цепочек поставок.

Для обоснования возможности перехода от ресурсно-ориентированной модели участия Казахстана в глобальных цепочках поставок к модели логистического и аналитического хаба в исследовании были систематизированы количественные и институциональные показатели, отражающие транспортно-географические преимущества страны, уровень цифровизации логистической инфраструктуры и потенциал создания добавленной стоимости за счёт внедрения дата-центричных решений. Таблица 4 агрегирует ключевые статистические индикаторы, характеризующие текущую роль Казахстана в евразийских транспортных и производственных цепочках, а также его позиционирование с точки зрения логистической эффективности и цифровой готовности.

Для количественной оценки устойчивости цепочек поставок стратегических минералов предложена интегральная модель индекса резилентности цепи поставок (Supply Chain Resilience Index – SCRI), которая учитывает структурные, логистические и цифровые параметры системы:

$$SCRI = \alpha(1 - HHI) + \beta D + \gamma T + \delta S \quad (4)$$

где SCRI – интегральный индекс устойчивости цепи поставок
HHI – индекс концентрации поставщиков (Herfindahl–Hirschman Index):

$$HHI = \sum_{i=1}^{n} s_i^2 \quad (5)$$

где s_i – доля i-го поставщика на рынке.
D – уровень цифровизации логистической инфраструктуры
T – эффективность транспортной системы
S – диверсификация логистических маршрутов
α, β, γ, δ – весовые коэффициенты факторов устойчивости.

Интерпретация модели показывает, что устойчивость цепи поставок возрастает при снижении концентрации поставщиков, повышении уровня цифровизации логистических процессов и расширении альтернативных транспортных маршрутов (таблица 4).

Таблица 4 – Сценарный анализ сбоев в цепочках поставок стратегических минералов

Сценарий	Тип риска	Возможное влияние	Потенциальные последствия
Геополитическая эскалация в Восточной Азии	Производственный	Снижение поставок микрочипов на 30–40%	Рост цен на электронику
Ограничение экспорта редкоземельных элементов	Ресурсный	Дефицит сырья для магнитов и батарей	Замедление развития ВИЭ
Нарушение морских маршрутов	Логистический	Увеличение времени доставки на 25–40%	Рост транспортных издержек
Санкционные ограничения	Институциональный	Перераспределение торговых потоков	Перестройка глобальных цепочек
Примечание -составлено авторами на основании [11]			

Обсуждение результатов позволяет сделать вывод о том, что для Казахстана ключевым направлением является не только развитие добычи стратегических минералов, но и формирование дата-центричной логистической экосистемы, интегрированной с международными цепочками поставок. Это включает:

– развитие цифровых платформ мониторинга экспортных потоков;

– интеграцию транспортных, таможенных и производственных данных;

– поддержку совместных проектов с зарубежными перерабатывающими и технологическими партнёрами;

– формирование институциональных стандартов обмена данными.

В совокупности это создаёт предпосылки для перехода от ресурсной модели участия в глобальных цепочках к модели сетевого и аналитического хаба, что соответствует стратегическим приоритетам, обозначенным в государственных программных документах и Посланиях Президента Республики Казахстан.

Таблица 5 – Казахстан: потенциал трансформации в логистический и аналитический хаб

Показатель	Оценка	Аналитическое значение
Доля Казахстана в сухопутном транзите Китай–Европа	Более 80%	Критическая роль в евразийских наземных цепочках поставок
Рост контейнерного транзита через Казахстан (2017–2023)	Увеличение более чем в 2,5 раза	Рост нагрузки на координацию и управление потоками
Сокращение транзитного времени по Middle Corridor	Сокращение на приблизительно 40%	Эффект цифровизации и институциональной координации
Доля логистики в ВВП Казахстана	Около 8–9%	Потенциал роста добавленной стоимости
Потенциал роста добавленной стоимости логистики за счёт цифровизации	Около 25–40%	Переход от транзита к аналитическим сервисам
Уровень цифровизации транспортных услуг (сравнительно)	Ниже среднего OECD	Пространство для догоняющего развития
Позиция Казахстана в Logistics Performance Index (LPI)	Средняя группа	Институциональные ограничения в координации данных
Наличие мультимодальных узлов (порты, сухие порты, хабы)	Наличие мультимодальных узлов (порты, сухие порты, хабы)	Наличие мультимодальных узлов (порты, сухие порты, хабы)
Геополитическое положение	Геополитическое положение	Геополитическое положение
Примечание -составлено авторами на основании [6;9;10]		

Обсуждение результатов позволяет сделать вывод о том, что для Казахстана ключевым направлением является не только развитие добычи стратегических минералов, но и формирование дата-центричной логистической экосистемы, интегрированной с международными цепочками поставок. Это включает:

– развитие цифровых платформ мониторинга экспортных потоков;

– интеграцию транспортных, таможенных и производственных данных;

– поддержку совместных проектов с зарубежными перерабатывающими и технологическими партнёрами;

– формирование институциональных стандартов обмена данными.

В совокупности это создаёт предпосылки для перехода от ресурсной модели участия в глобальных цепочках к модели сетевого и аналитического хаба, что соответствует стратегическим приоритетам, обозначенным в государственных программных документах и Посланиях Президента Республики Казахстан.

Информация о финансировании

Выполнено в рамках грантового финансирования молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2025–2027 годы» (Проект ИРН AP27508139 «Дата-центричный подход к повышению резилентности цепочек поставок полупроводников и стратегически значимых минералов»).

Выводы

Проведённое исследование показало, что устойчивость цепочек поставок полупроводников и стратегически значимых минералов в современных условиях определяется не только наличием ресурсной базы, но и уровнем институциональной, логистической и цифровой координации. Высокая концентрация перерабатывающих и технологических мощностей в ограниченном числе стран формирует системные риски, которые усиливаются в условиях геополитической нестабильности и роста спроса на высокотехнологичную продукцию.

Установлено, что Казахстан, обладая значительными запасами стратегических минералов и выгодным географическим положением, в настоящее время преимущественно выполняет функцию upstream-участника глобальных цепочек создания стоимости. Низкая глубина переработки и зависимость от импорта полупроводниковой и иной высокотехнологичной продукции ограничивают потенциал формирования устойчивых конкурентных преимуществ и повышают уязвимость национальной экономики.

Результаты исследования подтверждают, что внедрение дата-центричного подхода, основанного на использовании больших данных, интернета вещей и методов машинного обучения, является эффективным инструментом повышения резилентности цепочек поставок. Такой подход обеспечивает переход от реактивного к предиктивному управлению, повышает прозрачность логистических процессов и позволяет заблаговременно выявлять и минимизировать риски сбоев.

В рамках расширенной сетевой интерпретации ресурсно-ориентированного подхода (network-RBV) обосновано, что устойчивое конкурентное преимущество формируется на уровне сети взаимодействий между участниками цепочки поставок. Цифровые платформы, институциональные стандарты, долгосрочные контрактные механизмы и накопленный социальный капитал выступают как трудноимитируемые ресурсы, соответствующие критериям VRIN.

В целом результаты исследования могут быть использованы при разработке государственной промышленной, транспортно-логистической и цифровой политики, а также служить основой для дальнейших исследований, направленных на количественную оценку эффектов цифровизации и сетевой координации в цепочках поставок стратегически значимых ресурсов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Zhang, X., Sabo, R., Rosa, L., Niazi, H., Kyle, P., Byun, J.S., Wang, Y., Yan, X., Gu, B., Davidson, E. A.** Nitrogen management during decarbonization. Nat. Rev. Earth Environ. – 2024. – 5. – P. 717–731.

2 **Zhu, S., Mac Kinnon, M., Carlos-Carlos, A., Davis, S.J., Samuelsen, S.** Decarbonization will lead to more equitable air quality in California. Nat. Commun. – 2022. – 13. – 5738.

3 **Inceoglu, I., Vanacker, T., Vismara, S.** Digitalization and resource mobilization. – Br. J. Manag. – 2024. – 35. – P. 576–593.

4 **Eerola, T., Eilu, P., Hanski, J., Horn, S., Judl, J., Karhu, M., Kivikytö-Reponen, P., Lintinen, P., Långbacka, B.** Digitalization and natural resources. Geol. Surv. Finland Open File Res. Rep. – 2021. – 50. – 2021.

5 **Dou, S., Xu, D., Zhu, Y., Keenan, R.** Critical mineral sustainable supply : Challenges and governance. Futures. – 2023. – 146. – 103101.

6 International Energy Agency Global Critical Minerals Outlook 2024. – [Electronic resource]. – https://www.iea.org/reports/globalcritical-minerals-outlook-2024 (accessed on 7 September 2025).

7 Послание Президента Республики Казахстан Касым-Жомарта Токаева от 8 сентября 2025 года: [Электронный ресурс]. – https://www.akorda.kz

8 IEA. Executive Summary – Global Critical Minerals Outlook 2025. – [Electronic resource]. – https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/executive-summary (accessed on October 14, 2025)

9 Trade in value Added (TiVA). Organisation for economic cooperation and development (OECD). – [Electronic resource]. – https://data360.worldbank.org/en/dataset/OECD_TIVA (accessed on November 2, 2025)

10 World Bank. Middle Trade and Transport Corridor - Policies and Investments to Triple Freight Volumes and Halve Travel Time by 2030. – 2023. – [Electronic resource]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/7e6a216e-eb56-4783-ba1b-b7621abddcd9/content (accessed on October 30, 2025)

11 **Dawei Zheng.** Tingdong Wang Supply chain resilience, logistics efficiency, and enterprise competitiveness. Finance Research Letters. – Volume 79. – June 2025. – 107335.

REFERENCES

1 **Zhang, X., Sabo, R., Rosa, L., Niazi, H., Kyle, P., Byun, J.S., Wang, Y., Yan, X., Gu, B., Davidson, E. A.** Nitrogen management during decarbonization. Nat. Rev. Earth Environ. – 2024. – 5. – P. 717–731.

2 **Zhu, S., Mac Kinnon, M., Carlos-Carlos, A., Davis, S.J., Samuelsen, S.** Decarbonization will lead to more equitable air quality in California. Nat. Commun. – 2022. – 13. – 5738.

3 **Inceoglu, I., Vanacker, T., Vismara, S.** Digitalization and resource mobilization. – Br. J. Manag. – 2024. – 35. – P. 576–593.

4 **Eerola, T., Eilu, P., Hanski, J., Horn, S., Judl, J., Karhu, M., Kivikytö-Reponen, P., Lintinen, P., Långbacka, B.** Digitalization and natural resources. Geol. Surv. Finland Open File Res. Rep. – 2021. – 50. – 2021.

5 **Dou, S., Xu, D., Zhu, Y., Keenan, R.** Critical mineral sustainable supply: Challenges and governance. Futures. – 2023. – 146. – 103101.

6 International Energy Agency Global Critical Minerals Outlook 2024. – [Electronic resource]. – https://www.iea.org/reports/globalcritical-minerals-outlook-2024 (accessed on 7 September 2025).

7 Poslanie Prezidenta Respubliki Kazakhstan Kassym-Jomart Tokayev ot 8 sentyabrya 2025 goda [Address of the President of the Republic of Kazakhstan Kassym-Jomart Tokayev dated 8 September 2025]. – [Electronic resource]. – https://www.akorda.kz/ (accessed 14 October 2025).

8 IEA. Executive Summary – Global Critical Minerals Outlook 2025. – [Electronic resource]. – https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook 2025/executive-summary (accessed on October 14, 2025)

9 Trade in value Added (TiVA). Organisation for economic cooperation and development (OECD). – [Electronic resource]. – https://data360.worldbank.org/en/dataset/OECD_TIVA (accessed on November 2, 2025)

10 World Bank. Middle Trade and Transport Corridor - Policies and Investments to Triple Freight Volumes and Halve Travel Time by 2030. – 2023. – [Electronic resource]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/7e6a216e-eb56-4783-ba1b-b7621abddcd9/content (accessed on October 30, 2025)

11 **Dawei Zheng.** Tingdong Wang Supply chain resilience, logistics efficiency, and enterprise competitiveness. Finance Research Letters. – Volume 79. – June 2025. – 107335.

Поступило в редакцию 09.02.26.
Поступило с исправлениями 25.02.26.
Принято в печать 12.05.26.

***Ж. К. Кегенбеков[1], А. К. Конгуева[2], А. Н. Алипова[3],**
С. Бердали[4], М. Е. Каниев[5]
[1,2,3,4,5]Қазақ-Неміс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
09.02.25 ж. баспаға түсті.
25.02.25 ж. түзетулерімен түсті.
12.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

СТРАТЕГИЯЛЫҚ МИНЕРАЛДАРДЫ ЖЕТКІЗУ ТІЗБЕГІНІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДЕГІ ДАТА-ЦЕНТРЛІК ТӘСІЛДІҢ РӨЛІ

Жеделдетілген цифрландыру, жаһандық декарбонизация және геосаяси белгісіздіктің өсуі жағдайында жартылай өткізгіштер мен стратегиялық маңызды минералдарды жеткізу тізбектерінің тұрақтылығы мемлекеттердің экономикалық және технологиялық қауіпсіздігі үшін шешуші мәнге ие болады. Бұл зерттеу маңызды ресурстардың жаһандық жеткізу тізбектерінің құрылымдық осалдықтарын талдауға және олардың резилиенттілігін арттыру құралы ретінде деректер-центрлік тәсілдің әлеуетін негіздеуге бағытталған. Зерттеудің әдіснамалық негізі халықаралық статистикалық мәліметтер базасын, салалық аналитикалық есептерді талдау, сондай-ақ оның кеңейтілген желілік интерпретациясында (network-RBV) ресурстарға бағытталған тәсілді (Resource-Based View) қолдану болып табылады. Елдердің шектеулі санында қайта өңдеу мен технологиялық қуаттардың жоғары шоғырлануы жүйелік логистикалық және институционалдық тәуекелдерді қалыптастыратыны көрсетілген, ал шикізат базасының болуы өздігінен тұрақты бәсекелестік артықшылықтарды қамтамасыз етпейді. Қазақстан стратегиялық минералдардың Елеулі әлеуетіне және тиімді транзиттік-географиялық жағдайына ие бола отырып, негізінен upstream-жаһандық құн тізбектерінің қатысушысы болып қала беретіні анықталды. Үлкен деректерді, заттар интернетін және машиналық оқыту әдістерін қолдануға негізделген дата-центрлік тәсілді енгізу реактивтіден жеткізілім тізбегін болжамды басқаруға көшуге, олардың ашықтығы мен бейімделуін арттыруға мүмкіндік береді. Қазақстанда шикізат жеткізушіден өңірлік талдамалық және логистикалық хабқа елдің жаһандық жеткізу тізбегіндегі рөлін түрлендіруге қабілетті дата-орталық логистикалық экожүйені қалыптастырудың орындылығы туралы қорытынды жасалды.

Кілтті сөздер: жаһандық жеткізу тізбектері, жартылай өткізгіштер, стратегиялық маңызды минералдар, деректер орталығы тәсілі, үлкен деректер, Заттар интернеті (IoT), Машиналық оқыту.

***Zh. K. Kegenbekov[1], A. K. Konguyeva[2], A. N. Alipova[3],**
S. Berdali[4], M. Ye. Kaniyev[5]
[1,2,3,4,5]Kazakh-German University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 09.02.26.
Received in revised form 25.02.25.
Accepted for publication 12.05.26.

THE ROLE OF THE DATA-CENTRIC APPROACH IN ENSURING THE SUSTAINABILITY OF SUPPLY CHAINS OF STRATEGIC MINERALS

In the context of accelerated digitalization, global decarbonization, and growing geopolitical uncertainty, the stability of supply chains for semiconductors and strategically important minerals is becoming key to the economic and technological

security of States. This study is aimed at analyzing the structural vulnerabilities of global supply chains of critical resources and substantiating the potential of a data-centric approach as a tool to increase their resilience. The methodological basis of the research is the analysis of international statistical databases, industry analytical reports, as well as the use of a resource-based approach (Resource-Based View) in its extended network interpretation (network-RBV). It is shown that the high concentration of processing and technological capacities in a limited number of countries creates systemic logistical and institutional risks, while the availability of a raw material base alone does not provide sustainable competitive advantages. It has been established that Kazakhstan, with its significant potential for strategic minerals and advantageous transit and geographical location, remains primarily an upstream participant in global value chains. It is proved that the introduction of a data-centric approach based on the use of big data, the Internet of things and machine learning methods makes it possible to move from reactive to predictive supply chain management, increase their transparency and adaptability. It is concluded that it is advisable to form a data-centric logistics ecosystem in Kazakhstan that can transform the country's role in global supply chains from a supplier of raw materials to a regional analytical and logistics hub.

Keywords: global supply chains, semiconductors, strategically important minerals, data-centric approach, big data, Internet of Things (IoT), machine learning.

SRSTI 73.49.99

https://doi.org/10.48081/BGQF2247

M. Zh. Kizdarbekova[1], K. B. Konyrtayeva[2],
****K. G. Balabekova[3], A. B. Zabiyeva[4]***
[1,2]Karaganda national research university named after academician
E. A. Buketov, Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3,4]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2984-5933
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6179-9472
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8242-6675
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8089-3693
*e-mail: balabekovakyrmyzy@gmail.com

RELIABILITY OPTIMIZATION OF MUNICIPAL WASTE COLLECTION VEHICLES

This article discusses the structural features, operating conditions and reliability indicators of utility vehicles used for the collection and transportation of solid household waste (MSW). Garbage trucks were considered as a complex technical system, and the factors contributing to the failure intensity and operability of their main elements were analyzed.

During the study, the resource of a garbage truck was considered as a two-module system consisting of the main vehicle and special equipment, and the impact of the intensity of use of special equipment on the overall resource of the machine was evaluated. Based on probabilistic models of reliability theory and the average mileage between failures and repair and maintenance costs were determined.

The results obtained make it possible to optimize the frequency of technical impact of garbage trucks, reduce the risks between planned repairs and emergency failures, as well as increase the efficiency of technical operation at utility enterprises.

Keywords: solid waste; garbage trucks; utilities; reliability; operational life; failure rate; maintenance; repair optimization.

Introduction

The collection and disposal of household solid waste (QBCh) remains one of the most pressing problems both in Kazakhstan and abroad. Waste management has a special place in urban transport, which carries out the collection and disposal of waste and household waste and their transportation to the place of final disposal. These include a dump truck with a built-in basket and a container with a device for loading and transporting household waste and garbage from the main car. Although body garbage carriers belong to the most common type, container garbage carriers have not lost their relevance.

The production of modern utility vehicles and the implementation of their improvement and optimization over time should develop due to the prosperity of cities

and industrial centers, as well as other economic centers. All such works as road repair, keeping it clean, cleaning snow, ice and water due to weather conditions depending on the season are performed by machines in this utility sector. At the same time, as a result of all work in the human economy, garbage is formed, therefore, garbage cleaning machines are needed at the place of work, vehicles performing the same work, so as not to interfere with the movement of employees.

With the development of modern technologies, inventors are also following the improvement of machines in the utility industry. This, in turn, this allows for timely and accurate cleanup of garbage, regardless of season, which industry or economy is dominant, what big city.

The operational properties of garbage cleaning vehicles are characterized by their technical condition and operability. The primary purpose of technical operation of machines is to increase the efficiency of performance management; because the knowledge and application of advanced methods and technologies increases resources, reduces downtime during machine maintenance and repair, reduces operating costs, and ensures the reliability of the necessary operation. [1].

Materials and methods

The experience of utility companies shows that insufficient attention is paid to the technological processes of machine operation. This situation is manifested in non-compliance with the planned schedule of technical inspection and poor-quality maintenance and repairs.

Therefore, according to the results of research on work processes, the goal is to improve the design of a garbage truck by increasing the frequency of technical interventions, improving the actual reliability indicators and the technical and economic assessment of its parameters [2].

Machines for collecting solid household waste are used by waste disposal workers in urban areas. Special equipment for such machines is usually installed on the vehicle chassis. Garbage trucks are divided into container, body and special (figure 1). Container garbage collectors collect containers filled with household garbage, take clean containers in their place and take them to landfills. Loading and unloading of containers is carried out by a lifting mechanism located on the platform of the garbage collection machine. Garbage trucks are distinguished from the garbage collector for loading garbage into the car body into mechanized and non-mechanized. The working equipment of these machines consists of a body kit, a receiving hopper, a pressure plate (loading), body filling and cleaning mechanisms. In machines with a mechanized loader, the garbage in standard garbage trucks is collected by a rotating crane located in the garbage truck, then loaded into the receiving hopper, and then transported to the body by a pushing plate. When the housing is full, the litter shrinks. The garbage truck, when the body is lying down, cleans the body of debris with its weight or is removed under the influence of pushing mechanisms in the normal position of the body [3].

Today, garbage equipment is represented by a huge number of models of both foreign and domestic manufacturers. these are very well-equipped machines that allow you to load household, construction and production waste in the shortest possible time.

as a base, manufacturers use chassis from Scania, Kamaz, Zil, Maz, Man, Mercedes-Benz, Isuzu and others. garbage trucks produced differ in the purpose of the body, size, mechanisms for loading solid waste, the nature of the sealing process and the method of unloading garbage. the design features of special equipment depend on these parameters (table 1) [3].

Table 1 – Difference in parameters

Body scavenger machines		
Side garbage trucks rear loading garbage trucks front front garbage cleaners	Rear loading garbage trucks front	Front garbage cleaners

Body scavenger machines

Side garbage trucks rear loading garbage trucks front front garbage cleaners

Side garbage trucks are the most common type of garbage trucks in our country. The share of such special transport is more than 50% of the garbage truck fleet. Its bright representatives are «KO-440-5», «KO-415A», «KO-429», «MBZ-014» and others. They are designed for mechanical loading of solid household waste from standard storage containers of 0,75 cubic meters. Their device includes:

– solid metal body;
– nadramnik;
– side manipulator;
– push plate;
– hydraulic and electrical systems;
– cultivator (grinder) [4].

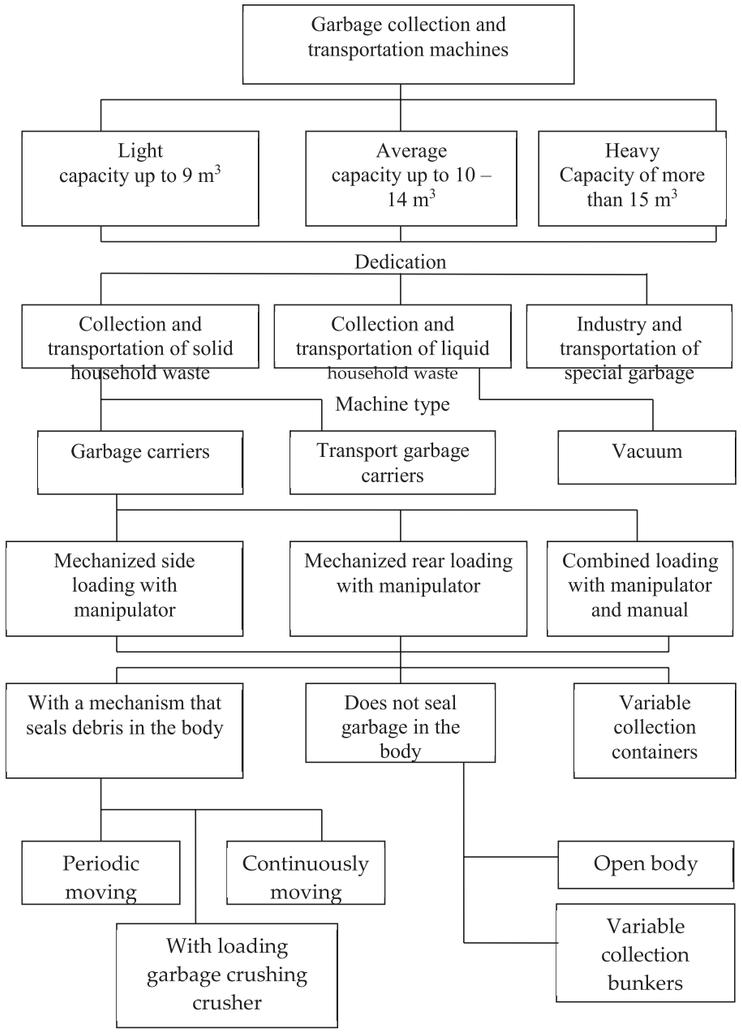


Figure 1 – Classification of garbage carriers

The high-strength metal chassis has a lifting plate that is mounted on the frame and opens and closes from the rear using hydraulic cylinders located on both sides of the chassis. At the front of the case there is a pressure plate with a winding to smooth out incoming debris. For the most part, the structure of garbage trucks consists of a base chassis, a body for collecting and temporary storage of waste, a compression device, a hydraulic drive system, as well as control and safety systems for controlling work processes.

Results and discussion

The probability of a complex system consisting of sequentially connected elements is determined by increasing the probability of triggering these elements of R_o by R_J [5].

$$P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \ldots . P_n = \sum P_j \quad (1.1)$$

When the elements are connected in series, their addition leads to a deterioration in the reliability of the complex system.

In the case of real factors, reliability is a variable that depends on their performance, which can be expressed by the law of probability distribution. The rules for the possibility of distributing five garbage collectors are determined by chance.

The components of any garbage collection system are characterized by significant malfunctions.

The total failure rate of a garbage truck consists of the failure rate of the garbage truck itself, since all five components of the garbage truck are connected in series. Degree of systemic disorders:

$$\lambda_{ktk} = \sum \lambda_j \quad (1.2)$$

Among the system errors, the mathematical expectation of the development of events is determined:

$$m_{KTK} = \frac{1}{\lambda_{KTK}} = \frac{1}{\frac{1}{\sum_{j=1}^{5} m_{LJ}}} \quad (1.3)$$

As you know, by statistical data processing, checking the operation of garbage trucks with an on-board load on the hull, using mathematical expectations for each element, we determine the average performance of a million horsepower. Engine-14,860; hydraulic system – 6,332; gearbox-19,428; power adapter – 13,030; metal structure – 25,198 garbage.

Using the formula above (1.3) we find:

$$m_L = \left(\frac{1}{14,860} + \frac{1}{19,428} + \frac{1}{13,030} + \frac{1}{6,332} + \frac{1}{25,198}\right)^{-1} = 1,55.$$

Thus, during this multi-thousand-kilometer race, repairs will not be required, but only dependence:

$$P(L) = e^{-\frac{L}{1,55}} \quad (1.4)$$

When studying the reliability of traffic sensors performing both types of driving, determining their material is a separate task, as it is not possible to accurately determine the material on the same road, which is regulated by legal and technical documents. In other studies, the material of a garbage truck is considered to be a complex system

consisting of two technical components: the main vehicle, designed with regard to the possibility of using special equipment, and special equipment [6].

The impact of the strength of the use of garbage trucks on its resources carried out in the analysis of the strength of the system allows you to objectively determine the changes in the system accurately predicted to change environmental conditions and evaluate the effectiveness of using garbage trucks in any conditions. New features.

Taking into account the risks of omitting failures, the optimal number of repair effects determined by reducing the total losses in the operation of a given L_K and the execution of excess TK will be equal to the number of Tk in the specified move [7]. This model is similar to the management models known in asset management and risk management theory. All travel expenses will be reduced to l_k, which determine the cost of repairs specified in sp, maintenance interruptions and unforeseen repairs not specified in ssh, which were considered penalties for hasty termination of the marriage:

$$S \rightarrow S_P \rightarrow S_{TO} \rightarrow S_{sh} \rightarrow min. \quad (1.5)$$

Total costs of components of (1.5) up to the number of L_K of repair and reventive operations for the development of the formula:

$$n \times L_k / L_{OT}, \quad (1.6)$$

where L_{OT} – is the work to failure determined by the distribution density f,

L_k – Depending on the lot randomness, the magnitude n is also random with the distribution density.

L_{OT} L_k. L_{OT} – using weights as a function and expressing the components and total costs in terms of the corresponding costs from (1.6), we get:

Probabilistic models for determining pre-repair work are based on the idea of reducing average repair costs. For the two options, emergency repairs and preventive maintenance (respectively), the risk of an emergency breakdown is used as a weighting factor.

In transit philosophy, the concept of «commodity» is used - a symbol of transit, representing Labor Reserves. Based on Mest P 27.002–2009 [5; 6; 7; 8], The material ensures the normal functioning of the product during its entire service life and may depend on the duration of operation of the product or its technical condition before returning to service after major repairs.

Material extraction is a process that occurs during the manufacture of equipment and is characterized by the values of various technical parameters. The material is used when the parameters of the technical method reach their maximum values. Thresholds are values that the product cannot use for its intended purpose [5; 6; 7; 8].

Models of the resource structure of waste management are developed using a system-wide methodology. Next, the following sections of the course are performed:

– Identify the logical elements of the system being studied;

– The system error continues;

– I studied the Tuna Law, the interaction of elements;

– In the same year, a model of the resource system was built.

The choice of an approach that consider the cost of the fix and a good level of performance of the truck waste a level that decide the substance mgs of the machine, the amount of the tool and maintenance set. In this case, will look a functional target like this [9].

$$C_p \rightarrow min.$$

To analyze, compile and improve the performance of the system, its elimination is carried out, i.e. the system is divided into sections of elements. Elements of a system can be divided into one element called an internal system. To assess the effect of the operation of special equipment and the main vehicle, an indicator of working capacity is used [10]. The degree of labor intensity of garbage trucks determines the ratio between the operating time of special equipment and the operating time (1.9).

$$C = \frac{T_{c.o}}{T_{pr}} = \frac{T_{c.o} \cdot V_{aver}}{S}$$

where: $T_{c.o}$ – special equipment of working time, h;

T_{pr} – travel time of garbage truck, h;

V_{aver} – average speed of movement, km / h;

S is the road distance from the site to the landfill, km.

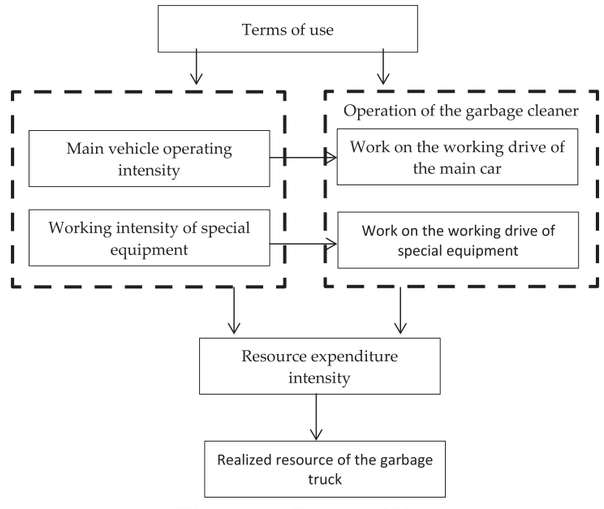


Figure 2 – Terms of Use

The garbage truck, which is equipped with a single-level system for collecting and recycling solid household waste, calculates the average speed of movement under normal conditions of use, the distance from the site to the landfill and the time limits for transshipment of solid household waste (Table 3). It was determined that the change in the speed of operation of a particular equipment depends on the conditions of transportation of solid household waste (Fig. 27).

Table 2 – Standard Time standards for MSW loading

№	Number of stops for loading the full capacity of the garbage truck	Time norm for one garbage truck
1	1	1,12
2	2-5	1,19
3	6-10	1,29
4	11-15	1,39
5	16-20	1,50
6	21-25	1,60
7	26-30	1,71

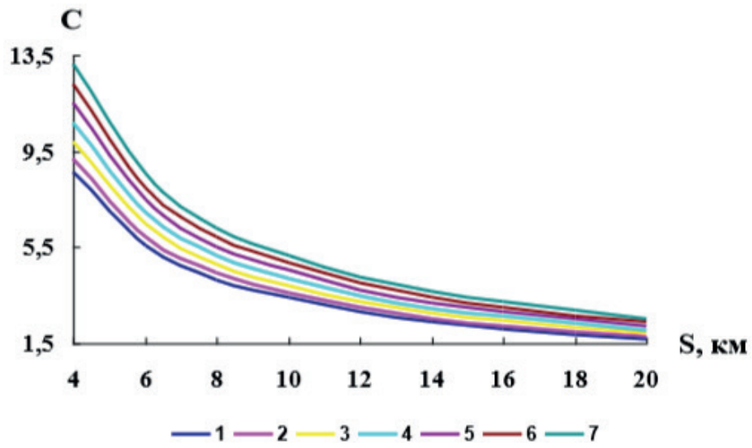


Figure 3 – The dependence of the change in the intensity of work of special equipment on the gait

The trash truck resource is configured as a complex vmi system consisting of two elements: a basic vehicle and special equipment, taking into account the intensity of

Depending on the random of the batch the number n is also random with the density of the distribution [10; 11]:

$$f(n) = \left|\frac{-L_k}{n^2}\right| \cdot f\left(\frac{L_k}{n}\right) \quad (1.8)$$

$f(n)$ expressing the components of total costs as a function of weight and through the corresponding costs from (1.9), we

$$S = C_p \cdot n_p + \int_0^{n_p} C_{\text{TK}} \cdot \left(n_p - n\right) \cdot f(n)\, \delta n + \int_{n_p}^{\infty} C_{sh} \cdot \left(n_p - n\right) \cdot f(n)\, \delta n \rightarrow min, \quad (1.9)$$

where: C_p – average cost of preventive (planned) repairs;

S_W – The average cost of calculation and calibration operations (or the cost of incomplete use of rotational parts materials during Solid Waste Management) ;

S_{SH} – damage (penalty) caused by missing a refusal or the cost of canceling an emergency refusal.

In the case of $C_{sh} > C_P$, the integral according to the formula $\left[0 \ldots n_p\right]$ corresponds to the risk of performing excess Ms (excess Ms costs), and within the integral $\left[n_p \ldots \infty\right]$ the risk of emergency failure (excess Ms costs as needed). Solving the problem (1.10), we find the optimal number of NP repairs in the L_K run (usually L_K is the run before overhaul), and then change the equipment needed for repair by the services where defect modification operations take place, including preventive modification of parts:

$$L_{TK} = L_k \div n_p \quad (1.10)$$

The probabilistic model for determining the pre-repair function is based on the idea of minimizing the average cost of repairs. For two options, weighting factors are used - emergency repairs and preventive (or technical) repairs, respectively, to assess the risk of emergency situations:

$$R_p = \int_0^{L_p} f(L)\delta L = F\left(L_p\right) = 1 - P\left(L_p\right) \quad (1.11)$$

and the risk of overspending to prevent rejection:

$$R_{\Pi} = \int_{L_p}^{0} f(L)\delta L = P\left(L_p\right) \quad (1.12)$$

where $f(L)$ is the density of distribution of developments between failures with mathematical expectation L;

L_p – a development in which a preliminary repair is performed.

Conclusions

Sequencing between outliers obtains random values for key elements of communication,which helps determine the parameters of the task type and the order of its distribution; this is scientifically good practice.

REFERENCES

1 **Altunina, M. S.** Research on the reliability of a garbage truck as a complex technical system / E. A. Shemshura, M. S. Altunina / Collection of scientific papers SWorld. Proceedings of the international scientific and practical conference «Promising innovations in science, Education, production and Transport 2014». – Issue 4(37). – Vol. 2. – Odessa : KUPRIENKO. – 2014. – P. 298–35.

2 **Zhigulskiy, V. I., Domnitskiy, A. A.** Investigation of the reliability of mobile garbage trucks / Science and innovations in the field of vehicle service and road safety: interuniversity collection of scientific papers [dedicated to in memory of prof. V. Z. Rusakov] / edited by Yu. G. Sapronov [et al.]; South Russian State University of Economics and Service. – Shakhty : YURGUES. – 2008. – P. 30–34.

3 Problems of operation and maintenance of transport and technological machines: Reports of the international scientific and technical conference. – Tyumen : Felix. – 2006. – 256 p.

4 **Yagovkin, A. I., Krivchun, N. A.** A new approach to production management of maintenance and repair of machines // Operation and maintenance of transport and technological machines: interuniversity collection of scientific tr. / TSNSU. – Tyumen : Felix. – 2005. – P. 147–151.

5 **Prokhorchenko, E. S.** Adjusting the frequency of car maintenance depending on seasonal operating conditions // Operation and maintenance of transport and technological machines: interuniversity collection of scientific tr. / TSNSU. – Tyumen : Felix. – 2005. – P. 100–101.

6 **Nemkov, M. V.** Adjusting the resource standards of engines of special vehicles depending on the operating modes: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.22.10 / Tyumen State Oil and Gas University. – Oil and Gas University. – 2005. – 19 p.

7 **Kargin, R. V., Altunina, M. S., Zagidullina, O. P.** A targeted method for improving the organization of maintenance and repair of mobile garbage trucks. In the collection: Prospects for the development of Eastern Donbass. collection of scientific papers based on the materials of the 61st All-Russian Scientific and Practical Conference. – 2012. – P. 75–79.

8 **Dotsenko, A. I., Zotov, V. A., Ozerov, V.V.** Dynamic design parameters of modern garbage trucks. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – № 4 (30). – P. 476–483.

9 **Khudyakova, N. E.** The «Economics» of a garbage truck are obvious and non-obvious factors. Solid household waste. – 2020. – № 3 (165). – P. 60–64.

10 **Gulnyashkin, A. V., Fedusenko, P. S.** Requirements for a modern garbage truck. Solid household waste. – 2014. – № 3 (93). – P. 50–51.

11 **Altunina, M. S.** Experimental assessment of the intensity of operation of shanty garbage trucks / A. S. Nosenko, R. V. Kargin, E. A. Shemshura, M. S. Altunina / Modern problems of science and education [Electronic resource]. The electron. Journal.– 2014. – № 6. – [Electronic resource]. – http://www.science-education.ru/120-16046.

Received 16.04.26.
Received in revised form 24.04.25.
Accepted for publication 20.05.26.

М. Ж. Киздарбекова[1], К. Б. Қоңыртаева[2], *К. Г. Балабекова[3], А. Б. Забиева[4]
[1,2]Академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3,4]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.
16.04.26 ж. баспаға түсті.
24.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЛДЫҚ ЖИНАУ КӨЛІКТЕРІНІҢ СЕНІМДІЛІГІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұл мақалада қатты тұрмыстық қалдықтарды (ҚТҚ) жинау және тасымалдау үшін пайдаланылатын коммуналдық көліктердің құрылымдық ерекшеліктері, пайдалану шарттары және сенімділік көрсеткіштері қарастырылады. Қоқыс таситын көліктер күрделі техникалық жүйе ретінде қарастырылып, олардың негізгі элементтерінің істен шығу қарқындылығы мен жұмысқа қабілеттілігіне ықпал ететін факторлар талданды.

Зерттеу барысында қоқыс таситын машинаның ресурсы негізгі вагоннан және арнайы жабдықтан тұратын екі модульді жүйе ретінде қарастырылды, ал арнайы жабдықты пайдалану қарқындылығының машинаның жалпы ресурсына әсері бағаланды.. Сенімділік теориясының ықтималды модельдеріне сүйене отырып, ақаулар, жөндеу және техникалық қызмет көрсету шығындары арасындағы орташа жүгіріс анықталды.

Алынған нәтижелер қоқыс таситын көліктердің техникалық әсер ету жиілігін оңтайландыруға, жоспарлы жөндеу мен апаттық ақаулар арасындағы тәуекелдерді азайтуға, сондай-ақ коммуналдық кәсіпорындарда техникалық пайдалану тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: қатты тұрмыстық қалдықтар; қоқыс таситын көлік; коммуналдық техника; сенімділік; пайдалану ресурсы; істен шығу қарқындылығы; техникалық қызмет көрсету; жөндеуді оңтайландыру.

М. Ж. Киздарбекова[1], К. Б. Қоңыртаева[2], *К. Г. Балабекова[3], А. Б. Забиева[4]
[1,2]Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е. А. Букетова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[3,4]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 16.04.26.
Поступило с исправлениями 24.04.26.
Принято в печать 20.05.26.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ МУСОРОВОЗОВ

В данной статье рассматриваются конструктивные особенности, условия эксплуатации и показатели надежности коммунальных транспортных средств, используемых для сбора и транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО). Мусоровозы рассматривались как сложная техническая система, и были проанализированы факторы, влияющие на интенсивность отказов и работоспособность их основных элементов.

В ходе исследования рассматривался ресурс мусоровоза как двухмодульной системы, состоящей из базового автомобиля и специального оборудования, и оценивалось влияние интенсивности использования специального оборудования на общий ресурс машины. На основе вероятностных моделей теории надежности были определены средний пробег между отказами, затраты на ремонт и техническое обслуживание.

Полученные результаты позволяют оптимизировать частоту технического воздействия на мусоровозы, снизить риски между плановыми ремонтами и аварийными отказами, а также повысить эффективность технической эксплуатации на предприятиях коммунального хозяйства.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы; мусоровоз; коммунальное оборудование; надежность; эксплуатационный ресурс; интенсивность отказов; техническое обслуживание; оптимизация ремонтов.

МРНТИ 73.29.17
https://doi.org/10.48081/BGQF2248

****Н. А. Токмурзина[1], С. С. Абдуллаев[2], Е. М. Набиев[3], Е. Н. Сисекенова[4], Б. А. Аймагамбетова[5]***
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5589-5663
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5028-8143
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1441-0892
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4394-9320
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0271-7847
*e-mail: n.tokmurzina@satbayev.university

МОДЕЛЬ PREVENTION–APPRAISAL–DEFECTS КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕВОЗЧИКА

Актуальность исследования обусловлена потребностью в повышении результативности систем управления безопасностью движения в условиях роста требований к надежности железнодорожных перевозок. Идея исследования заключается в применении экономико-ориентированного подхода к оценке эффективности системы управления безопасностью движения, при котором уровень безопасности рассматривается как результат оптимального распределения ресурсов между профилактикой, контролем и устранением последствий нарушений. В статье рассмотрены методологические подходы к оценке эффективности системы управления безопасности движения железнодорожного перевозчика. Обоснована целесообразность использования экономического подхода, основанного на сопоставлении затрат на обеспечение безопасности и потерь, обусловленных нарушениями безопасности движения. Приведенный анализ существующих международных методик оценки уровня безопасности позволил выявить ограничения с точки зрения оценки управленческой результативности события. В качестве методологической основы предложена адаптация модели Prevention–Appraisal–Defects, позволяющая структурировать затраты на профилактику, контроль и последствия технических отказов, а также определять оптимальный уровень профилактических инвестиций. Разработан алгоритм расчета экономической эффективности мероприятий по повышению безопасности движения. Практическая применимость методики продемонстрирована на примере железнодорожного перевозчика, что подтверждает возможность использования модели Prevention–Appraisal–Defects, как инструмента экономической оценки и стратегического управления безопасностью движения.

Ключевые слова: система управления безопасностью движения, экономическая эффективность, ущерб от нарушений безопасности движения, модель Prevention–Appraisal–Defects, железнодорожный транспорт.

Введение

Оценку эффективности системы управления безопасностью движения (СУБД) железнодорожного перевозчика целесообразно трактовать как многокритериальный процесс, направленный на сопоставление достигнутого фактического уровня риска с целевыми и допустимыми значениями, закрепленными в нормативно-правовых и стратегических документах.

В европейской практике методологические основы такой оценки сформулированы в рамках деятельности European Union Agency for Railways и реализуется посредством Общего метода оценки безопасности (Common Safety Method, CSM), а также системы общих индикаторов безопасности (Common Safety Indicators, CSI) [1;2].

Эффективность системы управления безопасностью движения определяется ограничением тяжести последствий от нарушений безопасности. Тяжесть последствий, связанных с нарушением безопасности движения поездов, определяется возможным экономическим ущербом. В современной теории управления рисками тяжесть последствий определяется величиной ущерба, возникающего при реализации опасного события:

$$R = P \times C \quad (1)$$

В формуле (1) приняты следующие элементы: R – риск; P – вероятность события; C – тяжесть последствий.

В большинстве прикладных моделей обеспечения железнодорожной безопасности показатель тяжести последствий интерпретируется через совокупность экономических потерь, возникающих в результате реализации опасных событий. К их числу относятся прямой экономический ущерб, затраты на восстановление объектов инфраструктуры и подвижного состава, убытки, обусловленные вынужденными простоями перевозочного процесса, компенсационные выплаты пострадавшим, а также косвенные потери, включающие репутационный ущерб и штрафные санкции.

Литературный обзор. Huang Y., Zhang Z. и др. [3; 4] формализуют последствия нарушений безопасности посредством функции ущерба, в рамках которой экономические потери рассматриваются в качестве базового параметра, характеризующего тяжесть последствий. При этом последствия реализация опасных событий моделируется через совокупность экономического ущерба и затрат на восстановление, возникающих в результате каскадного развития аварийных и инцидентных процессов. Ряд исследователей [5; 6; 7; 8] также нормируют тяжесть последствий нарушений безопасности через стоимостную оценку ущерба, возникающую в результате инцидентов и аварий. В работах Aven T. [9; 10], посвященных теории риска, подчеркивается, что в количественных моделях безопасности последствия целесообразно выражать в денежных единицах,

чтобы обеспечивать сопротивляемость результатов оценки и возможность их интеграции в экономико-аналитические модели.

Таким образом, эффективность СУБД должна оцениваться не только через снижение аварийности, но и через рациональность использования ресурсов и снижение ущерба.

В мировой практике сформирован высокий спектр методик количественной оценки уровня безопасности железнодорожного транспорта. В Евросоюзе методика основана на централизованном сборе статистической информации, применении унифицированных определений транспортных происшествий и расчете удельных показателей безопасности. С методологической точки зрения система CSI/CST ориентирована на изменение фактического уровня риска, проведение межгосударственных сравнений, контроль достижения установленных целевых пороговых значений безопасности. Однако данные индикаторы преимущественно отражают итоговые параметры функционирования транспортной системы и не обеспечивает всесторонней характеристики внутренней организации и качество процессов управления безопасностью движения. Индикаторы CSI фиксируют последствия нарушений (количество происшествий, число пострадавших, материальный ущерб), однако не раскрывают степень зрелости процессов управления рисками [1; 2].

Аналогичные ограничения характерны для глобального индекса безопасности UIC (UIC Global Safety Index, GSI), разработанного International Union of Railways. Индекс GSI базируется на взвешенной оценке аварийности с учетом тяжести последствий типа происшествий и распределения ответственности сторон, что обеспечивает более глубокий аналитический уровень по сравнению с использованием простой статистики аварийности.

Таким образом, системы CSI/CST и индекс UIC GSI следует рассматривать как инструменты оценки уровня безопасности транспортной системы в целом, но не как средства комплексной оценки эффективности функционирования системы управления безопасностью движения конкретного железнодорожного перевозчика.

Целью настоящего исследования является систематизация видов ущерба и разработка методики расчета различных категорий ущерба, обусловленного нарушением безопасности движения поездов, с учетом ее адаптации к практическому использованию железнодорожными перевозчиками. Методологическую основу работы составляет модель Prevention–Appraisal–Defects (далее – PAD) [11], позволяющая структуре вырвать затраты и потери, связанные с обеспечением безопасности движения, с позиции профилактики, контроля и последствий возникновения различных технических отказов объектов транспортной инфраструктуры. Анализ научных публикаций [7, 12–18] подтверждает, что модель PAD является методологически обоснованным инструментом оценки экономической эффективности мероприятий по обеспечению качества и безопасности. Ее адаптация к системе управления

безопасностью движения позволяет перейти от реактивного устранения последствий к экономически рациональной профилактике риска.

Материалы и методы

Схематическое представление влияния уровня безопасности на показатели качества транспортного обслуживания, а также характер данного воздействия приведены на рисунке 1. Следует отметить, что выявленные зависимости носят двунаправленный характер и проявляются как при снижении, так и при повышении уровня безопасности движения поездов.

Проведенный анализ схемы, представленные на рисунке 1 показывает, что безопасность движения выступает фундаментальной и системообразующей составляющей качества транспортной услуги (перевозочного процесса). При этом показатели качества транспортного обслуживания и уровень безопасности не являются автономными характеристиками и находятся во взаимосвязанной зависимости. В связи с этим оценка эффективности СУБД должна основываться не только на показатели аварийности, но и учитывать ее влияние на совокупность параметров качества транспортного обслуживания. Экономический ущерб при этом выполняет роль ключевого интегрирующего показателя, связывающего уровень безопасности движения с результативностью и качеством перевозочного процесса.

Таким образом, инвестиции в повышение безопасности движения формулируют мультипликативный эффект, выражающийся в улучшении не только показателей безопасности, но и совокупности ключевых характеристик качества транспортного обслуживания, включая надежность, устойчивость и эффективность перевозочного процесса.

Рисунок 1 – Влияние безопасности движения на качество транспортной услуги перевозчика

Для оценки эффективности системы управления безопасностью движения железнодорожного перевозчика может быть использована модель Prevention–Appraisal–Defects, разработанная Армандом В. Фейгенбаумом [11]. Данная модель представляет собой базовую концепцию оценки стоимости качества (Cost of Quality, CoQ). В соответствии с основными положениями концепции совокупные затраты на обеспечение качества применительно к безопасности перевозочного процесса подразделяются на три взаимосвязанные группы и могут быть представлены в следующем виде:

$$C_{tot} = C_P + C_0 + C_D \quad (2)$$

В формуле (2) приняты следующие элементы: C_P – затраты, понесенные перевозчиком на профилактику нарушений безопасности движения (Prevention costs); C_0 – затраты, связанные с функционированием системы управления безопасностью движения, в том числе на оценку и контроль (Appraisal costs); C_D – потери, связанные с техническими отказами объектов транспортной инфраструктуры (Failure costs).

В таблице 1 приведены основные характеристики затрат.

Таблица 1 – Основные характеристики затрат

Тип затрат	Составляющие	Расчетная формула
Затраты на профилактику C_P	- обучение персонала; - разработка регламентов; - внедрение диагностических систем; - совершенствование технологии; - модернизация оборудования.	$C_P = \sum_{i=1}^{n} C_{P_i}$
Затраты на оценку и контроль C_0	- инспекции; - аудит; - мониторинг; - испытания; - диагностические процедуры.	$C_O = \sum_{j=1}^{m} C_{O_j}$
Потери, связанные с дефектами, C_D	- внутренние (ремонт, доработка, простой); - внешние (аварии, компенсации, штрафы, репутационные потери).	$C_D \quad C_{int} \quad C_{ext}$

Исследования последних десятилетий [7, 12-18] свидетельствуют о высокой универсальности модели PAD, которая получила широкое распространение в различных отраслях, включая машиностроение, энергетику, строительство и транспортную инфраструктуру.

В работе Schiffauerova и Thomson (2006) [12] на основе систематического анализа моделей стоимости качества установлено, что зависимость между

объемом профилактических затрат и потерями, обусловленными дефектами, носят нелинейный характер. Авторами показано, что минимизация совокупных затрат достигается при определенном оптимальном уровне инвестиций в профилактические мероприятия.

С позицией математического анализа данная зависимость формализуется в виде функциональной модели, отражающей взаимосвязь между уровнем профилактических инвестиций и величиной совокупных затрат:

$$C_{tot}(x) = ax + bx + ce^{-kx} \quad (3)$$

В формуле (3) за x принят уровень профилактических инвестиций.

Минимум определяется условием:

$$\frac{dC_{tot}}{dx} = 0 \quad (4)$$

Для повышения строгостей методического аппарата и обеспечения воспроизводимости результатов предлагается переход от описательного представления затрат к их формализации в виде оптимизационной задачи.

Целевая функция формулируется как минимизация совокупных затрат на обеспечение безопасности движения поездов:

$$C_{tot}(x) = C_P(x) + C_0(x) + C_D(x) \rightarrow min \quad (5)$$

где x – уровень инвестиции в безопасность, характеризующий интенсивность управленческих воздействий (финансирование мероприятий, внедрение технологий, обучение персонала и др.)

Экономическая интерпретация модели основывается на предположениях о разнонаправленной динамики составляющих затрат. При увеличении x наблюдается рост затрат на профилактику и контроль:

$$\frac{dC_p}{dx} > 0, \frac{dC_o}{dx} > 0 \quad (6)$$

одновременно потери от нарушений безопасности уменьшаются:

$$\frac{dC_d}{dx} < 0 \quad (7)$$

В результате совокупные затраты $C_{tot}(x)$ имеют U-образный характер, что предполагает существование оптимального уровня инвестиций, при котором достигается минимум.

$$C_{tot}(x^*) = minC_{tot}(x) \quad (8)$$

Условия оптимальности определяется равенством предельных Затраты предельного эффекта:

$$\frac{dZ}{dx} = \frac{dC_p}{dx} + \frac{dC_o}{dx} + \frac{dC_d}{dx} = 0 \quad (9)$$

Данное условие отражает экономический принцип, согласно которому дополнительные вложения в безопасность движения является целесообразными до тех пор, пока их предельная стоимость компенсируется снижением ожидаемых потерь.

В исследованиях Sower и Quarles (2017) [13] установлена устойчивая корреляция между уровнем зрелости системы управления качеством и долей профилактических затрат в структуре стоимости качества: увеличение удельного веса затрат на профилактику сопровождается снижением потерь, обусловленных дефектами.

В работе Sreedharan et al. (2020) [14] обоснована целесообразность интеграции модели PAD с KPIподходом, что позволяет рассматривать данную модель как инструмент стратегического управления и мониторинга эффективности.

Love et al. (2018) [7] проанализировали влияние ошибок и дефектов на экономические показатели инфраструктурных проектов и показали, что недостаточный уровень инвестиций в профилактические мероприятия приводит к экспоненциальному росту потерь на поздних стадиях жизненного цикла проекта.

Chiadamrong (2021) [17] разработал экономическую модель оптимизации затрат на качество с учетом временного фактора, а AlDoori (2022) [18] эмпирически подтвердил положительное влияние перераспределение затрат в сторону профилактики на финансовые результаты организации.

Обеспечение безопасности движения сопровождается значительными затратами, связанными как с профилактическими мероприятиями, так и с устранением последствий нарушений безопасности.

Результаты и обсуждение

Для обоснования экономической целесообразности инвестиций в систему управления безопасностью предлагается адаптировать модель PAD к специфике деятельности железнодорожного перевозчика.

Эмпирически установлено, что:

$$C_D = f(C_P, C_O) \quad (10)$$

причем

$$\frac{\partial C_D}{\partial C_P} < 0, \frac{\partial C_D}{\partial C_O} < 0 \quad (11)$$

Условия (10)–(11) подтверждают, что рост затрат на профилактические мероприятия и контрольный процедуры оказывает сдерживающее влияние

на величину потерь, обусловленных техническими отказами и нарушениями безопасности движения.

Однако следует учитывать, что:

$$\frac{\partial C_P}{\partial C_P} > 0, \frac{\partial C_O}{\partial C_O} > 0 \quad (12)$$

Следовательно, совокупная функция затрат на обеспечение безопасности движения имеет Uобразный характер.

Совокупная функция затрат, описанная выражением (5), может быть представлена в явном виде с учетом следующих соотношений:

$$C_p(x) = ax \quad (13)$$

$$C_o(x) = bx \quad (14)$$

$$C_d(x) = ce^{-kx} \quad (15)$$

где a, b, c, k – эмпирические коэффициенты, определяемые на основе статистических данных перевозчика и их линеаризации методом наименьших квадратов.

Определение коэффициентов a, b, c, k, α основывается на статистической идентификации функциональных зависимостей между затратами и уровнем обеспечения безопасности. Для корректного определения коэффициентов необходимо иметь временной ряд не менее 10–15 наблюдений; сопоставимость затрат, корректную классификацию затрат по PAD.

Функции (13–14) носят линейный характер. Линейная зависимость предполагает пропорциональный рост затрат на профилактику и оценку при увеличении объема инвестиций. Это отражает практику планомерного финансирования мероприятий, таких как модернизация инфраструктуры, обучение персонала и внедрение превентивных технологий. Следовательно, оценка линейной регрессии без свободного члена:

$$a = \frac{\sum x_t C_{p,t}}{\sum x_t^2};\ b = \frac{\sum x_t C_{o,t}}{\sum x_t^2} \quad (16)$$

При этом коэффициент a отражает удельные затраты на профилактику на единицу инвестиционной активности, а коэффициент b – удельные затраты на оценку и контроль.

Функция (15) описывается экспоненциальный зависимостью, характеризует снижение потерь по мере увеличения инвестиции в безопасность. Данная форма функции отражает убывающий характер риска при усилении профилактических

и контрольно-оценочных мероприятий. При этом коэффициенты c, k интерпретируется следующим образом:

c – уровень потерь при отсутствии инвестиций (x=0);

k – коэффициент потерь к инвестициям (интенсивность снижения риска).

Коэффициент k определяется через оценку наклона линейной регрессии методом наименьших квадратов:

$$k = -\frac{T\sum x_t \ln C_{d,t} - \sum x_t \sum \ln C_{d,t}}{T\sum x_t^2 - (\sum x_t)^2} \quad (17)$$

где T – число наблюдений;

x_t – уровень инвестиций в период t;

$C_{d,t}$ – фактические потери.

После определения коэффициента вычисляется уровень потерь при отсутствии инвестиций :

$$c = \exp\left(\frac{1}{T}\sum \ln C_{d,t} + k \cdot \frac{1}{T}\sum x_t\right) \quad (18)$$

Оптимальный уровень затрат на обеспечение безопасности движения определяется условием минимума совокупной функции затрат.

Математически это выражается следующим образом:

$$\frac{dC_{tot}(\mathrm{x})}{dx} = 0 \quad (19)$$

При дополнительном условии:

$$\frac{d^2 C_{\mathrm{tot}}(x)}{dx^2} > 0 \quad (20)$$

При аналитическом задании затрат получаем:

$$C_{tot}(x) = (a+b)x + ce^{-kx} \quad (21)$$

что соответствует Uобразной форме зависимости. Оптимальный уровень профилактических инвестиций x^* определяется условием минимума совокупных затрат:

$$\frac{dC_{\mathrm{tot}}(x)}{dx} = 0 \text{ или } \quad a + b = cke^{-kx} \quad (22)$$

Для железнодорожного перевозчика стоимость качества безопасности движения $C_{\text{общ}}$ по модели PAD имеет следующий вид:

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{проф}} + C_{\text{сист}} + C_{\text{ущерб}} \quad (23)$$

В формуле (23) приняты следующие обозначения:

$C_{\text{проф}}$ – затраты, связанные с проведением профилактических мероприятий, направленных на повышение уровня безопасности движения (технические инновация, цифровизация, повышение квалификации и мотивации персонала и т.д.);

$C_{\text{сист}}$ – затраты, связанные с функционированием СУБД перевозчика (управление рисками, постоянный мониторинг состояния безопасности движения, внутренний и внешний аудит СУБД);

$C_{\text{ущерб}}$ – причиненный ущерб, на ликвидацию последствий нарушений безопасности движения (затраты на восстановление работоспособности объектов инфраструктуры, штрафы, компенсации, репутационный риск и т.д.).

На рисунке 2 приведен алгоритм оценки эффективности функционирования СУБД железнодорожного перевозчика, где показана последовательность расчета экономической эффективности и ее показателей на основе модели PAD, а также оценки инвестиционной привлекательности мероприятий методом дисконтирования денежных потоков. На основе реализации данного алгоритма при сопоставлении полученных эффектов с объемом инвестиций обосновывается решение об экономической целесообразности внедрения мероприятий по повышению уровня безопасности движения. Пример расчета приведен для железнодорожной компании ТОО «ЖелДорТранс-Актобе» (таблица 2).

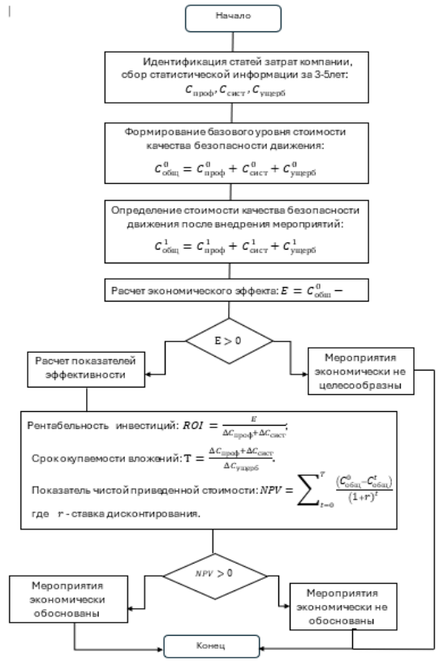


Рисунок 2 – Алгоритм расчета эффективности функционирования СУБД железнодорожного перевозчика

Таблица 2 – Исходные данные для расчета эффективности внедрения мероприятий по повышению уровня безопасности движения поездов на примере ТОО «ЖелДорТранс-Актобе»

№	Показатель	До внедрения	После внедрения
1	Затраты на профилактические мероприятия, млн. тг/год	8	14
2	Затраты на проведение контрольных мероприятий, млн. тг/год	5	7
3	Потери от инцидентов, млн. тг/год	32	12
4	Инвестиции ΔC, млн. тг	-	8

Базовый и формируемый уровни безопасности:

$$C^0_{tot} = 45 \text{ млн. тг}, \quad C^1_{tot} = 33 \text{ млн. тг},$$
$$\Delta C = 45 - 33 = 8 \text{ млн.}$$

Годовой экономический эффект $E = 12$ млн. тг.

Расчет NPV (5 лет, r=10%)э

$$NPV = \sum_{t=1}^{5} \frac{12}{(1{,}1)^t} - 8 \approx 36{,}4 - 8 = 28{,}4 \text{ млн. тг.}$$

На основе разработанной методики (формулы (3–23) и проведенных расчетов построен график U-образной зависимости совокупных затрат по модели PAD (рисунок 3).

Из рисунка 3 следует, что при низком уровне инвестиций в профилактические мероприятия наблюдаются высокая величина потерь, обусловленных техническими отказами и аварийными событиями. По мере увеличения объема инвестиций происходит снижение данных потерь, однако при чрезмерном наращивании профилактических затрат фиксируется рост совокупных издержек на обеспечение безопасности. Тем самым подтверждается существование оптимального уровня профилактики, при котором достигается минимум общих затрат на безопасность движения. Для рассмотренного случая анализ Uобразной зависимости совокупных затрат показывает, что оптимальный уровень профилактических инвестиций находится в интервале 4–6 млн. тг в год, при котором достигается минимум общих расходов на обеспечение безопасности движения.

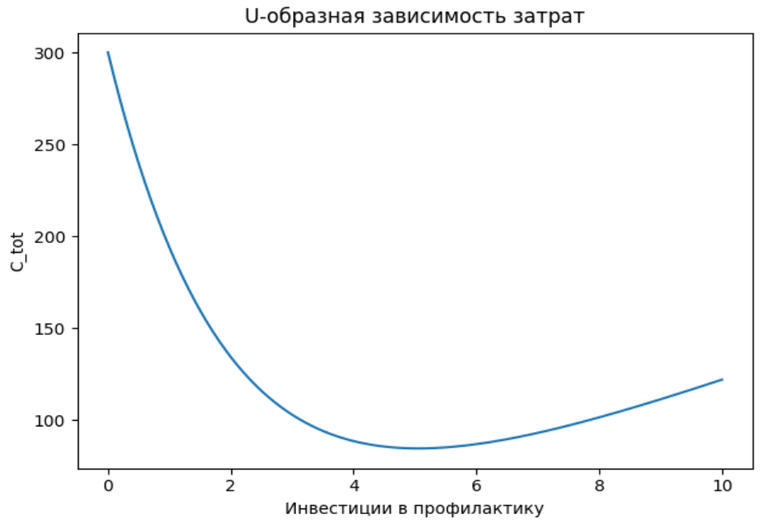


Рисунок 3 – U-образная зависимость совокупных затрат
по модели PAD на примере ТОО «ЖелДорТранс-Актобе»

Из рисунка 3 следует, что при низком уровне инвестиций в профилактические мероприятия наблюдаются высокая величина потерь, обусловленных техническими отказами и аварийными событиями. По мере увеличения объема инвестиций происходит снижение данных потерь, однако при чрезмерном наращивании

профилактических затрат фиксируется рост совокупных издержек на обеспечение безопасности. Тем самым подтверждается существование оптимального уровня профилактики, при котором достигается минимум общих затрат на безопасность движения. Для рассмотренного случая анализ Uобразной зависимости совокупных затрат показывает, что оптимальный уровень профилактических инвестиций находится в интервале 4–6 млн. тг в год, при котором достигается минимум общих расходов на обеспечение безопасности движения.

Адаптация модели PAD к условиям функционирования железнодорожного перевозчика позволяет не только концептуально обосновать применение экономического подхода к оценке безопасности движения, но и сформировать прикладной инструментарий анализа эффективности СУБД перевозчика. В рамках предлагаемой методики реализуются следующие методологические положения.

Во-первых, обеспечивается экономическое обоснование инвестиций в СУБД за счет интенсификации и классификации затрат на профилактику, оценку и контроль, а также потерь, обусловленных нарушениями безопасности движения поездов. Это позволяет рассматривать безопасность движения как объект экономического управления, а не исключительно как нормативно-техническую категорию.

Во-вторых, модель PAD используется для определения оптимального уровня профилактических затрат на основе анализа U-образной зависимости совокупных расходов от объема превентивных инвестиции. Оптимизация осуществляется путем поиска минимума функции общих затрат, что дает возможность количественно обосновать перераспределение ресурсов между профилактическими и компенсирующими мероприятиями.

В-третьих, методика обеспечивает минимизацию совокупных расходов на безопасность за счет снижения потерь от технических отказов и аварий при рациональном уровне затрат на профилактику и контроль. Для этого используются данные ретроспективного анализа инцидентов, аварий и связанных с ними экономических потерь за репрезентативный временной период.

В-четвертых, адаптация модели PAD позволяет перейти от реактивного управления безопасностью к стратегически ориентируемому управлению рисками. Это достигается за счет процессного анализа элементов СУБД, оценки их вклада в формирование риска и интеграции экономических показателей в систему управленческих решений, включая планирование, мониторинг и оценку эффективности мероприятий по повышению безопасности движения.

Информация о финансировании

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26199023 «Методология оценки эффективности системы управления безопасностью перевозчиков на железнодорожных путях общего и необщего пользования»).

Выводы

Совокупные затраты на обеспечение безопасности движения характеризуются Uобразной зависимостью от уровня инвестиций в профилактические мероприятия. Недостаточный объем превентивных вложений приводит к росту потерь, обусловленных авариями и дефектами, тогда как чрезмерное увеличение профилактических затрат формирует эффект убывающей предельной отдачи. Современные исследования подтверждают экономическую целесообразность перераспределения ресурсов в пользу профилактики до достижения оптимального уровня совокупных затрат.

Приведенные расчеты показывают, что инвестиционные вложения в объеме 8 млн тенге в повышение уровня безопасности и оптимизация затрат конкретного перевозчика привело к снижению совокупных затрат на 27 %, потери, связанные с инцидентами, уменьшены на 62 %. На основе предложенной модели PAD был установлен оптимальный уровень профилактических инвестиций (4–6 млн тенге в год), при котором достигается минимум совокупных затрат на обеспечение безопасности движения конкретного перевозчика.

Таким образом, модель PAD в адаптированном виде выступает не только инструментом экономической оценки, но и методологической основой стратегического управления безопасностью движения в железнодорожной компании, осуществляющей грузовые и пассажирские перевозки.

REFERENCES

1 European Union Agency for Railways. Guide on Safety Management System Requirements under Directive (EU) 2016/798. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018.

2 European Union Agency for Railways. Common Safety Indicators and Common Safety Targets – Annual Overview. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.

3 **Huang, Y., Zhang, Z., Tao, Y., Hu, H.** Quantitative risk assessment of railway intrusions with text mining and fuzzy rule-based bow-tie model // Advanced Engineering Informatics. – 2022. – Vol. 54. – Art. 101726. – https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101726.

4 **Huang, Y., Zhang, Z., Hu, H.** Risk propagation mechanisms in railway systems under extreme weather: A knowledge graph-based unsupervised causation chain approach // Reliability Engineering & System Safety. – 2025. – Vol. 260. – Art. 110976. – https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110976.

5 **Wang, H., Guo, L., Chen, T.** GSI-TOPSIS Method for Quantization of Railway Safety Situation Based on Incident and Accident Data // Urban Rail Transit. – 2025. – Vol. 11. – P. 335–350. – https://doi.org/10.1007/s40864-025-00247-7.

6 **Bondarabadi, M.A., Rahimi, H., Arefkhani, H., Tavakoli Kashani, A.** A new approach to assess safety performance of rail regions with an emphasis on the resources and equipment of each region // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2023. – Vol. 25. – Art. 100371. – https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100371.

7 **Love, P.E., Edwards, D.J., Smith, J.** Error cost in infrastructure projects // IEEE Transactions on Engineering Management. – 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 1–12. – https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2791287.

8 **Sadeghi, H., Mohandes, S. R., Yunusa-Kaltungo, A., Cheung, C., Manu, P.** A state-of-the-art review of safety leading indicators across diverse industries // Journal of Safety Science and Resilience. – 2025. – Art. 100272. – https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2025.100272.

9 **Aven, T.** Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation // Reliability Engineering & System Safety. – 2016. – Vol. 153. – P. 1–10. – https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.008.

10 **Aven, T.** The concept of risk in a historical perspective // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 210. – Art. 107531. – https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107531.

11 **Feigenbaum, A.V.** Total quality control. – New York: McGraw-Hill, 1991. – 863 p.

12 **Schiffauerova, A., Thomson, V.** A review of research on cost of quality models and best practices // International Journal of Quality & Reliability Management. – 2006. – Vol. 23. – № 6. – P. 647–669.

12 **Sower, V. E., Quarles, R.** Cost of quality usage and its relationship to quality system maturity // International Journal of Quality & Reliability Management. – 2017. – Vol. 34. – P. 144–158.

14 **Sreedharan, V.R., Raju, R., Suresh, M.** Quality cost and performance measurement: A review // Production Planning & Control. – 2020. – Vol. 31. – P. 1–15.

15 **Rao, S. S., Solis, L. E., Raghunathan, T. S.** A framework for quality cost measurement // Total Quality Management & Business Excellence. – 2019. – Vol. 30. – P. 1–17.

16 **Tsai, W. H.** Quality cost measurement under activity-based costing // International Journal of Production Economics. – 2018. – Vol. 199. – P. 1–12.

17 **Chiadamrong, N.** The development of an economic quality cost model // Total Quality Management & Business Excellence. – 2021. – Vol. 32. – P. 1–18.

18 **Al-Doori, J. A.** Cost of quality and its impact on organizational performance // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 340. – P. 130–142.

Поступило в редакцию 31.03.26.
Поступило с исправлениями 01.04.26.
Принято в печать 14.05.26.

Н. А. Токмурзина[1], С. С. Абдуллаев[2], Е. М. Набиев[3],
Е. Н. Сисекенова[4], Б. А. Аймагамбетова[5]
[1,2,3,4,5]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
31.03.26 ж. баспаға түсті.
01.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
14.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

PREVENTION–APPRAISAL-DEFECTS МОДЕЛІ ТЕМІРЖОЛ ТАСЫМАЛДАУШЫСЫНЫҢ ҚАУІПСІЗДІГІН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ

Зерттеудің өзектілігі теміржол тасымалының сенімділігіне қойылатын талаптардың өсуі жағдайында қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйелерінің тиімділігін арттыру қажеттілігіне байланысты. Зерттеудің идеясы қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесінің тиімділігін бағалауға экономикалық бағдарланған тәсілді қолдану болып табылады, онда қауіпсіздік деңгейі бұзушылықтардың алдын алу, бақылау және жою арасында ресурстарды оңтайлы бөлу нәтижесінде қарастырылады. Мақалада теміржол тасымалдаушысының қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесінің тиімділігін бағалаудың әдіснамалық тәсілдері қарастырылған. Қозғалыс қауіпсіздігінің бұзылуына байланысты қауіпсіздікті қамтамасыз ету шығындары мен шығындарын салыстыруға негізделген экономикалық тәсілді қолданудың орындылығы негізделген. Қауіпсіздік деңгейін бағалаудың қолданыстағы халықаралық әдістемелерін талдау оқиғаның басқарушылық тиімділігін бағалау тұрғысынан шектеулерді анықтауға мүмкіндік берді. Әдістемелік негіз ретінде Prevention–Appraisal–Defects моделін бейімдеу ұсынылды, бұл техникалық сәтсіздіктердің алдын алу, бақылау және салдары шығындарын құрылымдауға, сондай-ақ профилактикалық инвестициялардың оңтайлы деңгейін анықтауға мүмкіндік береді. Қозғалыс қауіпсіздігін арттыру жөніндегі іс-шаралардың экономикалық тиімділігін есептеу алгоритмі әзірленді. Әдістеменің практикалық қолданылуы теміржол тасымалдаушысының мысалында көрсетілген, бұл prevention–Appraisal–Defects моделін экономикалық бағалау және қозғалыс қауіпсіздігін стратегиялық басқару құралы ретінде пайдалану мүмкіндігін растайды.

Кілтті сөздер: қозғалыс қауіпсіздігін басқару жүйесі, экономикалық тиімділік, қозғалыс қауіпсіздігінің бұзылуынан болатын зиян, Prevention–Appraisal–Defects моделі, теміржол көлігі.

N. A. Tokmurzina[1], S. S. Abdullayev[2], Y. M. Nabiev[3],
E. N. Sisekenova[4], B. A. Aimagambetova[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 31.03.26.
Received in revised form 01.04.26.
Accepted for publication 14.05.26.

THE PREVENTION–APPRAISAL–DEFECTS MODEL AS A TOOL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF A RAILWAY CARRIER'S SAFETY MANAGEMENT SYSTEM

The relevance of the study is due to the need to improve the effectiveness of traffic safety management systems in the context of increasing requirements for the reliability of rail transportation. The idea of the study is to apply an economically oriented approach to assessing the effectiveness of the traffic safety management system, in which the level of safety is considered as the result of an optimal allocation of resources between prevention, control and elimination of the consequences of violations. The article under discussion herein explores methodological approaches to assessing the effectiveness of a railway carrier's traffic safety management system. The economic approach is justified by comparing the costs and losses associated with traffic safety violations. A review of extant international methods for assessing safety levels has revealed limitations in terms of evaluating the managerial effectiveness of events. The adaptation of the Prevention–Appraisal–Defects model is proposed as a methodological basis, allowing the costs of prevention, control, and consequences of technical failures to be structured, as well as the optimal level of preventive investment to be determined. An algorithm has been developed to calculate the economic efficiency of measures to improve traffic safety. The practical applicability of the methodology has been demonstrated using the example of a railway carrier, which confirms the possibility of using the Prevention–Appraisal–Defects model as a tool for economic assessment and strategic traffic safety management.

Keywords: traffic safety management system, economic efficiency, damage caused by traffic safety violations, Prevention–Appraisal–Defects model, railway transport.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Абдрахманов Ермаганбет Сейсенбекович, техника ғылымдарының кандидаты, «Металлургия» кафедрасының профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: erai1512@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-9726-1642

Абдрахманов Ермаганбет Сейсенбекович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: erai1512@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-9726-1642

Abdrakhmanov Ermaganbet Seisenbekovich, Candidate Technical Science, Professor of the Metallurgy Department, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: erai1512@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-9726-1642

Абдулина Сауле Амангельдыевна, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Абдулина Сауле Амангельдыевна, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Abdulina Saule Amangeldiyevna, professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Абдуллаев Сейдулла Сейдеметович, т.ғ.д., профессор, Сәтбаев Университет, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.abdullayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5028-8143

Абдуллаев Сейдулла Сейдеметович, д.т.н., профессор, Satbayev University, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: s.abdullayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5028-8143

Abdullayev Seidulla, Doctor of Technical Sciences, Professor, Satbayev University, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.abdullayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5028-8143

Абдураимов Азизбек Ералыұлы, PhD, «6D060300 – Механика» мамандығы, У. А. Жолдасбекова атындағы Механика-инженерлік институты Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: zizo_waterpolo@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0815-3349

Абдураимов Азизбек Ералиевич, PhD по специальности «6D060300 – Механика», Институт механики и машиноведения имени У. А. Джолдасбекова г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: zizo_waterpolo@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0815-3349

Abdraimov Azizbek, PhD in the specialty «6D060300 – Mechanics», U. A. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering. Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: zizo_waterpolo@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0815-3349

Абекова Айдана Жумагалиевна, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Satbayev университеті, Алматы қ., 05000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Абекова Айдана Жумагалиевна, магистр технических наук, ст.преподователь, университет Satbayev, г. Алматы, 05000, Республика Казахстан, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Abekova Aidana Zhumagalievna, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Satbayev University; Almaty, 05000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Абижанова Индира Кенжебековна, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: iabizhanova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3218-7246

Абижанова Индира Кенжебековна, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, 070003, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, e-mail: iabizhanova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3218-7246

Abizhanova Indira Kenzhebekovna, Doctoral Student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070003, Ust-Kamenogorsk, The Republic of Kazakhstan, e-mail: iabizhanova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3218-7246

Абсадыков Бахыт Нарикбаевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: b.absadykov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-7829-0958

Абсадыков Бахыт Нарикбаевич, доктор технических наук, профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: b.absadykov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-7829-0958

Absadykov Bakhyt Narikbayevich, Doctor of Technical Sciences, professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: b.absadykov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-7829-0958

Адылканова Меруерт Адылканкызы, PhD, қауымд.профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті Өскемен қ., 070004,Қазақстан Республикасы, e-mail: milka160281@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8193-116X

Адылканова Меруерт Адылканкызы, PhD, ассоц. профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: milka160281@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8193-116X

Adilkanova Meruert Adylkankyzy, PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: milka160281@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8193-116X

Аймагамбетова Бибижан Асылбековна, докторант, Сәтбаев университет, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: Aimagambetova.B@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0000-0271-7847

Аймагамбетова Бибижан Асылбековна, докторант, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: Aimagambetova.B@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0000-0271-7847

Aimagambetova Bibizhan, Doctoral Student, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: Aimagambetova.B@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0000-0271-7847

Алипова Алима Нурлановна, LogCentre координаторы, Қазақ-Неміс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: alipova@dku.kz, https://orcid.org/0009-0005-5172-4687

Алипова Алима Нурлановна, координатор Logcentre Казахстанско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: alipova@dku.kz, https://orcid.org/0009-0005-5172-4687

Alipova Alima Nurlanovna, Coordinator of LogCentre, Kazakh-German University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: alipova@dku.kz, https://orcid.org/0009-0005-5172-4687

Алтаев Ернар Алтайұлы, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yernar6ai@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-3160-1107

Алтаев Ернар Алтайұлы, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: yernar6ai@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-3160-1107

Altayev Yernar Altaiuly, Junior Research Scientist at the Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: yernar6ai@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-3160-1107

Альтаева Жанар Жаксыбаевна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhanar1009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1027-9159

Альтаева Жанар Жаксыбаевна, кандидат технических наук, доцент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: zhanar1009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1027-9159

Altayeva Zhanar Zhaksybaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail zhanar1009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1027-9159

Асанов Багдат Уланұлы, техника ғылымдарының магистрі, докторант, Satbayev университеті, Алматы қ., 05000, Қазақстан Республикасы, e-mail: asanov_bagdat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

Асанов Багдат Уланулы, магистр технических наук, докторант, университет Satbayev, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: asanov_bagdat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

Asanov Bagdat Ulanuly, Master of Technical Sciences, PhD student, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: asanov_bagdat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

Аскаров Бахтияр Шарапиденович, PhD, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының қауымд. профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

Аскаров Бахтияр Шарапиденович, PhD, ассоц.профессор кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

Askarov Bakhtiyar, PhD, Associate Professor of the Industrial Transport Departmentt, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda city, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: bahtiyar_askarov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5362-0928

Асқаров Ерлан Сейтқасымұлы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, Халықаралық көлік және гуманитарлық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: erlan57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4487-4458

Аскаров Ерлан Сейткасымович, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: erlan57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4487-4458

Askarov Erlan Seytkasymovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International Transport and Humanitarian University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: erlan57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4487-4458

Аукенова Бекзат Қабыкенқызы, PhD, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: bekzat89a@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-2724-4447

Аукенова Бекзат Қабыкенқызы, PhD, ВКТУ имени Д. Серикбаева, 070004, Республика Казахстан, г.Усть-Каменогорск, e-mail: bekzat89a@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-2724-4447

Aukenova Bekzat, PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: bekzat89a@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-2724-4447

Ахметова Гульжайнат Есенжоловна, PhD, доцент, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: agulzhajnat@bk.ru, https://orcid.org/0000-0001-8244-5027

Ахметова Гульжайнат Есенжоловна, PhD, доцент, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: agulzhajnat@bk.ru, https://orcid.org/0000-0001-8244-5027

Akhmetova Gulzhaynat Yesenzholovna, PhD, Associate Professor, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: agulzhajnat@bk.ru, https://orcid.org/0000-0001-8244-5027

Әсетұлы Дәурен, «8D07209 Материалдарды өңдеудің прогрессивті технологиялары» мамандығы бойынша докторант, «Энергетика және машина жасау» институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: assetuly.d@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0000-8552-0934

Асетулы Дәурен, докторант по специальности «8D07209 Прогрессивные технологии обработки материалов», институт «Энергетики и машиностроения», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: assetuly.d@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0000-8552-0934

Assetuly Dauren, Doctoral Student in «8D07209 Progressive Technologies of Material Processing», Institute of Energy and Mechanical Engineering, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: assetuly.d@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0000-8552-0934

Әскерханов Ерзат Бекболатұлы, студент Назарбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ., 010000, e-mail: askerkhanov.yerzat@gmail.com, https://orcid.org/ 0009-0007-5092-4382

Аскерханов Ерзат Бекболатулы, студент, Назарбаев университет, Республика Казахстан, г. Астана, 010000, e-mail: askerkhanov.yerzat@gmail.com, https://orcid.org/ 0009-0007-5092-4382

Askerkhanov Yerzat Bekbolatuly, Student, Nazarbayev University, Astana, 010000, e-mail: askerkhanov.yerzat@gmail.com, https://orcid.org/ 0009-0007-5092-4382

Әлібекова Балым Әлібекқызы, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының инженері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: balymalibekova304@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-7644-4527

Әлібекова Балым Әлібекқызы, инженер научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: balymalibekova304@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-7644-4527

Alibekova Balym Alibekkyzy, Engineer of Scientific Research Center «Surface engineering and tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: balymalibekova304@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-7644-4527

Bembenek Michał, Өндірістік жүйелер департаментінің профессоры, AGH университеті Краковта, Краков қ., 30-059, Польша, e-mail: bembenek@agh.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Bembenek Michał, профессор, Департамент производственных систем, AGH университет в Кракове, г. Краков, 30-059, Польша, e-mail: bembenek@agh.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Bembenek Michał, Professor of the Department of Production Systems, AGH University of Krakow, Krakow, 30-059, Poland, e-mail: bembenek@agh.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Байгунусов Айдос Жомартханович, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Байгунусов Айдос Жомартханович, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Baigunussov Aidos Zhomarthanovich, Doctoral Student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Бакиров Алтынсары Газизұлы, PhD, қауымд. профессор, «Металлургия» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: altynsary@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3742-3467

Бакиров Алтынсары Газизович, PhD, ассоц. профессор, кафедра «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: altynsary@mail.ru, https://orcid.org//0000-0002-3742-3467

Bakirov Altynsary Gazizovich, PhD, Associate Professor, Department of Metallurgy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: altynsary@mail.ru, https://orcid.org//0000-0002-3742-3467

Балабаев Оюм Темиргалиевич, техника ғылымдарының кандидаты, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: balabaev.ot@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

Балабаев Оюм Темиргалиевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: balabaev.ot@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

Balabayev Oyut, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Industrial Transport Department, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: balabaev.ot@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6212-9350

Балабекова Қырмызы Гинаятқызы, PhD, доцент, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8242-6675

Балабекова Кырмызы Гинаятовна, PhD, доцент, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8242-6675

Balabekova Kyrmyzy Ginayatovna, PhD, Associate Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8242-6675

Басқанбаева Динара Жұмабайқызы, PhD, қауымд.профессор, «Технологиялық машиналар және газтурбиналық қондырғылар» кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Басканбаева Динара Джумабаевна, PhD, ассоц.профессор, кафедра «Технологические машины и газотурбинные установки», Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Baskanbayeva Dinara, PhD, Associate Professor of the Department of Technological machines and gas turbine installations, Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Болатов Нуржан Қажымуратұлы, қауымд. профессор, техника ғылымдарының кандидаты, Инженерлік-экологиялық факультеті, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті мекемесі, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Булатов Нуржан Кажмуратович, ассоц. профессор, кандидат технических наук, Инженерно-экологический факультет, Учреждение «Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Bulatov Nurzhan Kazhmuratovich, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Faculty of Environmental Engineering, A. Myrzakhmetov Kokshetau University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Буйткенов Дастан Болатұлы, жетекші ғылыми қызметкер, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығы, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, 070004, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Buitkenovd@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Буйткенов Дастан Болатулы, ведущий научный сотрудник, НИЦ «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: Buitkenovd@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Buitkenov Dastan Bolatuly, Leading Researcher, Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: Buitkenovd@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Байжан Дарын Рашитұлы, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: daryn.baizhan1@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9105-3129

Байжан Дарын Рашитулы, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: daryn.baizhan1@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9105-3129

Baizhan Daryn Rashituly, Senior Researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Kazakhstan, e-mail: daryn.baizhan1@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9105-3129

Батырбек Әлібек Есімбекұлы, техника ғылымдарының магистрі, «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.batyrbek@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-3369-6804

Батырбек Әлібек Есімбекулы, магистр технических наук, кафедра «Технологии искусственного интеллекта», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: a.batyrbek@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-3369-6804

Batyrbek Alibek Esimbekuly, Master of Technical Sciences Department of Artificial Intelligence Technologies, Karaganda Industrial University" Temirtau 101400 Republic of Kazakhstan e-mail: a.batyrbek@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-3369-6804

Бердимуратов Нурбол Ерболұлы, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurbol.ber@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-6880-6439

Бердимуратов Нурбол Ерболулы, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: nurbol.ber@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-6880-6439

Berdimuratov Nurbol Yerboluly, Junior Researcher of the Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbol.ber@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-6880-6439

Билялов Канат Сейтахметович, Пирометаллургия менеджері ERG Research and Development ЖСШ, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kanat.bilyalov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0009-1583-4220

Билялов Канат Сейтахметович, Менеджер по пирометаллургии ТОО ERG Research and Development, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: kanat.bilyalov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0009-1583-4220

Bilyalov Kanat Seitakhmetovich, Pyrometallurgy Manager ERG Research and Development LLP, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kanat.bilyalov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0009-1583-4220

Буйткенов Дастан Болатулы, PhD, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: buitkenov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Буйткенов Дастан Болатулы, PhD, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: buitkenov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Buitkenov Dastan Bolatuly, PhD, Leading Researcher of the Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Kazakhstan, e-mail: buitkenov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Васильков Дмитрий Сергеевич, «Жол-құрылыс машиналары» факультетінің аспиранты Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу қ., 125319, Ресей Федерациясы, e-mail: dima.1206.vasan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-5317-2503

Васильков Дмитрий Сергеевич, аспирант факультета «Дорожно-строительные машины» Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, Москва, 125319, e-mail: dima.1206.vasan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-5317-2503

Vasilkov Dmitry, student, Faculty «Road construction machines», Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: dima.1206.vasan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-5317-2503

Витулёва Елизавета Сергеевна, PhD, Satbayev University Ақпараттық және ғарыштық технологиялардың ұжымдық пайдаланудағы ұлттық ғылыми зертханасының аға ғылыми қызметкері, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-6075-4870

Витулёва Елизавета Сергеевна, PhD, ст.научный сотрудник, Национальная научная лаборатория коллективного пользования информационных и космических технологий Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-6075-4870

Vitulyova Yelizaveta, PhD, Senior Researcher, National Scientific Laboratory for the Collective Use of Information and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-6075-4870

Гельманова Зоя Салиховна, экономика ғылымдарының кандидаты, доцент, «Экономика және бизнес» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: zoyakgiu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9052-9490

Гельманова Зоя Салиховна, кандидат экономических наук, доцент, кафедра «Экономика және бизнес», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: zoyakgiu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9052-9490

Gelmanova Zoya Salihovna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of «Economics and Business», Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: zoyakgiu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9052-9490

Джомартов Асылбек Әбдіразақұлы, У. А. Джолдасбеков атындағы Механика-инженерлік институтының тәжірибелік жұмыстар және коммерцияландыру бөлімінің меңгерушісі, техникалық ғылым докторы, 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: legsert@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7262-5267

Джомартов Асылбек Абдразакович, доктор технических наук, руководитель «Отдела опытно экспериментальных работ и коммерциализации» Института механики и машиноведения имени У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: legsert@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7262-5267

Jomartov Asylbek, Head of the «Department of Experimental Work and Commercialization» of U. A. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering doctor of Technical Sciences, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: legsert@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7262-5267

Дудкин Михаил Васильевич, «Европлюс Восток» ЖШС, техника ғылымдарының докторы, профессор, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Дудкин Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор, ТОО «Европлюс Восток», г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Dudkin Mikhail Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, professor, «Europlus Vostok» LLP, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Джундибаев Маулен Кайрекенович, Ғылыми қызметкер, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.jundibayev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Джундибаев Маулен Кайрекенович, научный сотрудник, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: m.jundibayev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Jundibayev Maulen Kairekenovich, Research Fellow, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.jundibayev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Джундибаева Акгул Султанбековна, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Dzhundibayeva.as@students.tou.edu.kz, https://orcid.org/0009-0006-5244-3497

Джундибаева Акгул Султанбековна, докторант по специальности «Металлургия», Факультет Инженерия, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Dzhundibayeva.as@students.tou.edu.kz, https://orcid.org/0009-0006-5244-3497

Jundibayeva Akgul Sultanbekovna, Doctoral Student in «Metallurgy», Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Dzhundibayeva.as@students.tou.edu.kz, https://orcid.org/0009-0006-5244-3497

Евфратов Данияр Жанатович, PhD докторанты, техника ғылымдарының магистрі, «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» мамандығы, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: evfratovdaniar@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-1185-9258

Евфратов Данияр Жанатович, магистр технических наук, докторант PhD по специальности «Транспорт, транспортная техника и и технологии», Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: evfratovdaniar@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-1185-9258

Yevfratov Daniyar Zhanatovich, Doctoral Student in the specialty «Transport, transport equipment and technologies», Faculty of Engineering, Master of Technical Sciences, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: evfratovdaniar@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-1185-9258

Елеманов Данияр Серікболович, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: atonai2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3530-9476

Елеманов Данияр Серікболович, ст. преподаватель Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: atonai2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3530-9476

Yelemanov Daniyar Serikbolovich, Senior lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: atonai2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3530-9476

Елемесов Қасым Коптілеуұлы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Энергетика және машинажасау институтының директоры, Satbayev University, Алматы қ., 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Елемесов Касым Коптлеуевич, кандидат технических наук, профессор, директор Института энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Yelemessov Kassym, Candidate of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Есеркегенова Бекзат Жамбылқызы, PhD, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: Beserkegenova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-3719-2582

Есеркегенова Бекзат Жамбылқызы, ШҚТУ, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: Beserkegenova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-3719-2582

Eserkegenova Bekzat Zhambylkyzy, PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: Beserkegenova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-3719-2582

Жаксыбаев Нурлан Аблаевич, «Технологиялық машиналар мен жабдықтар» мамандығы бойынша докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhaknurlan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-8341-0063

Жаксыбаев Нурлан Аблаевич, докторант по специальности «Технологические машины и оборудования», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhaknurlan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-8341-0063

Nurlan Ablaevich Zhaxybayev, PhD student in Technological Machines and Equipment, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaknurlan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-8341-0063

Жаманбаев Бауржан Уалиханович, PhD, «Көлік, көлік техникасы және технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhaman78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9027-9540

Жаманбаев Бауржан Уалиханович, PhD, ст. преподаватель кафедры «Транспорт, транспортная техника и технологии», ЕНУ имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: zhaman78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9027-9540

Zhamanbayev Baurzhan Ualikhanovich, PhD, Senior lecturer of the Department of Transport, Transport Equipment and Technologies, ENU named after L. N. Gumilyov, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaman78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9027-9540

Жексембинова Гулим Берикболкызы, докторант, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: Gzheksembinova@ektu.kz, https://orcid.org/0009-0006-2540-2948

Жексембинова Гулим Берикболкызы, докторант, ВКТУ имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: Gzheksembinova@ektu.kz, https://orcid.org/0009-0006-2540-2948

Zheksembinova Gulim, Doctoral Student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 070010, e-mail: Gzheksembinova@ektu.kz, https://orcid.org/0009-0006-2540-2948

Жумагалиев Ерлан Уланович, техника ғылымдарың кандидаты, қауымд.профессор, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының аға оқытушысы, Актобе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жумагалиев Ерлан Уланович, кандидат технических наук, ассоц.профессор, ст. преподаватель, кафедра «Металлургия и горное дело» Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Zhumagaliyev Yerlan Ulanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Metallurgy and Mining, K. Zhubanov Aktobe Regional University. Aktobe, 030000 Republic of Kazakhstan, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жұнісов Абылай Қайыртасұлы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Торайғыров университеті, Металлургия кафедрасының меңгерушісі, профессор, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Жунусов Аблай Каиртасович, кандидат технических наук, профессор, Заведующий кафедрой металлургии, профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Zhunusov Ablay, Candidate of Technical Science, professor, Head of the Department of Metallurgy, Professor Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Жұнісова Айгүл Қайыргелдықызы, магистр, аға оқытушы, «Көліктік техника және логистика» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Жунусова Айгуль Каиргельдиновна, магистр, ст.преподаватель, кафедра «Транспортная техника и логистика», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Zhunussova Aygul, Master Senior teacher, Department of «Transport Equipment and Logistics», Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Жумагалиев Бауыржан Оралович, докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baurzuma@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-7688-471X

Жумагалиев Бауыржан Оралович, докторант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: baurzuma@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-7688-471X

Zhumagaliev Bauyrzhan Oralovich, Doctoral Student, Kazakh Agrotechnical Research University named after S.Seifullin, Zhenis 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baurzuma@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-7688-471X

Жақан Армат Медетұлы, «Металлургия» мамандығы бойынша докторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: armat.01.01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3810-0528

Жақан Армат Медетұлы, докторант по специальности «Металлургия», университет Торайгырова, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: armat.01.01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3810-0528

Zhakan Armat Medetuly, Doctoral student of majoring in «Metallurgy», Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: armat.01.01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3810-0528

Жетибаева Макпал Махашевна, оқытушы (ассистент), Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: makpalzhetibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5622-6977

Жетибаева Макпал Махашевна, преподаватель (ассистент), Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: makpalzhetibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5622-6977

Zhetibaeva Makpal Makhashevna, Teacher (Assistant), Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: makpalzhetibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5622-6977

Жумашев Алишер Серикович, «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» мамандығы бойынша докторант, Инженерлік факультеті, Торайғыров атындағы университет, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zhumashevalisher@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-3193-1017

Жумашев Алишер Серикович, докторант по специальности «Транспорт, транспортная техника и технологии», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Zhumashevalisher@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-3193-1017

Zhumashev Alisher Serikovich, Doctoral candidate in «Transport, Transport Engineering, and Technology», Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zhumashevalisher@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-3193-1017

Забиева Алия Батырбекқызы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zabiyeva_ab@ebu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Забиева Алия Батырбековна, кандидат технических наук, доцент, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: zabiyeva_ab@ebu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Zabiyeva Aliya Batyrbekovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zabiyeva_ab@ebu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Ибраимов Тарас Сагызгалиевич, Қ. И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: taras_ibraimov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9298-7612

Ибраимов Тарас Сагызгалиевич, докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: taras_ibraimov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9298-7612

Ibraimov Taras Sagyzgalievich, Doctoral Student, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: taras_ibraimov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9298-7612

Исагулов Аристотель Зейнуллинович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің атқарушы директоры, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

Исагулов Аристотель Зейнуллинович, доктор технических наук, профессор, Исполнительный директор Карагандинского технического университета имени А. Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

Isagulov Aristotle Zeynullinovich, Doctor of technical sciences, Professor, Executive director of the Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

Имангазинова Динара Балгабековна, аға оқытушы Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, г. Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: imangazinovad@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3023-6042

Имангазинова Динара Балгабековна, ст.преподаватель, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар,140008, Республика Казахстан, e-mail: imangazinovad@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3023-6042

Imangazinova Dinara Balgabekovna, Senior Lecturer, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: imangazinovad@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3023-6042

Искаков Даулет Кайратович, «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» мамандығы бойынша докторант, Инженерлік факультеті, Торайғыров атындағы университет, Павлодар қ., 140013, Қазақстан Республикасы, e-mail: diskakov765@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-2017-5286

Искаков Даулет Кайратович, докторант по специальности «Транспорт, транспортная техника и технологии», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140013, Республика Казахстан, e-mail: diskakov765@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-2017-5286

Iskakov Daulet Kairatovich, Doctoral candidate in «Transport, Transport Engineering, and Technology», Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140013, Republic of Kazakhstan, e-mail: diskakov765@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-2017-5286

Искаков Кайрат Муратович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, «Көлік техникасы және логистика» кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: iska_k75@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-8146-2535

Искаков Кайрат Муратович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, кафедра «Транспортная техника и логистика», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: iska_k75@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-8146-2535

Iskakov Kairat Muratovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of «Transport equipment and logistics», Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: iska_k75@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-8146-2535

Итыбаева Галия Тулеубаевна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140007, Қазақстан Республикасы, e-mail: galiaitibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6385 8627

Итыбаева Галия Тулеубаевна, кандидат технических наук, профессор, факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140007, Республика Казахстан, e-mail: galiaitibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6385 8627

Itybayeva Galiya Tuleubaevna, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140007, Republic of Kazakhstan, e-mail: galiaitibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6385 8627

Камал Әзиз Нұтпуллаоглы, «6D060300 – Механика» мамандығының докторанты, атындағы Механика-инженерлік институты У. А. Жолдасбекова, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: kan77705@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4454-8233

Камал Азиз Нутпуллаоглы, докторант по специальности «6D060300 – Механика», Институт механики и машиноведения имени У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: kan77705@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4454-8233

Kamal Aziz, Doctoral Candidate in the specialty «6D060300 – Mechanics», U. A. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: kan77705@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4454-8233

Камзанов Нурбол Садыканович, PhD, «Көлік» бағыты бойынша қауымд. профессор, Satbayev университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Камзанов Нурбол Садыканович, PhD, ассоц. профессор направления «Транспорт», университет Satbayev, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Kamzanov Nurbol Sadykanovich, PhD, Associate Professor of the direction «Transport», Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000

Каниев Мади Ермекбаевич, Қазақ-Неміс университетінің ғылыми қызметкері, Қазақ-Неміс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kaniyev.me@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-6583-2559

Каниев Мади Ермекбаевич, Научный сотрудник Казахстнаско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: Kaniyev.me@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-6583-2559

Kaniyev Madi Yermekbayevich, Researcher Kazakh-German University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kaniyev.me@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-6583-2559

Кареneева Жазира Алпысбаевна, техника ғылымдарының магистрі, лектор, Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті, Алматы қ., 050065, Қазақстан Республикасы, e-mail: lashyn7979@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7197-5380

Кареneева Жазира Алпысбаевна, магистр технических наук, лектор, Международный инженерно-технологический университет, г. Алматы, 050065, Республика Казахстан, e-mail: lashyn7979@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7197-5380

Kareneyeva Zhazira, Master of Technical Sciences, Lecturer, International Engineering and Technology University, Almaty, 050065, Republic of Kazakhstan, e-mail: lashyn7979@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7197-5380

Каримова Жанар Рамазановна, аға оқытушы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: t_zhanar@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-2148-6096

Каримова Жанар Рамазановна, ст. преподаватель, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: t_zhanar@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-2148-6096

Karimova Zhanar Ramazanovna, Senior Lecturer, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: t_zhanar@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-2148-6096

Касенов Асылбек Жумабекович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Павлодар қ., 140008, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kasenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Касенов Асылбек Жумабекович, кандидат технических наук, профессор, Факультет инженерии, Торайгыров университет, Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, Павлодар, 140008, г. Тараз, 080000 Республика Казахстан, e-mail: kasenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001- 9552-1439

Kassenov Assylbek Zhumabekovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Kazakh National University of water management and irrigation, Pavlodar, 140008, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kasenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Касымова Динара Бекжановна, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinara_kassymova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

Касымова Динара Бекжановна, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: dinara_kassymova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

Kassymova Dinara Bekzhanovna, Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinara_kassymova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0937-8477

Каукаров Алтынбек Кубашевич, PhD, аға оқытушы, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: altynbek-79@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5681-5469

Каукаров Алтынбек Кубашевич, PhD, ст.преподаватель, кафедра «Транспортная техника, организация перевозок и строительства», АРУ имени К. Жубанова, г. Актобе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: altynbek-79@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5681-5469

Kaukarov Altynbek Kubashevich, PhD, Senior Lecturer, Department of «Transport Equipment, Organization of Transportation and Construction», ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: altynbek-79@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5681-5469

Квон Светлана Сергеевна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Әбілқас Сағынов атындағы Машинажасау факультеті, Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Квон Светлана Сергеевна, кандидат технических наук, профессор, Факультет машиностроение, Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Kvon Svetlana Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Кегенбеков Жандос Кадырханович, Қазақ-Неміс университетінің Инжиниринг және ақпараттық технологиялар факультетінің деканы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kegenbekov@dku.kz, https://orcid.org/0000-0001-8175-7440

Кегенбеков Жандос Кадырханович, декан факультета инжиниринга и информационных технологий Казахстнаско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: kegenbekov@dku.kz , https://orcid.org/0000-0001-8175-7440

Kegenbekov Zhandos Kadyrkhanovich, Dean of the Faculty of Engineering and Information Technologies, Kazakh-German University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kegenbekov@dku.kz, https://orcid.org/0000-0001-8175-7440

Киздарбекова Мақпал Жирімбайқызы , докторант, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавловск қ., 150000, Қазақстан Республикасы, e-mail: makpal7813@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2984-5933

Киздарбекова Мақпал Жирімбайқызы, докторант, Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, 150000, Республика Казахстан, e-mail: makpal7813@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2984-5933

Kizdarbekova Makpal Zhirimbaevna, Doctoral Student, M. Kozybaev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, e-mail: makpal7813@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2984-5933

Ковалев Павел Валерьевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «ҰЗУ Ұлы Петрдің Санкт-Петербург политехникалық университеті, Машина жасау, материалдар және көлік институты, Санкт-Петербург қ., 188544, Ресей Федерациясы, e-mail: kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Ковалев Павел Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, НИУ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта, г. Санкт-Петербург, 188544, Российская Федерациясы, e-mail: kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Kovalev Pavel Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor NRU Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, St. Petersburg, 188544, Russian Federation, e-mail: kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Кокаева Гульнара Айтикеновна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, профессордың м.а., Инжиниринг және азық-түлік технологиялары институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

Кокаева Гульнара Айтикеновна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, и.о. профессора Института инжиниринга и пищевых технологий, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

Kokayeva Gulnara Aitikenovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Professor at the Institute of Engineering and Food Technology, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

Конгуева Анар Женисовна, Қазақ-Неміс университетінің ғылыми қызметкері, Қазақ-Неміс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: konguyeva@ect.kz, https://orcid.org/0009-0005-6338-1028

Конгуева Анар Женисовна, Научный сотрудник Казахстнаско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: konguyeva@ect.kz, https://orcid.org/0009-0005-6338-1028

Konguyeva Anar Zhenisovna, Researcher Kazakh-German University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: konguyeva@ect.kz, https://orcid.org/0009-0005-6338-1028

Косбармаков Самат Жаксибаевич, магистр, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

Косбармаков Самат Жаксибаевич, магистр, докторант кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

Kosbarmakov Samat, Master, Doctoral Student of the Industrial Transport Department, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda city, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.kosbarmakov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6812-7727

Кобеген Ерболат, Инженер, Шайсұлтан Шаяхметов атындағы «Тіл-Қазына» ұлттық ғылыми-практикалық орталығы», Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kobegenerbolat911@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8790-7470

Кобеген Ерболат, Инженер, «Национальный научно-практический центр «Тіл-Қазына» имени Шайсултана Шаяхметова», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Kobegenerbolat911@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8790-7470

Kobegen Erbolat, Engineer, «National Scientific and Practical Center «Til-Kazyna» named after Shaisultan Shayakhmetov», Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kobegenerbolat911@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8790-7470

Куанышев Мурат Кулынтаевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: k-murat-57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8307-3675

Куанышев Мурат Кулынтаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ имени К. Жубанова, г. Актобе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: k-murat-57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8307-3675

Kuanyshev Murat Kulyntaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Organization of Transportation and Construction, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: k-murat-57@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8307-3675

Кудиярбек Қуаныш Есімханұлы, «Машина жасау» кафедрасының докторанты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050006, Қазақстан Республикасы, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-2649-8033

Кудиярбек Қуаныш Есімханұлы, докторант кафедры «Машиностроение», Сатпаев университет, г. Алматы, 050006, Республика Казахстан, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-2649-8033

Kudiyarbek Kuanysh, PhD, Doctoral Student, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050006, Republic of Kazakhstan, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-2649-8033

Кулжан Имашевна Имашева, аға оқытушы, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: K.imasheva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6859-0658

Имашева Кулжан Имашевна, ст. преподаватель, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: K.imasheva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6859-0658

Imasheva Kulzhan Imashevna, Senior lecturer, A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: K.imasheva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6859-0658

Куликов Виталий Юрьевич, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Машинажасау факультеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Куликов Виталий Юрьевич, кандидат технических наук, профессор, Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова, Факультет машиностроение, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Kulikov Vitalii Iurevich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Кулумбаев Нурбулат Калиевич, «Металлургия» кафедрасының аға оқытушысы (Зертхана меңгерушісі), Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurbulat_010287@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Кулумбаев Нурбулат Калиевич, ст.преподаватель кафедры «Металлургия» (Заведующий лабораториями), Торайгыров университет, Павлодар қ., 140008, Республика Казахстан, e-mail: nurbulat_010287@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Kulumbayev Nurbulat Kalievich, Lecturer of the Metallurgy Department (Head of Laboratories), Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbulat_010287@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Кульдеев Нұсұлтан Ержанұлы, кіші ғылыми қызметкер, Satbayev University, Алматы қ., 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: uldeevnursultan129@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5906-1040

Кульдеев Нурсултан Ержанулы, младший научный сотрудник, Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, e-mail: uldeevnursultan129@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5906-1040

Kuldeyev Nursultan Erzhanuly, Junior researcher, Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: uldeevnursultan129@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5906-1040

Курмангалиева Лаззат Амановна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Satbayev University «Робототехника және автоматтандырудың техникалық құралдары» кафедрасы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: lezzet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2922-2518

Курмангалиева Лаззат Амановна, кандидат технических наук, ассоц. профессор кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: lezzet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2922-2518

Kurmangaliyeva Lazzat Amanovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: lezzet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2922-2518

Кусайнов Арыстанбек Ерланович, докторант, Д. Серікбаев атындағы техникалық университет, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: arys20055@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4623-4681

Кусайнов Арыстанбек Ерланович, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: arys20055@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4623-4681

Kusaynov Arystanbek Erlanovich, Doctoral Student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070003, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: arys20055@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4623-4681

Қалибек Жадыра Серікқызы, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: kalibek.zha@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0007-8322-1894

Калибек Жадыра Сериккызы, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: kalibek.zha@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0007-8322-1894

Kalibek Zhadyra, Doctoral Student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: kalibek.zha@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0009-0007-8322-1894

Қардыбай Сауатбек, докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: kardybai.sauatbek@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-2683-9484

Қардыбай Сауатбек, докторант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан. e-mail: kardybai.sauatbek@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-2683-9484

Sauatbek Kardybay, Doctoral Student, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan. e-mail: kardybai.sauatbek@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-2683-9484

Қасымжанова Айдана Доненбайқызы, PhD, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасы, қауымд. профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қаласы, 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Қасымжанова Айдана Доненбайқызы, PhD, ассоц.профессор кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Kasymzhanova Aidana Donenbayevna, PhD, Associate Professor of the Industrial Transport Department, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda city, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Қоңыртаева Колканат Байторекызы, аға оқытушы, Академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Көлік және логистикалық жүйелер кафедрасы, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kolkanatkon@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6179-9472

Коныртаева Колканат Байторекызы, ст.преподаватель кафедры «Транспорт и логистические системы» Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е. А. Букетова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: kolkanatkon@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6179-9472

Konyrtaeva Kolkanat Baitoreqyzy, Senior Lecturer at the Department of Transport and Logistics Systems of the Karaganda National Research University named after Academician E. A. Buketov, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kolkanatkon@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6179-9472

Қордашева Ақжан Асхатқызы, Машинажасау факультеті, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: akzhankordashs@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-5224-9261

Кордашева Акжан Асхатқызы, докторант по специальности «Металлургия», Факультет машиностроение, Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: akzhankordashs@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-5224-9261

Kordasheva Akzhan Askhatkyzy, Doctoral Student in «Metallurgy», Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: akzhankordashs@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-5224-9261

Луб Татьяна Леонидовна, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Инженерлік факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: lub_tou_mis@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9861-7321

Луб Татьяна Леонидовна, магистр технических наук, ст. преподаватель, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: lub_tou_mis@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9861-7321

Lub Tatyana Leonidovna, Master of Technical Sciences, Senior lecturer, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: lub_tou_mis@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9861-7321

Меңлен Динара Жұлдызбекқызы, докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ.,010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.menglen@kazatu.edu.k, https://orcid.org/0009-0000-8022-1521

Менлен Динара Жулдызбековна, докторант, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0009-0000-8022-1521, e-mail: d.menglen@kazatu.edu.k

Menglen Dinara Zhuldyzbekkyzy, Doctoral Student, Kazakh Agrotechnical Research University named after Astana, S. Seifullin, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.menglen@kazatu.edu.k, https://orcid.org/0009-0000-8022-1521

Мажит Алия Аманжоловна, химия ғылымдарының кандидаты, «Металлургия және ЕНД» кафедрасының меңгерушісі, Академик Қ. Сәтпаев атындағы Екібастұз инженерлік-техникалық институты, Екібастұз қ., 141200, Қазақстан Республикасы, e-mail: alipon81@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8645-6408

Мажит Алия Аманжоловна, кандидат химических наук, заведующий кафедрой «Металлургия и естественно-научные дисциплины» Екибастузский инженерно-технический институт имени академика К. Сатпаева, г. Экибастуз, 141200, Республика Казахстан, e-mail: alipon81@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8645-6408

Mazhit Aliya Amanzholovna, Candidate of Chemical Sciences, Head of the Department of Metallurgy and Natural Sciences, Ekibastuz Engineering and Technical Institute named after Academician K. Satpayev, Ekibastuz, 141200, Republic of Kazakhstan, e-mail: alipon81@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8645-6408

Маздубай Асылхан Владимирович, PhD, «Механика және мұнай-газ ісі» кафедрасының меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: mazdubay.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

Маздубай Асылхан Владимирович, PhD, заведующий кафедрой «Механика и нефтегазовое дело», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: mazdubay.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

Mazdubay Assylkhan Vladimirovich, PhD, Head of the Department of Mechanics and Oil and Gas Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: mazdubay.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

Малгожата Рутковска-Горчица, Вроцлав ғылым және технология университеті, Вроцлав қ., 50-370, Польша, e-mail: malgorzata.rutkowska-gorczyca@pwr.edu.pl, https://orcid.org/0000-0003-2712-5914

Малгожата Рутковска-Горчица, Вроцлавский университет науки и технологии, г. Вроцлав, 50-370, Польша, e-mail: malgorzata.rutkowska-gorczyca@pwr.edu.pl, https://orcid.org/0000-0003-2712-5914

Malgorzata Rutkowska-Gorczyca, Wrocław University of Science and Technology, Wroclaw, 50-370, Poland, e-mail: malgorzata.rutkowska-gorczyca@pwr.edu.pl, https://orcid.org/0000-0003-2712-5914

Масалимов Роман Бауржанұлы, I санатты инженер, «ҚР МШКӨ ҰО» РМК «ТүстіметалдарҒЗИ» (ВНИИцветмет) филиалы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: masalimov.roman.2003@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0798-0303

Масалимов Роман Бауржанович, инженер I категории, Филиал «РГП НЦ КПМС РК» ВНИИцветмет, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: masalimov.roman.2003@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0798-0303

Masalimov Roman Baurzhanovich, Grade I Engineer, VNIITSVETMET Branch of the National Center for Complex Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan (NC CPMRM RK), D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: masalimov.roman.2003@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0798-0303

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD, қауымд. профессор, «Металлургия» мамандығы, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD по специальности – «Металлургия», заведующий лабораторией «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Makhambetov Yerbolat Nysanalyuly, PhD in the specialty – «Metallurgy», Head of the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Мәдениет Қайнар, докторант, Satbayev University, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: kainar115@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5736-8661

Мәдениет Қайнар, докторант, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: kainar115@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5736-8661

Madeniet Haynar, Doctoral student, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: kainar115@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5736-8661

Молдаханов Бекболат Аскерханович, PhD, аға ғылыми қызметкер, «Европлюс Восток» ЖШС, Өскемен қ., 070016, Қазақстан Республикасы, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Молдаханов Бекболат Аскерханович, PhD, ст.научный сотрудник, ТОО «Европлюс Восток», г. Усть-Каменогорск, 070016, Республика Казахстан, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Moldakhanov Bekbolat Askerkhanovich, PhD, Senior Researcher, LLP «Europlus Vostok». Ust-Kamenogorsk, 070016, Republic of Kazakhstan, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, қауымд. профессор, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, ассоц. профессор, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, Алматы қ., 050013, Республика Казахстан, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Mukanov Ruslan, PhD, Associate Professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Мурзагалиев Ахмет Жакиевич, техника ғылымдарының кандидаты, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: akhmet-zhakiyevich@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4964-681X

Мурзагалиев Ахмет Жакиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ имени К. Жубанова, г. Актобе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: akhmet-zhakiyevich@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4964-681X

Murzagaliev Akhmet Zhakievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Organization of Transportation and Construction, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: akhmet-zhakiyevich@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4964-681X

Мурсалыкова Майгуль Тауржановна, PhD, постдокторант, «Технологиялық жабдықтар» кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Мурсалыкова Майгуль Тауржановна, PhD, постдокторант, кафедра «Технологические оборудование», университет Шакарима, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Mursalykova Maigul, PhD, Postdoctoral Department of «Processing equipment», Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Мусина Жанара Керейовна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор (доцент), «Машина жасау және стандарттау» кафедрасының меңгерушісі, Инженерлік факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2233-4947

Мусина Жанара Керейовна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент), заведующая кафедрой «Машиностроение и стандартизация», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2233-4947

Mussina Zhanara Kereyovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Mechanical Engineering and Standardization», Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2233-4947

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, «Машина жасау» кафедрасының қауымд. профессоры, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Мустафа Азамат Қойшықұлұлы, PhD, ассоц.профессор кафедры «Машиностроение», Сатпаев университет, Научный сотрудник, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050013, г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Mustafa Azamat, PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Researcher, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

Мырзакулов Мақсат Кендебайұлы, Автоматика және ақпараттық технологиялар институтының директорының орынбасары, Satbayev University, Алматы қ., 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.myrzakulov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-3262-6249

Мырзакулов Максат Кендебаевич, Заместитель директора института автоматики и информационных технологий, Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, e-mail: m.myrzakulov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-3262-6249

Myrzakulov Maxat, Deputy Director Institute of Automation and Information Technologies, Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.myrzakulov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-3262-6249

Набиев Ерболат Маратұлы, докторант, Сәтбаев университет, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nabiev@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0004-1441-0892

Набиев Ерболат Маратұлы, докторант, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: e.nabiev@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0004-1441-0892

Nabiev Yerbolat, Doctoral student, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.nabiev@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0004-1441-0892

Нәбиолдина Айым Бауыржанқызы, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: anabioldina@vku.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5581-2194

Набиолдина Айым Бауыржанқызы, ст.научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: anabioldina@vku.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5581-2194

Nabioldina Aiym Bauyrzhanqyzy, Senior Research Scientist at the Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: anabioldina@vku.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5581-2194

Ногаев Кайрош Абилович, техника ғылымдарының кандидаты, «Технологиялық машиналар және көлік» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.nogayev@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1332-6352

Ногаев Кайрош Абилович, кандидат технических наук кафедра «Технологические машины и транспорт», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: k.nogayev@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1332-6352

Nogaev Kayrosh Abilovich, Candidate of Technical Sciences, Department of Technological Machines and Transport, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.nogayev@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1332-6352

Нурахметова Кульзира Кумаргалиевна, PhD, ALT қауымд.профессоры, Мұхамеджан Тынышбаев атындағы ALT университеті, Логистика және бизнес факультеті, Жалпы инженерия кафедрасы. Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurahmetova52@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3399-2275

Нурахметова Кульзира Кумаргалиевна, PhD, ассоц.профессор ALT, ALT Университет имени Мухамеджана Тынышбаева, Факультет Логистика и бизнеса, кафедры Общей инженерия, г. Алматы 050013, Республика Казахстан, e-mail: nurahmetova52@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3399-2275

Nurakhmetova Kulzira, PhD, Associate Professor of ALT, ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshbaev, Faculty of Logistics and Business, Department of General Engineering, Almaty 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurahmetova52@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3399-2275

Нургуль Жолаевна Карсакова, PhD, аға оқытушы, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, 100012, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: karsakova-87@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2002-1557

Карсакова Нургуль Жолаевна, PhD, ст.преподаватель, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, 100012, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: karsakova-87@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2002-1557

Karsakova Nurgul Zholaevna, PhD, Senior lecturer, A. Saginov Karaganda Technical University, 100012, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: e-mail: karsakova-87@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2002-1557

Нұғман Ерік Зейнелұлы, PhD, қауымд.профессоры, Ғылыми қызметкер, «Машина жасау» кафедрасының меңгерушісі Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Нугман Ерик Зейнелович, PhD, ассоц.профессор, Заведующий кафедрой «Машиностроение» Сатпаев университет, г. Алматы, 050013, Научный сотрудник, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Nugman Yerik, PhD, Head of Department Mechanical Engineering and Associate Professor, Satbayev University, Almaty, 050013, Researcher, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

Нұрғожаев Нұрғали Дәндібайұлы, «Машина жасау» кафедрасының докторанты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-7495-8187

Нургожаев Нургали Дандибаевич, докторант кафедры «Машиностроение», Сатпаев университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-7495-8187

Nurgozhaev Nurgali, PhD, Doctoral Student, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-7495-8187

Оксененко Алексей Алексеевич, Satbayev University ұшқышсыз ұшу аппараттары оқу-өндірістік зертханасының жетекшісі, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: alex-ok@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-0216-9988

Оксененко Алексей Алексеевич, Руководитель учебно-производственной лаборатории БПЛА, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: alex-ok@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-0216-9988

Oksenenko Alexey, Head of the Educational and Production UAV Laboratory, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: alex-ok@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-0216-9988

Онуралп Юджель, профессор, доктор, Металлургия және материалдар инженериясы кафедрасы, ИТУ, Маслак, Стамбул, 34467, Түркия, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Онуралп Юджель, профессор, доктор, Кафедра металлургия и материаловедческой инженерии, ИТУ, Маслак, Стамбул, 34467, Турция, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Onuralp Yücel, Professor, Doctor, Department of Metallurgical and Materials Engineering, ITU, Maslak, İstanbul, 34467, Turkey, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Оразов Ондасын Шортанбаевич, ғылым магистрі, аға оқытушы, А. Мырзахметов атындағы Инженерлік-экологиялық факультеті, Көкшетау университеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: orazovondasin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9327-6940

Оразов Ондасын Шортанбаевич, ст.преподаватель, магистр наук, Инженерно-экологический факультет, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова, г. Көкшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: orazovondasin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9327-6940

Orazov Ondassyn Shortanbayevich, Senior Lecturer, Master of Science, Faculty of Environmental Engineering, A. Myrzakhmetov Kokshetau University, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: orazovondasin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9327-6940

Рамазанова Жанат Мусановна, химия ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор (доценті), «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhanat2005@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-1419-2886

Рамазанова Жанат Мусановна, кандидат химических наук, ассоц. профессор (доцент) кафедры «Космическая техника и технологий», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: zhanat2005@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-1419-2886

Ramazanova Zhanat Musanovna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor (docent), Department of Space Engineering and Technology, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhanat2005@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-1419-2886

Рахадилов Бауыржан Корабаевич, PhD, профессор, «Техникалық физика» мамандығы, «PlasmaScience» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: rakhadilovb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Рахадилов Бауыржан Корабаевич, PhD, профессор, специальность «Техническая физика», ведущий научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: rakhadilovb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Rakhadilov Bauyrzhan Korabayevich, PhD, Professor, Technical Physics, Leading Research Scientist at PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: rakhadilovb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Рахметова Перизат Маратқызы, PhD, қауымд.профессор, «Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары» кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: p.rakhmetova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5645-5157

Рахметова Перизат Маратқызы, PhD, ассоц. профессор кафедры Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: p.rakhmetova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5645-5157

Rakhmetova Perizat Maratkyzy, PhD, Associate Professor of Department of Robotics and technical means of automation, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: p.rakhmetova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5645-5157

Роговский Валерий Владимирович, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: gerat1302@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0109-6342

Роговский Валерий Владимирович, ст.преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: gerat1302@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0109-6342

Rogowski Valery, Senior Lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: gerat1302@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0109-6342

Сағынтай Мұхағали Қаратайұлы, PhD, «Машина жасау» кафедрасының аға оқытушы, Ғылыми қызметкер, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050056, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7946-1568

Сағынтай Мұхағали Қаратайұлы, PhD, Научный сотрудник, ст.преподаватель кафедры «Машиностроение», г. Алматы, 050056, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7946-1568

Sagyntay Mukhagali, PhD, Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050056, Researcher, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7946-1568

Санжарсултан Бердали, Қазақ-Неміс университетінің ғылыми қызметкері, Қазақ-Неміс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sanchess.berdali@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5856-4982

Санжарсултан Бердали, Научный сотрудник Казахстнаско-Немецкого университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: sanchess.berdali@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5856-4982

Sanzharsultan Berdali, Researcher, Kazakh-German University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sanchess.berdali@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5856-4982

Сапинов Руслан Викторович, PhD, қауымд. профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Сапинов Руслан Викторович, PhD, ассоц. профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Sapinov Ruslan Viktorovich, PhD, Associate Professor, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

Сауханов Нургазы Сергазиевич, техника ғылымдарының кандидаты, «Көлік техникасы, тасымалдауды ұйымдастыру және құрылыс» кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030012, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

Сауханов Нургазы Сергазиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ имени К. Жубанова, г. Актобе, 030012, Республика Казахстан, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

Saukhanov Nurgazy Sergazievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Organization of Transportation and Construction, ARU named after K. Zhubanov, Aktobe, 030012, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

Сауханов Нургазы Сергазиевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurgazi.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

Сауханов Нургазы Сергазиевич, кандидат технических наук, доцент, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: nurgazi.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

Saukhanov Nurgazy Sergazievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurgazi.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

Сембаев Нурболат Сакенович, «Көлік техникасы және логистика» кафедрасының меңгерушісі, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.sembaev@mail.ru, https//0000-0003-3032-1094

Сембаев Нурбулат Сакенович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, заведующий кафедрой «Транспортная техника и логистика», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: n.sembaev@mail.ru, https//0000-0003-3032-1094

Sembayev Nurbulat Sakenovich, Head of the Department of «Transport equipment and logistics», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.sembaev@mail.ru, https//0000-0003-3032-1094

Сәрсенқызы Ақерке, 8D07105 «Механикалық инженерия» білім беру бағдарламасының докторанты, Инжиниринг және азық түлік технологиялары институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.sarsenkyzy@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2764-4098

Сарсенкызы Акерке, докторант образовательной программы 8D07105 «Механическая инженерия», Институт инжиниринга и пищевых технологий, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: a.sarsenkyzy@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2764-4098

Sarsenkyzy Akerke, Doctoral Student of the educational program 8D07105 «Mechanical Engineering», Institute of Engineering and Food Technology, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.sarsenkyzy@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2764-4098

Сәулебек Жалғас Қасқырбекұлы, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhalgas.sauelebek@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3852-7513

Сәулебек Жалғас Қасқырбекұлы, докторант по специальности «Металлургия», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: zhalgas.sauelebek@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3852-7513

Saulebek Zhalgas Kaskyrbekuly, Doctoral Student in Metallurgy, Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhalgas.sauelebek@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3852-7513

Сивякова Галина Александровна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.sivyakova@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7689-8433

Сивякова Галина Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Технологии искусственного интеллекта», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: g.sivyakova@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7689-8433

Sivyakova Galina Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Artificial Intelligence Technologies, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.sivyakova@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7689-8433

Сизикова Наталья Владимировна, техника ғылымдарының кандидаты, МШТС зертханасының меңгерушісі, «ҚР МШКҚӨ ҰО» РМК «ВНИИцветмет» филиалы, Өскемен қ., 070002, Қазақстан Республикасы, e-mail: nvsizikova78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0423-2613

Сизикова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, зав. лаб. лаборатории ТИМС, Филиал РГП «НЦ КПМС РК» «ВНИИцветмет», г. Усть-Каменогорск, 070002, Республика Казахстан, e-mail: nvsizikova78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0423-2613

Sizikova Natalya, PhD in Technical Sciences, Head of the TIMS Laboratory, Branch of the RSE «NC CPMR RK» «VNIITSVETMET», Ust-Kamenogorsk, 070002, Republic of Kazakhstan, e-mail: nvsizikova78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0423-2613

Сисикенова Енлик Нурлановна, докторант, Сәтбаев университет, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы e-mail: e.sisekenova@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0003-4394-9320

Сисикенова Енлик Нурлановна, докторант, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: e.sisekenova@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0003-4394-9320

Sisekenova Enlik, Doctoral Student, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.sisekenova@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0003-4394-9320

Смаилова Гулбаршын Абылкасымовна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, машина жасау» институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.smailova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-2293-6232

Смаилова Гулбаршын Абылкасымовна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, «Энергетики и машиностроения», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: g.smailova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-2293-6232

Smailova Gulbarshyn, PhD, Associate Professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.smailova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-2293-6232

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич, PhD, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ansar_muslim_91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич, PhD, факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ansar_muslim_91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Suleimenov Ansagan Dyusembaevich, PhD, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ansar_muslim_91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Сулюбаева Лайла Гылыммеденовна, PhD, қауымд.профессор, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: lsulyubayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1924-1459

Сулюбаева Лайла Гылыммеденовна, PhD, ассоц.профессор, ст.научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: lsulyubayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1924-1459

Sulyubayeva Laila Gylymmedenovna, PhD, associate professor, Senior Researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: lsulyubayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1924-1459

Суюнбаев Шинполат Мансуралиевич, т.ғ.д., профессор, «Темір жолды пайдалану жұмысын басқару» кафедрасының профессоры, Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Ташкент қ., 100167, Өзбекстан Республикасы, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Суюнбаев Шинполат Мансуралиевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой железной дороги», Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, 100167, Республика узбекистан, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Suyunbaev Shinpolat, Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department «Management of operational work of the railway», Tashkent State Transport University, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Тадеуш Лешневский, техника ғылымдарының докторы, профессор, Вроцлав ғылым және технологиялар университеті, Вроцлав қ., Польша, 50-370, e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-1903-3967

Тадеуш Лешневский, доктор технических наук, профессор, Вроцлавский университет науки и технологий, г. Вроцлав, Польша, 50-370, e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl, https://orcid.org/ 0000-0002-1903-3967

Tadeusz Leśniewski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, 50-370, Poland, e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-1903-3967

Таскарина Айжан Жумажановна, PhD, «Металлургия» кафедрасының профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Aya_Taskarina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799

Таскарина Айжан Жумажановна, PhD, профессор кафедры «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Aya_Taskarina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799

Taskarina Aizhan Zhumazhanovna, PhD, Professor of the Metallurgy Department, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Aya_Taskarina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799

Татаева Жанар Курмашевна, «Машиналар мен жабдықтардың сандық инженериясы» мамандығының 2-курс докторанты, Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Қазақстан Республикасы, e-mail: z.tatayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0009-2874-1090

Татаева Жанар Курмашевна, докторант 2- го курса по ОП «Цифровая инженерия машин и оборудования», Satbayev University, г. Алматы, 050013/A15PX4, Республика Казахстан, г. Алматы, e-mail: z.tatayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0009-2874-1090

Tatayeva Zhanar, Doctoral student 2-nd cours in «Digital Engineering of Machines and Equipment», Satbayev University, Almaty, 050013/A15PX4, Republic of Kazakhstan, e-mail: z.tatayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0009-2874-1090

Ташмуханбетов Алишер Бахамович, магистрант, Satbayev университеті, г. Алматы, 05000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Khalilovalisher4@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-6907-8603

Ташмуханбетов Алишер Бахамович, магистрант, университет Satbayev, г. Алматы, 05000, Республика Казахстан, e-mail: Khalilovalisher4@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-6907-8603

Tashmuhanbetov Alisher, Master, Satbayev University, Almaty, 05000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Khalilovalisher4@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-6907-8603

Теміртас Хамит Бауржанұлы, докторант, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: xamit1797@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6580-2085

Теміртас Хамит Бекмуратович, докторант, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: xamit1797@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6580-2085

Temirtas Khamit Bekmuratovich, Doctoral Student, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: xamit1797@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6580-2085

Тлеубергенова Гүлім Тлеубекқызы, «Беттік инженерия және трибология» ғылыми-зерттеу орталығының инженері, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulh77848@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-4064-5368

Тлеубергенова Гүлім Тлеубекқызы, инженер научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: gulh77848@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-4064-5368

Tleubergenova Gulim Tleubekkyzy, Engineer at the Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulh77848@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-4064-5368

Токмурзина Наталья Анатольевна, қауымд. профессор, т.ғ.к., Сәтбаев университет, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, Алматы қ. 050013, Қазақстан Республикасы e-mail: n.tokmurzina@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5589-5663

Токмурзина Наталья Анатольевна, ассоц. профессор, к.т.н., Satbayev University, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышпаева, г. Алматы 050013, Республика Казахстан, e-mail: n.tokmurzina@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5589-5663

Tokmurzina Natalya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Satbayev University, School of transport engineering and logistics named after M. Tynyshpayev, Almaty 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.tokmurzina@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-5589-5663

Тошов Жавохир Буриевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, кафедра меңгерушісі, И. Каримов атындағы Ташкент мемлекеттік техникалық университеті, 100095, Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ., Олмазор ауданы, e-mail: j.toshov@tdtu.uz, https://orcid.org/0000-0003-4278-1557

Тошов Жавохир Буриевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, 100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Алмазарский район, e-mail: j.toshov@tdtu.uz, https://orcid.org/0000-0003-4278-1557

Toshov Javokhir Buriyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 100095, Republic of Uzbekistan, Tashkent, Olmazor district, e-mail: j.toshov@tdtu.uz, https://orcid.org/0000-0003-4278-1557

Төлеуқадыр Руслан Төлеужанұлы, «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, «Феррокорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: ruslan-94kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7191-8893

Толеуқадыр Руслан Толеужанұлы, докторант по специальности «Металлургия», научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: ruslan-94kz@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-7191-8893

Toleukadyr Ruslan Toleuzhanuly, Doctoral Student in Metallurgy, researcher at the Laboratory of «Ferroalloys and reduction processes», Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: ruslan-94kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7191-8893

Толешов Амандық Қуатұлы, т.ғ.д., профессор, У. А. Джолдасбеков атындағы Механика және инженерия институтының ҚР ҰИА академигі, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman_58@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9775-3049

Тулешов Амандык Куатович, доктор технических наук, профессор, Институт механики и машиноведения имени У. А. Джолдасбекова, академик НИА РК, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: aman_58@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9775-3049

Tuleshov Amandyk, Doctor of Technical Sciences, Professor of U. A. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Academician of the NIS RK, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman_58@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9775-3049

Туысхан Курметбек, техника ғылымдарының магистрі, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: kura_tuyskhan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4272-2637

Туысхан Курметбек, магистр технических наук, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: kura_tuyskhan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4272-2637

Tuyskhan Kurmetbek, Master Engineering Sciences, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: kura_tuyskhan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4272-2637

Тюлюбаев Ренат Асылбекович, магистр, «Металлургия» кафедрасының докторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Тюлюбаев Ренат Асылбекович, магистр, докторант кафедры «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Tyulyubayev Renat Asylbekovich, Master, Doctoral Student of the Department of Metallurgy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Удербаева Асемгуль Еркинбековна, PhD, қауымд.профессор, машина жасау» институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.uderbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1641-7404

Удербаева Асемгуль Еркинбековна, PhD, ассоц. профессор, «Энергетики и машиностроения», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.uderbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1641-7404

Uderbayeva Assemgul, PhD, Associate Professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.uderbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-1641-7404

Ульева Гульнара Анатольевна, техника ғылымдарының кандидаты, Металтану және дефектоскопия зертханасының аналитикалық бақылау орталығының жетекші маманы, «Qarmet» АҚ, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.ulyeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3600-1318

Ульева Гульнара Анатольевна, кандидат технических наук, ведущий специалист Центра аналитического контроля лаборатории металловедения и дефектоскопии, АО «Qarmet», г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: g.ulyeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3600-1318

Ulyeva Gulnara Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Leading specialist of the center for analytical control of the laboratory of metallurgy and flaw detection, JSC «Qarmet», Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.ulyeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3600-1318

Шаратбеков Танат Толеуулы, 8D07111 – «Машина жасау өндірісін цифрландыру» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, А. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sharatbekov.t@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0007-5101-6933

Шаратбеков Танат Толеуулы, докторант по образовательной программе: 8D07111 – «Цифровизация машиностроительного производства», Институт Энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: sharatbekov.t@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0007-5101-6933

Sharatbekov Tanat Toleuuly, Doctoral Student in the educational program: 8D07111 – «Digitalization of machine-building production», A. Burkitbaev Institute of Energy and Mechanical Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sharatbekov.t@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0007-5101-6933

Шеров Айбек Карибекович, PhD, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 010000, Астана қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: e-mail: a.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Шеров Айбек Карибекович, PhD, ст.преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, проспект 010000, г. Астана, Республика Казахстан, e-mail: a.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Sherov Aibek Karibekovich, PhD, Senior lecturer, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, 010000, Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Шеров Карибек Тагаевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан Республикасы. e-mail: k.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

Шеров Карибек Тагаевич, доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан. e-mail: k.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

Sherov Karibek Tagayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan. e-mail: k.sherov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

Шошай Жансерик, PhD, аға оқытушы, «Металлургия» кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: shoshay.zhanserik@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1861-0539

Шошай Жансерик, PhD, ст.преподаватель кафедры Металлургии, факультет Инженерии, Торайгыров университет, г.Павлодар, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: shoshay.zhanserik@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1861-0539

Shoshay Zhanserik, PhD, Senior Lecturer, Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008,Republic of Kazakhstan, e-mail: shoshay.zhanserik@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1861-0539

Яковлев Владимир Сергеевич, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Яковлев Владимир Сергеевич, ст.преподаватель, ВКТУ имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Yakovlev Vladimir Sergeevich, Senior Lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

***В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.**

***Количество соавторов одной статьи не более 5.**

***Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 %.**

***Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.**

***Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.**

***Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

***Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.**

*** Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз.**

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц печатного текста.** *Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).*

Структура научной статьи включает название, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение,

заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. *ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Фамилия, имя, отчество** (полностью) автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках *(жирным шрифтом, по центру)*;

4 **Ученая степень, ученое звание;**

5 **Аффилиация** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

6 **E-mail;**

7 **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность *(не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий)*;

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (*рекомендуемый объем аннотации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец)*;

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования *(оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.)*. Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке *(см. образец)*;

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение / Кіріспе / Introduction** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** *(при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

- **Выводы / Қорытынды / Conclusion** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников / Пайдаланған деректер тізімі / References** *(жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре)* включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 *(см. образец)*.

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. Объем не менее 10 не более чем 20 наименований (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом*.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

11 **Иллюстрации, перечень рисунков** и подрисуночные надписи к ним представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

12 **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)
В электронном варианте приводятся полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются);

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

Информация для авторов

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.
Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления.

Периодичность издания журналов – четыре раза в год (ежеквартально)

Сроки подачи статьи:
- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимостьпубликации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.

Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на почту: nitk.tou.edu.kz. Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,
НАО «Торайгыров университет»,
Издательство «Toraighyrov University», каб. 137.
Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).
E-mai1: **nitk.tou.edu.kz.**

Наши реквизиты:

НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	Приложение kaspi.kz Платежи – Образование –Оплата за ВУЗы – Заполняете все графы (в графе Факультет укажите «За публикацию в научном журнале, название журнала и серии»)
АО «Jýsan Bank» ИИК KZ57998FTB00 00003310 БИК TSESKZK A Кбе 16 Код 16 КНП 861	АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxxxx

С. К. Антикеева
Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомых компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.

2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХК ИППК ПК, 2001. – 152 с.

2 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.

4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университеті, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : suschnost, effectivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod k ecologicheskomu obrazovaniu i vospitaniu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.

4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.

5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p.

6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.

7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – T. 2 – P. 11–20.

8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKиPRO, 2005. – 230 p.

9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov k rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300-Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.

10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraigyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

С. К. Антикеева
Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ ҚҰЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзыреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзыреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзыреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзыреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзыреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзыреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теориялық модель, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeyeva
Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers

interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.

Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология» НАО «Торайгыров университет», Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

Публикационная этика научных журналов «Вестник Торайгыров университета», «Краеведение», «Наука и техника Казахстана»

Редакционная коллегия журналов «Вестник Торайгыров университет», «Краеведение» и «Наука и техника Казахстана» в своей работе придерживается международных стандартов по этике научных публикаций и учитывает информационные сайты ведущих международных журналов.

Редакционная коллегия журнала, а также лица, участвующие в издательском процессе в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (использование недостоверных сведений, изготовление данных, плагиат и др.), обеспечения общественного признания научных достижений обязаны соблюдать этические нормы и стандарты, принятые международным сообществом и предпринимать все разумные меры для предотвращения таких нарушений.

Редакционная коллегия ни в коем случае не поощряет неправомерное поведение (плагиат, манипуляция, фальсификация) и приложит все силы для предотвращения наступления подобных случаев. В случае, если редакционной коллегии станет известно о любых неправомерных действиях в отношении опубликованной статьи в журнале или в случае отрицательного результата экспертизы редколлегий статья отклоняется от публикации.

Редакционная коллегия не должна раскрывать информацию о принятых к опубликованию рукописей третьим лицам, не являющимся рецензентами, потенциальными рецензентами, членами редакционной коллегии, работниками типографии. Неопубликованные данные, полученные из рукописей, не должны использоваться в личных исследовательских целях без письменного разрешения автора.

Ответственность экспертов (рецензентов)

Рецензенты должны давать объективные суждения и указывать на соответствующие опубликованные работы, которые еще не цитируются. К рецензируемым статьям следует обращаться конфиденциально. Рецензенты будут выбраны таким образом, чтобы не было конфликта интересов в отношении исследования, авторов и / или спонсоров исследования.

Ответственность авторов

Ответственность за содержание работы несет автор. Авторы обязаны вносить исправления, пояснения, опровержения и извинения, если такие имеются.

Автор не должен представлять статью, идентичную ранее опубликованной в другом журнале.В частности, не принимаются переводы на английский либо немецкий язык статей, уже опубликованных на другом языке.

В случае обнаружения в рукописи статьи существенных ошибок автор должен сообщить об этом редактору раздела до момента подписи в печать оригинал-макета

номера журнала. В противном случае автор должен за свой счет исправить все критические замечания.

Направляя статью в журнал, автор осознаёт указанную степень персональной ответственности, что отражается в письменном обращении в редакционную коллегию Журнала.

Теруге 10.06.26 ж. жіберілді. Басуға 30.06.26 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
5,07 Mb RAM
Шартты баспа табағы 1,09 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4559

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz
nitk.tou.edu.kz