**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

№ 3 (2025)

**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/QXJM4576

**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*

***Абекова А. Ж., Куатова М. Ж., Камзанов Н. С., Бектилевов А. Ю.***
Управление электроприводом с упругой связью для гибридного кривошипного пресса с двумя степенями свободы.....7
***Быков П. О., Зигангиров С. А., Муканов Р. Б., Бульдяев И. В.***
Оптимизация технологической подготовки изготовления зубчатых колес горно-металлургического оборудования.....20
***Вавилов А. В., Гурьянов Г. А., Молдаханов Б. А., Асангалиев Е. А., Яковлев В. С.***
Разработка конструкции смесителя ингредиентов кормовых добавок на основе отходов производства.....33
***Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю.***
Технология изготовления порошков из природных материалов для высокотемпературных покрытий.....50
***Есиркепова А. Б., Абишева Н. Б., Шеров А. К., Карсакова Н. Ж., Мендалиева С. И.***
Түйістіріп дәнекерленген қосылыстарды айна-көлеңке әдісімен сапасын бақылау.....62
***Kairolla B. K., Absadykov B. N., Kassenov A. Zh., Mazdubay A. V., Mahkamov Kh.***
The round shaped cutters profile calculation for external processing.....77
***Kozhageldiyev B., Taskarina A. Zh., Mussina Zh. K., Zhankeldi A., Bazhaev N. A.***
Increasing thread cutting productivity with a combined tool.....92
***Мамбетов Д. М., Джундибаев В. Е.,Тогизбаева Б. Б., Касымов У. Т., Даньярова А. С.***
Оптимизация параметров межмодульного устройства крепления со сменными рабочими органами универсальных погрузчиков.....101
***Мурсалыкова М. Т., Какимов М. М., Касенов А. Л., Кокаева Г. А., Искаков Б. М.***
Өсімдік майын престеу процесінің математикалық моделін әзірлеу.....115
***Сағатова Л. Б., Бортебаев С. А., Кольга А. Д., Елемесов К. К., Басканбаева Д. Д.***
Діріл параметрлері бойынша ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының техникалық күйін бағалау.....135
***Таттимбетова Г. Б., Жетесова Г. С., Матешов А. К.***
3D басып шығару кезінде толтыру тығыздығының уақыт пен материалдық шығындарға әсерін зерттеу.....154

***Тусупова С. О., Кузьминова Н. Ю., Янюшкин А. С.,***
***Исабек З. Р., Сулейменов А. Д.***
Жоғары жылдамдықты фрезерлеу кезінде қиын өңделетін материалдардың беткі қасиеттеріне әсерін зерттеу.....170
***Чукенова Э. С., Нұғман Е. З., Мустафа А. Қ.,***
***Хошнау Ф., Дюсебаев И. М.***
Белсенді және инертті газдардың WAAM технологиясы арқылы өндірілген болаттың микроқұрылымына әсері.....182
***Шеров К. Т., Бердімұратова Д. И., Сагитов А. А.,***
***Мусаев М. М., Турусбекова А.***
3D-принтерде FDM әдісімен жасалған гидравликалық машинаның «Білік-тістегеріш» бөлігінің беріктігін зерттеу.....195

## *МЕТАЛЛУРГИЯ*
## *МЕТАЛЛУРГИЯ*
## *METALLURGY*

***Abildina A. R.***
Study of the effect of molybdenum on the properties.....207
of the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb QHEA
***Акбердин А. А., Ким А. С., Султангазиев Р. Б.,***
***Орлов А. С., Адамова Г. Х.***
Математическая модель диаграммы фазового состава системы NI-B-SI.....215
***Богомолов А. В., Жунусов А. К., Кажмухамбетов Ж. Б.,***
***Спанов С. С., Жунусова А. К.***
Совершенствование технологии прокатного передела.....226
помольных шаров диаметром 125 мм
***Burumbayev A., Akhmetov A., Zhakan A.,***
***Myngzhassar Ye., Yucel O.***
Research of the electrical resistance of charge materials
for the synthesis of silicon carbide.....236
***Yerzhan A., Issagulova D. A., Okishev K. Yu., Kovaleva T. V.***
Application of ferroalloy production waste as
deoxidising agent in steel production.....247
***Kassymova D. B., Sapinov R. V. , Adilkanova M. A.***
Selection of optimal cyanide leaching modes for gold from ore deposits
in the Republic of Kazakhstan.....257
***Kulikov V. Yu., Baiseitova Y. A., Tulegenova Sh. N., Kovalev P. V.***
Study of energy aspects of cold briquetting for SHH15
steel dust under varying press conditions.....267
***Қизатова Е. А., Қизатов А. С., Айдарова М. Т.,***
***Курбанбеков Ш. Р., Баятанова Л. Б.***
Исследование влияния механоактивации
на структуру композитов WC–Fe и WC–Ni.....277

***Лопатин В. Ю., Жолдубаева Ж. Д., Арыстанова Д. М.***
Темір тотығы қабыршағының қалпына келтіру әдістерінің салыстырмалы талдауы: кептіргеннен кейінгі және тотықтырылғаннан кейінгі.....292
***Omarov Zh. M., Zhakanov A. N., Yelmuratova A. F., Kaliyeva O. K., Dashzeveg D.***
Use of waste from metallurgical enterprises for the production of dry construction mixtures.....301
***Сариев О. Р., Алмагамбетов М. С., Нургали Н. З., Келаманов Б. С., Әбдірашит А. М.***
Отработка способов брикетирования пыли от дробления высокоуглеродистого феррохрома.....316
***Туганбаева А. А., Аринова С. К., Квон Св. С., Исагулов А. З.***
Термодинамическое моделирование фазовых превращений в стали 40ХН3МФ при различной модификации.....334

## *КӨЛІК*
## *ТРАНСПОРТ*
## *TRANSPORT*

***Мухаметжанова А. В., Жандарбекова А. М., Мурзабекова К. А., Қуанышбекова Қ. Қ., Искаков Д. С.***
Көлік саласының технологиялық трансформациясы: жасанды интеллектінің мүмкіндіктері.....345
***Rakisheva A. A., Kokin S. B., Yessaulkov V. S., Bouchner Petr, Abishev K. K.***
On the problem of designing a vehicle with hybrid propulsion.....359
***Сауханов Н. С., Имагамбетов М. Б., Ордабаева Г. М., Жаманбаев Б. У., Мырзабеков Н. М.***
Реттелетін қиылыста адаптивті басқару макеті.....368
***Тулепбек Н. Т., Оралбекова А. О., Ахметов Б. С.***
Темір жол көлігіндегі маршал станцияларын басқаруды компьютерлендіру.....380
***Шукаманов Ж. Е., Сүлейменова Г. А., Павлов С.***
Пойыздар қозғалысын интервалды реттеудің әртүрлі жүйелерінде аралықтың өткізу қабілетін модельдеу.....396

## *ҚҰРЫЛЫС*
## *СТРОИТЕЛЬСТВО*
## *CONSTRUCTION*

***Никитин В. А., Саканов К. Т., Макашев К. Т.***
Трещиностойкость и деформативность балок из тяжелого бетона и сталефибробетона.....408

***Свидерская Д. С., Мазина Ю. И., Лебедева М. С.***
Архитектура как искусство создания общественных пространств
с точки зрения эстетики и функциональности.....419

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors.....431

Авторларға арналған ережелер
Правила для авторов
Rules for authors.....471

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics.....481

## *МАШИНОСТРОЕНИЕ*

МРНТИ 55.30.31

https://doi.org/10.48081/WPKV1070

***А. Ж. Абекова[1], М. Ж. Куатова[2], Н. С. Камзанов[3], А. Ю. Бектилевов[4]***

[1,2]Институт механики и машиноведения имени академика
У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]Международный инженерно-технологический университет,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[3,4]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0881-8707
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7614-6124
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2420-8362
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0865-6023
*e-mail: Abekova310792@gmail.com

# *УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УПРУГОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ГИБРИДНОГО КРИВОШИПНОГО ПРЕССА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ*

*В данной статье рассматривается задача управления скоростью электромеханического привода с упругой связью, используемого в составе гибридного кривошипного пресса с двумя степенями свободы. Такие прессы сочетают в себе кинематическую структуру семизвенного механизма и высокоточные сервоприводы, что позволяет реализовывать адаптивные законы движения ползуна в зависимости от технологических требований и обеспечить формирование оптимального профиля хода. Для описания динамики электромеханической части используется модель с разделённой инерцией, учитывающая упругие свойства связующего вала между приводом и исполнительным звеном механизма. Предложен подход к синтезу регулятора на основе обратной связи по состоянию, позволяющий обеспечить устойчивую и точную реализацию движения даже при изменяющихся нагрузках. Проведены численные моделирования и экспериментальные исследования на лабораторном стенде, подтвердившие эффективность разработанного алгоритма управления. Также проанализировано влияние различных параметров модели на точность и устойчивость системы. Особое внимание уделено компенсации упругих колебаний и устойчивости при параметрических возмущениях. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании современных адаптивных систем управления для высокоточных серво-прессов с механической трансмиссией, работающих в условиях переменных технологических нагрузок.*

*Ключевые слова: адаптивное управление, гибридный кривошипный пресс, обратная связь, математическая модель, динамическая система.*

**Введение**

В промышленных применениях электроприводов основными проблемами являются надежность структуры управления, динамика реакции системы и способность управлять состоянием установки. Удовлетворительный уровень этих свойств трудно получить, когда механическая структура системы является составной [1;2;3]. Когда двигатель соединен с нагрузочной машиной через длинную тонкую шестерню, машины могут начать вращаться с различной скоростью, часто колебательным образом. Высоко резонансные системы с упругим валом и тяжелой нагрузочной машиной (такие как прокатные станы [4], ветряные турбины [5] и манипуляторы [ 6;7], часто называемые двух массовыми системами, можно широко встретить во многих промышленных решениях. Проблемы прессуемых машин усложняются многозвенной механикой, высокими нагрузками и требованиями к точности движения. Подавление колебаний и синтез адаптивных систем управления становится критически важным для повышения надёжности, точности и ресурса механизма. Когда вал подвергается кручению, угловая скорость двигателя отличается от угловой скорости нагрузочной машины, вызывая колебания. В результате в структуре управления возникает множество нежелательных эффектов: может ухудшиться качество производственного процесса, конечный продукт может быть дефектным или поврежденным [8], кручение может привести к повреждению механической конструкции привода (разрыв вала), и даже может быть потеряна устойчивость [9]. Самым основным методом подавления колебаний является использование механических демпферов. Однако для этого подхода необходимо модифицировать механическую конструкцию привода.

Помимо вмешательства в механическую часть привода, можно выделить пассивные и активные методы управления. Пассивные методы, используемые для подавления этих колебаний, фокусируются на снижении динамики опорного сигнала за счет использования фильтрации сигнала [10]. Однако это очень вредит динамическим возможностям структуры управления и усложняет генерацию командного сигнала. Активные методы основаны на использовании усовершенствованных структур управления для смягчения влияния упругой связи на качество управления. Самым основным методом, используемым для управления скоростью таких приводов, является каскадное управление с двумя ПИ-регуляторами — один из них отвечает за управление током, а другой управляет скоростью двигателя. Это решение не использует никакой дополнительной информации о нагрузочной машине, поэтому демпфирование колебаний неэффективно [11]. В литературе представлено множество модификаций ПИ-регулирования с дополнительными контурами обратной связи от крутящего момента и угловой скорости нагрузки [12;13]. Очень многообещающие результаты получаются при использовании регулятора состояния [14]. Однако для применения этого метода необходимо знать все переменные пространства состояний (угловая скорость двигателя и нагрузки, крутящий момент) [15]. Упомянутый метод очень чувствителен к внешним возмущениям (таким как шум измерения,

трение и дополнительные динамические изменения нагрузки), нелинейностям и неточной идентификации параметров установки [16]. Для получения информации о состоянии установки следует использовать соответствующие датчики или алгоритмы оценки.

Очевидно, что второй вариант предпочтительнее из-за снижения общей стоимости и повышения надежности привода. Хотя можно использовать математические модели переменных, их зависимость от неопределенностей параметров представляет собой существенную проблему [17]. Для получения надежного инструмента для расчета переменных состояния обычно применяются наблюдатели состояния [ 18], наблюдатели Люенбергера [19] и фильтры Калмана [20].

Результаты, достигнутые с помощью контроллера состояния, могут представлять эффективное демпфирование колебаний переменных состояния. Более того, аппаратная реализация топологии контроллера состояния проста и осуществима. Наиболее проблемный вопрос заключается в устойчивости структуры к изменениям резонансной частоты объекта. Для улучшения реакции структуры управления на неточность идентификации и устойчивости к внешним возмущениям интересным решением кажутся структуры с адаптивными свойствами [21;22 ]. Согласно анализу структуры контроллеров, приложения, предложенные в научных работах, можно в целом разделить на решения, основанные на нейронных сетях (NN) [23], моделях нечеткой логики (FL) [24;25] или классических реконфигурируемых контроллерах [26].

В данной статье представлен регулятор состояния с адаптивным вектором параметров, и рассматриваются два типа регулятора. Первый использует только пересчет параметров, связанных со скоростью привода. Второй реализует полную адаптацию коэффициентов усиления. Общая конструкция регулятора основана на структуре адаптивного управления с эталонной моделью (MRAC).

Идея систем MRAC основана на использовании разницы между выходными данными эталонной модели и фактическими выходными данными системы [27]. Разностный сигнал используется для изменения значений коэффициентов усиления контроллера с помощью выбранного алгоритма адаптации. Контроллер изменяется таким образом, чтобы минимизировать разницу между выходными данными модели и системы. Преимущество систем MRAC заключается в том, что разработчик системы имеет прямой способ определения желаемого поведения системы посредством выбора эталонной модели.

**Материалы и методы**

Адаптивное управление с использованием MRAC

Рассмотренные методы получили экспериментальное подтверждение в рамках моделирования и физической реализации на механизмах с PMSM-приводом.

Представлено упрощенные изображение механической части привода (рисунок–1). Структура управления основана на регуляторе состояния и привод с упругой связью (рисунок–2 ).

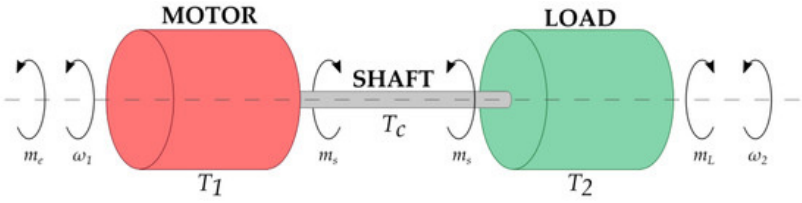



Рисунок 1 – Общий вид системы с упругой связью

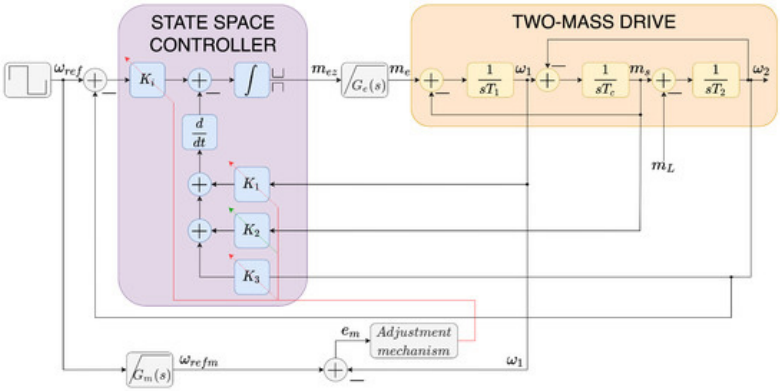



Рисунок 2 – Предлагаемая схема управления

Представленную модель механической части привода можно описать с помощью следующей системы дифференциальных уравнений [27;28;29]:

$$\frac{д\omega_1}{дt} = \frac{m_e - m_s}{T_1} \quad (1)$$

$$\frac{д\omega_2}{дt} = \frac{m_s - m_l}{T_2} \quad (2)$$

$$\frac{дm_s}{дt} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{T_c} \quad (3)$$

Где $\omega_1$ и $\omega_2$ представляют собой скорость вращения двигателя и нагрузки (соответственно), $m_e$ электромагнитный крутящий момент, $m_s$ крутящий момент и $m_L$ – это крутящий момент нагрузки. $T_1$, $T_2$ и $T_c$ – механические постоянные времени двигателя, нагрузки и вала, соединяющего две массы. Силы трения не учитываются.

Для более наглядного представления структуры управления контур управления крутящим моментом упрощается до передаточной функции первого порядка. $Ge$ постоянной времени $T_{me}$

$$G_e = \frac{1}{T_{m\varepsilon}+1} \quad (4)$$

Вся предлагаемая схема управления основана на каскадной структуре. Она состоит из внутреннего контура управления с ПИ-регулятором (Пропорционально-интегральный регулятор), отвечающим за формирование электромагнитного момента, и внешнего контура с предлагаемым адаптивным регулятором состояния с обратной связью, который управляет угловой скоростью привода. Следует отметить, что привод полностью управляется наблюдением (все переменные пространства состояний доступны для измерения). Несмотря на то, что контур управления моментом представлен в виде простой передаточной функции, в практической реализации выходной сигнал регулятора момента ограничен. Упрощение электромагнитного контура $Ge$. Это также связано с малой постоянной времени токового контура. Следует отметить, что с учётом современных достижений силовой электроники задержка, вызванная переключением преобразователя мощности, не превышает 5 мс, что пренебрежимо мало по сравнению с механической постоянной времени, отвечающей за формирование выходной скорости.

Регулятор состояния с параметрами, реализованный для системы с двумя подвижными элементами

Адаптивный регулятор скорости основан на классическом регуляторе состояния. Начальные значения коэффициентов усиления для процесса адаптации выбраны как для классической версии. В следующем анализе: $Ge$ предполагается равным 1.

В дополнение к системе уравнений (1 )–( 3) электромагнитный момент можно описать как

$$m_e = \int (K_1(\omega_{ref} - \omega_2) - \frac{д}{дt}(K_1\omega_1 + K_2\omega m_s + K_3\omega_2)дt \tag{5}$$

который, используя оператор Лапласа s , можно переписать как

$$m_e = \frac{K_1}{c}(\ \omega_{ref} - \omega_2) - (\ K_1\omega_1 + K_2\omega m_s + K_3\omega_2) \tag{6}$$

Параметры $K_i$, $K_1$, $K_2$ и $K_3$ – коэффициенты усиления регулятора (скалярные величины, то есть безразмерные). Объединяя уравнения (-1)–(-3) и (-6), передаточную функцию замкнутого контура можно представить как

$$\frac{\omega_2}{\omega_{ref}} = \frac{K_1}{c^4T_1T_2T_c + c^3K_1T_2T_c + c^2(T_1 + T_2 + K_2T_2) + c(K_1 + K_3) + K_1} \tag{7}$$

и, в результате получены выражения, описывающие коэффициенты обратной связи регулятора состояния:

$$K_1 = 4\sigma_r\ \omega_0T_1 \tag{8}$$

$$K_2 = T_1T_2(2\omega_0^2 + 4\sigma_0^2 - \frac{1}{T_1Tc} - \frac{1}{T_2Tc}) \tag{9}$$

$$K_3 = T_1 T_2 T_c 4\sigma_r \omega_0^3 - K_1 \quad (10)$$

$$K_t = \omega_0^4 T_1 T_2 T_c \quad (11)$$

Представленные выше выражения будут применены для настройки регулятора с фиксированными параметрами. Эти значения также используются в качестве начальных точек для адаптивных версий регулятора скорости.

**Результаты и обсуждение**

Имитационное тестирование проводилось в среде MATLAB/Simulink. Структура управления была реализована в Simulink, а данные передавались через рабочее пространство MATLAB. Во время моделирования $t_{sim}$= 20с, привод совершает реверсы с амплитудой $\omega_{ref}$= 0,25pu. Крутящий момент нагрузки прикладывается в $t_{ml}$= 13,2s моделирования с номинальным значением. Все переменные пространства состояний были сохранены во время моделирования.

Основная цель данной статьи — показать, что адаптивный контроллер пространства состояний может быть реализован различными способами. Показано сравнение классического адаптивного регулятора состояния и новой структуры (рисунок–3). Как видно из рисунков, наблюдается значительное увеличение адаптации скорости при адаптации всех коэффициентов. Реакция не только быстрее, но и перерегулирование заметно меньше (рисунок–3).

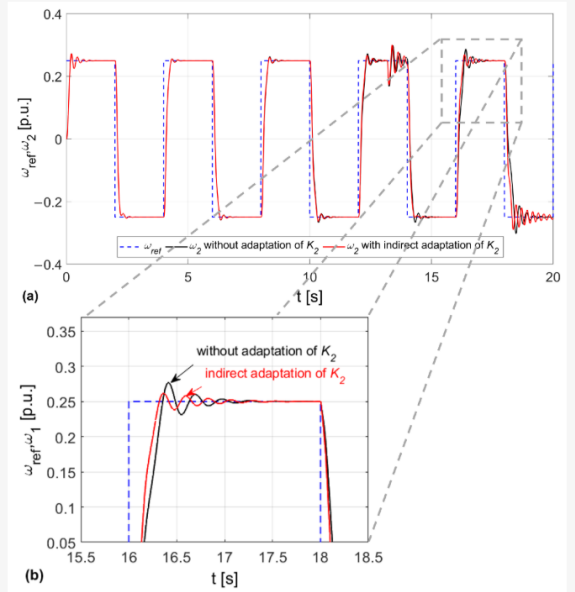



Рисунок 3 – Сравнение изменений переменных пространства состояний в приводе без адаптации $K_2$ и новая косвенная адаптация $K_2$: (а) весь переходный процесс, (б) масштабирование переходного процесса скорости. $\omega_2$– скорость груза

Также была проверена устойчивость к изменениям постоянной времени нагрузки (рисунок–4).

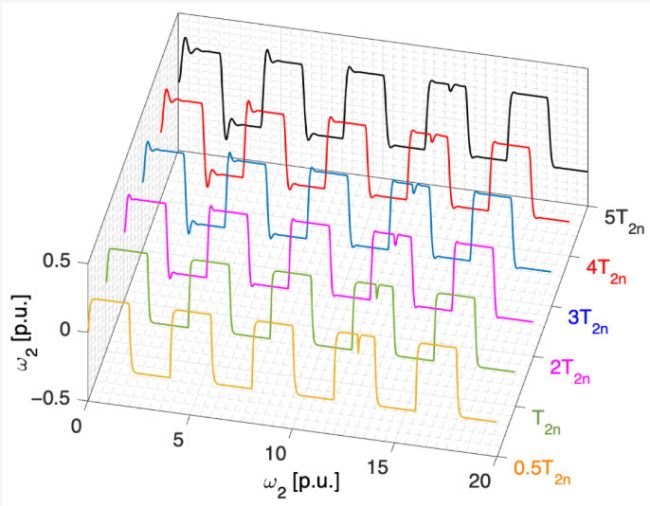



Рисунок 4 – Влияние изменения постоянной времени двигателя нагрузки в системе с оптимизированным параметром обучения

С увеличением постоянной времени нагрузки наблюдается рост перерегулирования при запуске привода. Однако, благодаря корректировке коэффициентов регулятора, оно снижается. При пятикратном увеличении постоянной времени максимальное перерегулирование составляет около 36 %. Снижение постоянной времени повышает чувствительность к нагрузочному моменту, но в остальном поведение привода остаётся стабильным.

Для верификации модели были проведены эксперименты на лабораторной установке с двумя электродвигателями мощностью 0,5 кВт, соединёнными гибким валом. Один двигатель служил объектом управления, другой — нагрузкой. Параметры инерции менялись заменой вала и маховиков. Управление реализовано на плате dSPACE 1103, с обратной связью по току (датчики LEM) и скорости (энкодеры). Испытания при номинальных параметрах подтвердили соответствие моделируемой и реальной динамики привода.

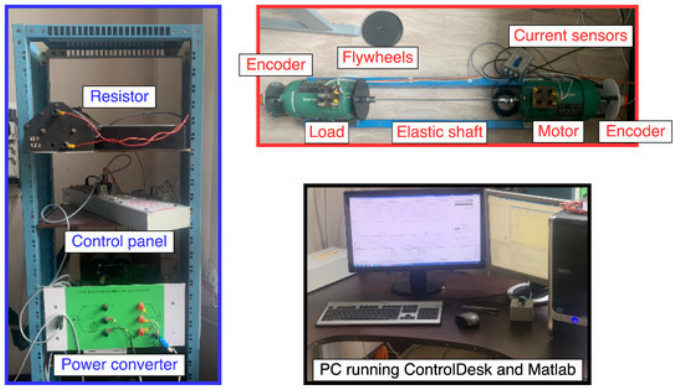



Рисунок 5 – Лабораторное оборудование, использованное для экспериментальной проверки (синий – силовая электроника; красный – привод; черный – ПК, программное обеспечение)

На следующем этапе предложен новый адаптивный регулятор с косвенной адаптацией коэффициента K2. Результаты с его применением (рисунок–6) демонстрируют стабильную работу системы и точное отслеживание заданной траектории скорости как на двигателе, так и на нагрузке. Испытания проводились при номинальных параметрах привода и оптимизированном состоянии стандартного регулятора. Управление отличается высокой динамикой и эффективным формированием крутящего момента.

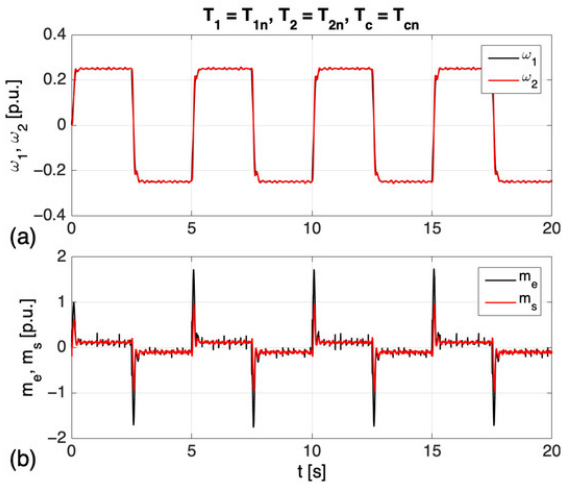



Рисунок 6 – Переходные процессы переменных состояния при номинальных постоянных времени в структуре управления с адаптивным регулятором состояния: (а) скорость двигателя и нагрузки, (б) электромагнитный и крутящий моменты

Были проведены испытания при изменённых условиях, когда объект был неточно идентифицирован или нагрузка увеличена за счёт добавления маховиков ко второму двигателю, что привело к увеличению постоянной времени до

$3T_2^n$ и $5T_2^n$ В ходе экспериментов использовались разные значения коэффициента адаптации ($\alpha_1<\alpha_2<\alpha_3$).

Результаты подтвердили выводы моделирования: с ростом коэффициента адаптации уменьшается перерегулирование и ускоряется затухание колебаний. Система стабилизируется быстрее, демонстрируя корректную работу даже при параметрических отклонениях.

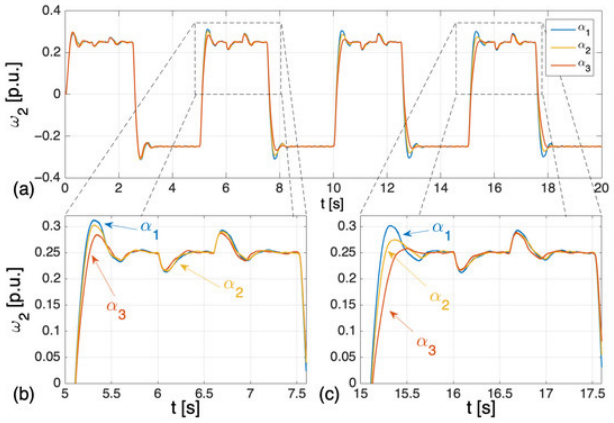



Рисунок 7 – Переменные состояния управляющей структуры с адаптивным регулятором скорости: () весь переходный процесс скорости нагрузки (b, c) масштабирование, использованное для отдельных частей результатов. Испытания, проведенные для $T_2$= $3T_2^n$

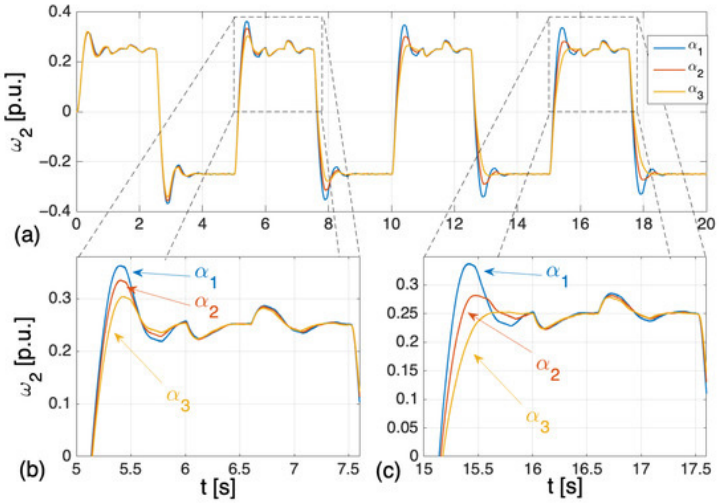



Рисунок 8 – Влияние $\alpha$ параметр на переменных состояния структуры управления с адаптивным регулятором скорости: (а ) весь переходный процесс скорости нагрузки (б, в) масштаб, используемый для выбранных частей результатов – испытания, выполненные для $T_2$= $5T_2^n$

Даже значительное увеличение $T_2$ может быть обработана предлагаемым адаптивным контроллером. Переходные процессы, представленные ниже, показывают отсутствие нежелательных колебаний, даже в ситуации, когда $T_2$= 5.

**Информация о финансировании**

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования МНВО РК AP19577094.

**Выводы**

В статье рассматриваются различные подходы к построению регулятора состояния, применяемого для электромеханической системы с упругой связью. Исходная структура имеет типовой вид, использующий сигналы от механической части привода. Затем реализуется дополнительная адаптация параметров регулятора. Рассматриваются два решения адаптивного управления скоростью (также рассматривается новый косвенный метод адаптации одного из коэффициентов). Для оптимизации значения скорости обучения регулятора, а также начальных значений используются выбранные методы оптимизации. Использование метаэвристических алгоритмов обеспечивает простой и эффективный инструмент для этапа проектирования.

Косвенный метод адаптации (для $K_2$ параметр) улучшает динамику привода и его работу при изменении параметров объекта. Необходимость реализации другого закона адаптации для этого коэффициента обусловлена зависимостью этого параметра от быстро меняющегося крутящего момента (остальные коэффициенты усиления зависят от угловых скоростей). Результаты моделирования показывают высокую эффективность демпфирования колебаний, вызванных крутящим моментом в электроприводе с упругим шарниром. Это подтверждает возможность корректного применения представленной структуры. Первые экспериментальные результаты были получены с использованием карты dSPACE для подтверждения корректной работы предлагаемой структуры управления. Сравнение эффективности, достигнутой с помощью представленной адаптивной структуры и базовых регуляторов, таких как ПИ-регулятор или регулятор в пространстве состояний, показывает значительное улучшение. Колебания не только демпфируются, но и перерегулирование минимизируется, что приводит к снижению значения целевой функции примерно на 40 %. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на реализации алгоритмов на недорогом устройстве и анализе устойчивости.

REFERENCES

1 **Dhaouadi, R., Kubo, K., Tobise, M.** Two-Degree-of-Freedom Robust Speed Controller for High Performance Rolling Mill Drives [Text] // Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – Houston, USA. – 1992. – 4–9 October.

2 **Brock, S., Łuczak, D., Nowopolski, K., Pajchrowski, T., Zawirski, K.** Two Approaches to Speed Control for Multi-Mass System With Variable Mechanical Parameters [Text] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2017. – Vol. 64. – P. 3338–3347.

3 **Brock, S., Łuczak, D., Pajchrowski, T., Zawirski, K.** Selected Methods for a Robust Control of Direct Drive with a Multi-mass Mechanical Load [Text] // Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters, Springer. – 2017. – Vol. 75. – P. 75–98.

4 **Lukyanov, X. I., Pishnograev, R. S., Schvidchenko, N. V.** Wide Strip Hot Rolling Mill Runout Roll Table Electric Drive Control System [Text] // Proc. IX Int. Conf. Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, Russia. – 2016. – P. 1–5.

5 **Neshati, M., Jersch, T., Wenske, J.** Model Based Active Damping of Drive Train Torsional Oscillations for Wind Turbine Nacelle Test Rig [Text] // Proc. American Control Conf. (ACC). – Boston, USA. – 2016. – P. 2283–2288.

6 **Hillsley, K. L., Yurkovich, S.** Vibration Control of a Two-Link Flexible Robot Arm [Text] // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. – Sacramento, USA. – 1991. – P. 2121–2126.

7 **Cheng, X., Zhang, Y., Liu, H., Wollherr, D., Buss, M.** Adaptive Neural Backstepping Control for Flexible-Joint Robot Manipulator [Text] // Neurocomputing. – 2021. – Vol. 458. – P. 70–86.

8 **Jung, H., Jeon, K., Oh, S.** Iterative Feedback Tuning of Cascade Control for Two-Mass System [Text] // IFAC-PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53. – P. 8357–8362.

9 **Zhang, R., Yang, Y., Chen, Z., Tong, C.** Torsional Vibration Suppression in Rolling Mill Drive [Text] // Proc. IEEE Conf. Control and Automation. – Guangzhou, China. – 2007. – P. 2172–2177.

10 **Lin, M.-H., Zhang, L., Zhang, Y.-H., Li, P.-F., Wang, X.-H.** Backstepping Control with Error Compensation [Text] // Proc. Chinese Control And Decision Conf. – Hefei, China. – 2020. – P. 3696–3701.

11 **Tang N., Yang, M., Hu, K., Xu, D.** State Feedback of Two-Mass System Based on Weight Coefficient [Text] // Proc. IEEE Conf. Transportation Electrification (ITEC Asia-Pacific). – China. – 2017. – P. 1–6.

12 **Sonawane, R., Apte, A. A.** State Observer Based Speed Control for PMSM [Text] // Proc. Int. Conf. Advances in Communication and Computing Technology. – India. – 2018. – P. 524–527.

13 **Li, Y., Yang, M., Long, J., Liu, Z., Xu, D.** Sensorless Predictive Control for PMSM [Text] // Proc. IEEE Transportation Electrification Conf. (ITEC Asia-Pacific). – China. – 2017. – P. 1–6.

14 **Wei, M., Liu, T.** Adaptive Controller for Synchronous Reluctance Motor Drives [Text] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2013. – Vol. 60. – P. 3644–3657.

15 **Chiang, H., Hsu, K., Li, I.** Adaptive Motion Control for Linear Induction Motors [Text] // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. – 2015. – Vol. 20. – P. 348–360.

16 **Belov, M. P., Lanh, N. V., Khoa, T. D.** State Observer with Elman RNN for Electric Drive [Text] // Proc. IEEE Conf. Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – Russia. – 2021. – P. 802–805.

17 **Lukichev, D. V., Demidova, G. L., Brock, S.** Fuzzy Adaptive PID Control for Two-Mass Drive [Text] // Proc. IEEE Int. Conf. Cybernetics (CYBCONF). – Poland. – 2015. – P. 443–448.

18 **Song, G., Tao, G.** Partial-State Feedback Adaptive Control Scheme [Text] // IEEE Trans. Autom. Control. – 2020. – Vol. 65. – P. 44–57.

19 **Al-Waeli, K. H., Ramli, R., Haris, S. M., Zulkoffli, Z. B., Amiri, M. S.** ANN-PID Controller for Lower Limb Exoskeleton [Text] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 107360–107374.

20 **Kodakkal, A., Veramalla, R., Kuthuri, N. R., Salkuti, S. R.** ALO Optimized Controller for Wind Power Unit [Text] // Designs. – 2021. – Vol. 5. – Art. 65.

Поступило в редакцию 14.07.25.
Поступило с исправлениями 24.07.25.
Принято в печать 07.08.25.

***А. Ж. Абекова[1], М. Ж. Куатова[2], Н. С. Камзанов[3], Б. Ю. Бектилевов[4]***
[1,2]У. А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ;
[2]Халықаралық инженерлі-технологиялық университеті
Қазақстан Республикасы, Алматы қ;
[3,4]Сәтпаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
14.07.25 ж. баспаға түсті.
24.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
07.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЕКІ ЕРКІНДІК ДӘРЕЖЕСІ БАР ГИБРИДТІ ИІНДІ ПРЕССКЕ АРНАЛҒАН СЕРПІМДІ БАЙЛАНЫСЫ БАР ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІН БАСҚАРУ

*Бұл мақалада екі еркіндік дәрежесі бар гибридті қосиінді пресс құрамында қолданылатын серпімді байланысы бар электрмеханикалық жетекті басқару мәселесі қарастырылады. Мұндай пресс түрлері жетібуынды механизмнің кинематикалық құрылымын және жоғары дәлдіктегі сервожетектерді біріктіріп, технологиялық талаптарға байланысты ползун қозғалысының бейімделгіш заңдарын жүзеге асыруға және жүріс профилінің оңтайлы қалыптасуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Электромеханикалық бөліктің динамикасын сипаттау үшін жетек пен механизмнің атқарушы буыны арасындағы байланыстыру білігінің серпімді қасиеттерін ескеретін, инерциясы бөлінген модель қолданылады. Өзгермелі жүктемелер жағдайында да қозғалысты тұрақты және дәл орындауға мүмкіндік беретін, күй бойынша кері байланыс негізінде реттегішті синтездеу тәсілі ұсынылған. Зерттеу нәтижелері зертханалық стендте жүргізілген сандық модельдеу және эксперименттік зерттеулер арқылы дәлелденді. Серпімді тербелістерді компенсациялауға және параметрлік бұзылыстар жағдайындағы тұрақтылыққа ерекше назар аударылды. Алынған нәтижелер айнымалы технологиялық жүктемелер жағдайында жұмыс істейтін механикалық*

*берілістері бар жоғары дәлдіктегі серво-престерге арналған заманауи бейімделгіш басқару жүйелерін жобалауда пайдалы болуы мүмкін.*

*Кілтті сөздер: адаптивті басқару, гибридті қосиінді прес, кері байланыс, математикалық модель, динамикалық жүйе.*

***A. Zh. Abekova[1], M. Zh. Kuatova[2], N. S. Kamzanov[3], A. Y. Bektilevov[4]***
[1,2]Institute of Mechanics and Engineering named after academician
U. A. Dzholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]International Engineering and Technology University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 14.07.25.
Received in revised form 24.07.25.
Accepted for publication 07.08.25.

## ELECTRIC DRIVE CONTROL WITH ELASTIC COUPLING FOR A TWO DEGREE OF FREEDOM HYBRID CRANK PRESS

*This paper addresses the problem of speed control for an electromechanical drive with elastic coupling employed in a hybrid crank press possessing two degrees of freedom. Such presses integrate the kinematic structure of a seven-link mechanism with high-precision servo drives, enabling the implementation of adaptive slider motion laws that meet specific technological requirements and yield an optimal stroke profile.*

*To describe the dynamics of the electromechanical subsystem, a split inertia model is adopted that captures the elastic properties of the shaft linking the drive to the mechanism's actuating member. A stat feedback based controller-synthesis approach is proposed, ensuring stable and accurate trajectory tracking even under varying load conditions.*

*Comprehensive numerical simulations and experimental studies on a laboratory test bench confirm the effectiveness of the developed control algorithm. Particular emphasis is placed on compensating elastic oscillations and maintaining robustness against parametric disturbances. The findings can be applied to the design of modern adaptive control systems for high precision servo presses with mechanical transmissions operating under variable technological loads.*

*Keywords: adaptive control, hybrid crank press, state feedback, mathematical model, dynamic system.*

МРНТИ 55.13.15

https://doi.org/10.48081/SDAO1743

***П. О. Быков[1,2], С. А. Зигангиров[2], *Р. Б. Муканов[3], И. В. Бульдяев[4]***

[1]Инновационный Евразийский университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]ООО «Бустер ПРО», Российская Федерация, г. Новосибирск
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7540-7882
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8842-6433
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-0513
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0842-1331
*e-mail: ruslangr82@mail.ru

# *ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ*

*Представлены результаты экспериментальных исследований совершенствованию технологического процесса изготовления деталей типа зубчатых колес и шестерен с применением азотирования вместо закалки ТВЧ для высоконагруженных узлов оборудования горнометаллургического комплекса.*

*В последние годы в Казахстане наметилась тенденция концентрации ремонтно-механических и машиностроительных мощностей подконтрольных предприятий крупных корпораций (группа ERG, KazMinerals и других) в единые компании, которые обеспечивают – изготовление, обслуживание и эксплуатацию оборудования, поддержание и развитие ремонтных и вспомогательных процессов на всех предприятиях корпораций.*

*Одним из определяющих подходов при обосновании оптимального технологического процесса производства деталей машиностроения является критерий требуемого качества выпускаемой продукции, который в свою очередь включает в себя надежность и как следствие увеличение межремонтного простоя технологического оборудования.*

*Традиционная технология изготовления зубчатых колес не всегда обеспечивает достаточную долговечность для деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и трения. Другим важным критерием, обязательным для деталей горнометаллургического оборудования следует назвать коррозионную стойкость, так как часто приводы в связи с особенностями технологии работают в условиях агрессивных сред. Гипотезой исследования является применение азотирования, как оптимального вида упрочняющей обработки, обеспечивающей для зубчатых колес горнометаллургического*

*оборудования не только необходимый уровень прочности и долговечности, но и коррозионную стойкость.*

*Целью исследования является сравнение технологического процесса изготовления деталей типа зубчатых колес и шестерен с применением азотирования вместо поверхностной закалки токами высокой частоты.*

*Сравнительный анализ характеристик и эксплуатации детали «Шестерня», полученной с применением азотирования показал преимущества предлагаемой технологии изготовления по сравнению с термической обработкой ТВЧ.*

*Ключевые слова: горно-металлургический комплекс, шестерня, сталь 38Х2МЮА, термическая обработка, азотирование.*

**Введение**

По данным Бюро Национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан объем производства в машиностроении и металлообработки показывает стабильный рост. Основными видами машиностроения являются: автомобилестроение, сельхозмашиностроение, нефтегазовое машиностроение, железнодорожное машиностроение, электротехническое машиностроение, горнорудное машиностроение [1].

В последние годы в Казахстане наметилась тенденция концентрации ремонтно-механических и машиностроительных мощностей подконтрольных предприятий крупных корпораций (группа ERG, KazMinerals и других) в единые компании, которые обеспечивают изготовление, обслуживание и эксплуатацию оборудования, поддержание и развитие ремонтных и вспомогательных процессов на всех предприятиях корпораций [2]. Часто производственные мощности таких предприятий, располагаются в разных регионах и городах Казахстана, что накладывает свои особенности на разработку и реализацию технологических процессов при изготовлении запасных частей для горнометаллургического оборудования, используемого на предприятиях корпораций. В любом случае, основными целями деятельности предприятий является уменьшение стоимости и сроков изготовления деталей при обеспечении необходимого их качества [3]. На рынке машиностроения также присутствуют большое количество предприятий малого и среднего бизнеса, которые имеют свою нишу.

Известно [4; 5; 6; 7; 8], что существующие подходы к обоснованию оптимального технологического процесса производства деталей машиностроения базируется на различных критериях, основными из которых являются: критерий минимальной длительности производственного цикла, критерий максимальной производительности, критерий минимальной себестоимости, критерий требуемого качества выпускаемой продукции или комплексному критерию.

К сожалению, как отмечают ряд авторов [9; 10], в современных условиях оптимальная технология изготовления деталей часто недостижима для задач ремонтного производства, так как возникают существенные сложности технического и организационного характера с подбором типа заготовки и маркой материала.

Одним из основных видов высоконагруженных деталей для оборудования горнометаллургической отрасли являются зубчатые колеса.

Стандартный технологический процесс изготовления деталей данного типа из среднеуглеродистых легированных сталей по ГОСТ 4543-2016 включает:

– изготовление заготовки методом ковки или штамповки для улучшения структуры металла;

– черновая и чистовая обработка резанием на станках (токарная, фрезерная, зубонарезная);

– термообработка методом закалки ТВЧ (поверхностная закалка токами высокой частоты) для упрочнения зубьев;

– финишная обработка путем шлифования зубьев для достижения высокой точности.

К преимуществам данной технологии термообработки можно отнести высокую поверхностную твердость деталей (до 58–62 HRC), улучшенную износостойкость по сравнению с обычной закалкой, меньшую длительность и стоимость процесса по сравнению с различными видами химико-термической обработки (цементация, цианирование, азотирование и др.).

Однако, данная технология изготовления зубчатых колес и шестерен не обеспечивает достаточную долговечность для деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и трения. Другим важным критерием, обязательным для шестерен горнометаллургического оборудования следует назвать коррозионную стойкость, так как часто приводы в связи с особенностями технологии работают в условиях агрессивных сред.

Поэтому гипотезой исследования является применение азотирования, как оптимального вида упрочняющей обработки, обеспечивающей для зубчатых колес горнометаллургического оборудования не только необходимый уровень прочности и долговечности, но и коррозионную стойкость.

Целью исследования является сравнение технологического процесса изготовления деталей типа зубчатых колес и шестерен с применением азотирования вместо поверхностной закалки токами высокой частоты.

**Материалы и методы**

На рисунке 1 в качестве детали-представителя показана шестерня привода перемешивающего устройства (объект исследования). Материал детали 38Х2МЮА по ГОСТ 4543 – 2016.

Рисунок 1 – Общий вид детали «Шестерня»

В производственных условиях ООО «Бустер ПРО» была изготовлена деталь «Шестерня» (рисунок 2) для оборудования горнометаллургической отрасли по двум схемам технологического процесса: 1) с применением ТВЧ; 2) с применением азотирования.

Технологический процесс изготовления детали «Шестерня» с азотированием включал в себя следующие этапы:

– изготовление заготовки методом ковки;

– черновая обработка резанием (токарная, фрезерная);

– термическая обработка в виде улучшения (закалка в масле с последующим высоким отпуском);

– финишная обработка детали на электроэрозионном станке для достижения высокой точности и чистоты поверхности (Ra0,80);

– низкотемпературное (500–600 °С) газовое азотирование в печи с атмосферой частично диссоциированного аммиака $NH_3$.

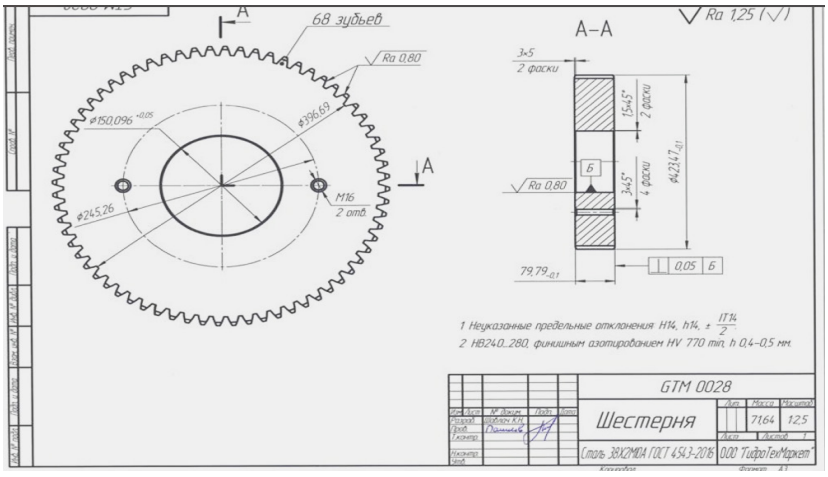



Рисунок 2 – Чертеж детали «Шестерня»

Технология изготовления детали с применением термообработки ТВЧ была описана выше. Далее проводили лабораторные металлографические исследования для определения структурных характеристик детали после азотирования. Предметом исследования являлось изучение эффективности азотирования в качестве альтернативы традиционной поверхностной закалке ТВЧ.

Из детали «Шестерня» вырезался образец для проведения микроструктурного анализа – темплет (рисунок 3). Поверхность образца подвергали специальной обработке для того, чтобы получить плоскую поверхность. Для получения качественной поверхности микрошлифа темплет подвергали шлифованию и полированию.

Рисунок 3 – Вырезанный образец для микроструктурных исследований

Микроструктурный анализ выявляет структуры сплавов в неравновесном состоянии. Образование в закаленной стали структуры мартенсита, обнаруживаемое микроанализом, резко изменяет свойства, в частности повышает прочность, твердость и значительно уменьшает пластичность и вязкость. При химико-термической обработке закаленной стали ее микроструктура изменяется, микроанализ обнаруживает большие изменения, связанные с глубиной распространения азотированного слоя. Поэтому микроанализ позволяет судить о тех значительных и важных для практики изменениях механических и физических свойств стали, которые вызывают эти превращения. Шлифы образцов из стали перед микроскопическим исследованием протравливали 1 мин в 4 %-ном растворе азотной кислоты. Исследование микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе OLYMPUS BX2M при кратности увеличения 100, 200. Твердость азотированного слоя на поверхности зуба измеряли по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999.

**Результаты и обсуждение**

На рисунке 4 приведена микроструктура зуба детали «Шестерня» после азотирования.

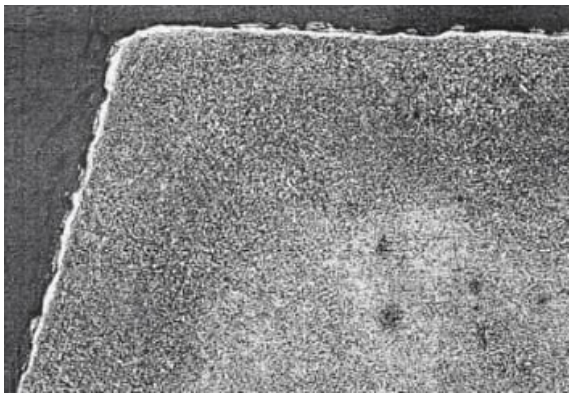


Рисунок 4 – Микроструктура вырезанного образца детали «Шестерня» после азотирования (сталь 38Х2МЮА по ГОСТ 4543), ×100

Микроструктурный анализ показал следующее:

– структура образца феррито-перлитная, соотношение перлита и феррита соответствует соотношению 50%/50%, согласно шкале 7 (ГОСТ 8233);

– соотношение зернистого и пластинчатого перлита соответствует 65%/35%, согласно шкале 9 (ГОСТ 8233), размер зерна соответствует 9 баллу, шкала 1 (ГОСТ 5639);

– глубина азотирования 0,45–0,5 мм.

Сравнительный анализ характеристик и последующей эксплуатации детали «Шестерня», полученной с применением различных видов упрочняющей термической обработки (ТВЧ и азотирование) показал преимущества предлагаемой технологии изготовления с применением азотирования.

Известно, что в результате азотирования сталь приобретает высокую твердость на поверхности, не изменяемую при нагреве до 400–450 °С, низкую склонность к задирам, высокий предел выносливости при работе в условиях вибраций, ударных и знакопеременных нагрузок, хорошую сопротивляемость коррозии в атмосфере воздуха, воды и пара [11].

При низкотемпературном азотировании, то есть при температурах ниже эвтектоидного превращения в данной системе сплава, происходит преимущественное насыщение стали азотом и в диффузионном слое образуются азотистые фазы. При этом углерод, содержащийся в стали, способствует образованию карбонитридных фаз[12].

Структура диффузионного слоя находится в полном соответствии с диаграммой состояния Fe-Ni (Fe-Ni-C). Все легирующие элементы уменьшают толщину азотированного слоя, но существенно увеличивают твердость как на поверхности, так и в сечении. Легирование стали сразу несколькими элементами приводит к достижению большей твердости, по сравнению с легированием только одним элементом. Это можно объяснить тем, что в процессе азотирования у таких сталей происходит не только образование и выделение нитридных и карбонитридных частиц, но и повышается общая растворимость азота в феррите за счет легирования переходными металлами.

Твердость азотированного слоя на поверхности зуба измеряли по методу Виккерса согласно ГОСТ 2999 (рисунок 5).

Результат измерения твердости на поверхности зуба составил 1065±5 HV. Высокая твердость азотированного слоя стали 38Х2МЮА объясняется образованием легированной алюминием нитридной фазы, которая дает деформационное упрочнение в процессе обработки. При этом на твердость внутреннего слоя алюминий практически не оказывает воздействия, таким образом сохраняется необходимая для высоких эксплуатационных свойств мягкая сердцевина и твердая поверхность детали.

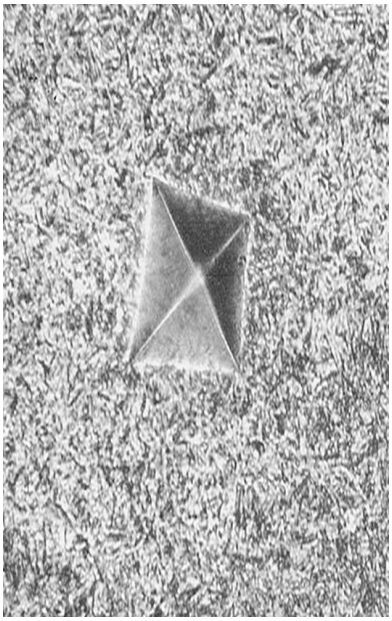


Рисунок 5 – Отпечаток индентора при определении твердости по Виккерсу азотированного слоя детали «Шестерня» (сталь 38Х2МЮА по ГОСТ 4543), ×200

Азотированные стали обладают высокой износостойкостью. По данным [13] износостойкость азотированных сталей в 1,5–4 раза выше, чем закаленных углеродистых и цементованных сталей. Азотирование изделий способствует повышению предела выносливости сталей, так как надрезы, царапины, резкие перепады сечений, другие концентраторы напряжений после азотирования практически не оказывают своего вредного воздействия на эксплуатационные характеристики материала.

Азотированный слой устойчив к коррозии в условиях атмосферы воздуха, воды, перегретого пара и других средах, что объясняется высоким электродным потенциалом (-0,1–0,13мВ) плотного слоя нитридной фазы на поверхности детали [14].

**Выводы**

В производственных условиях ООО «Бустер ПРО» для детали «Шестерня» реализована технология низкотемпературного газового азотирования в качестве альтернативы традиционно применяемой поверхностной закалке токами высокой частоты.

Выполнен микроструктурный анализ фаз и структур полученного азотированного слоя глубиной 0,45–0,5 мм на поверхности детали, получена твердость упрочненного слоя по Виккерсу1065±5 HV.

Проведенный сравнительный анализ основных эксплуатационных характеристик детали «Шестерня» для горнометаллургического оборудования, полученной с применением существующей термической обработки и азотирования показал преимущества предлагаемой технологии изготовления с применением азотирования.

**Информация о финансировании**

Исследования проводились в рамках госбюджетной программно-целевой научной-исследовательской работы Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту ИРН BR24993003-ОТ-24 «Разработка комплекса мероприятий инструментального обеспечения обрабатывающих отраслей экономики».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Концепция развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан на 2023–2029 годы, утверждённая Постановлением Правительства Республики Казахстан от 20 декабря 2018 года № 846.

2 **Барзов, А. А., Сеина, Я. Д., Муканов, Р. Б.** Определение потенциала результативности научно- квалификационного исследования технологического профиля на этапе его планирования – [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2024. – № 2. – С. 49–58. – https://doi.org/10.48081/XICF8407.

3 **Гумаров, Г. С.** Разработка многономенклатурных механообрабатывающих производств с применением систем автоматизированного проектирования / Г. С. Гумаров, С. Г. Митин [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2023. – № 1. – С. 59–72. – https://doi.org/10.48081/FGNE1148.

4 **Fernández-Valdés, D., Vidal-Torres, J., Lopez-Lievano, A., Meneses-Amador, A., Lopez-Garcia, C., Rodriguez-Castro, G. A.** Evaluation of adhesive damage in a nitrided stainless steel under cyclic contact loading // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Т. 474. – С. 130101. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130101.

5 **Borgioli, F., Adachi S., Lindner, T.** Advances in Low-Temperature Nitriding and Carburizing of Stainless Steels and Metallic Materials: Formation and Properties // Metals. – 2024. – Т. 14. – № 10. – С. 1179. – https://doi.org/10.3390/met14101179.

6 **Andreev, A.** Results of approbation of the innovative method of ion nitriding for steels with low temperatures of tempering / A. Andreev, O. Sobol, S. Shevchenko

[Текст] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3. – № 5(87). – P. 31–36. – https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.104179.

7 **Mamontov, D. V.** Study of the effect of asymmetric rolling followed by ion nitriding on the hardness and structure of HSS M2 tool steel / D. V. Mamontov, I. D. Sklizkov, A. V. Asylbaev, R. K. Vafin [Текст] // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Vol. 5. № 4(14). – P. 126–134. – https://doi.org/10.54708/26587572_2023_5414126.

8 **Герасимов, С. А.** Повышение характеристик механических свойств теплостойких сталей методом активизации процесса азотирования / С. А. Герасимов, Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева [Текст] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 2. – С. 90–96.

9 **Поликевич, К. Б.** Исследование закономерностей процесса азотирования многослойных металлических материалов, полученных на основе сталей / К. Б. Поликевич, А. И. Плохих [Текст] // Ключевые тренды в композитах: наука и технологии : сборник материалов Международной научно-практической конференции. – М. : ООО «Диона», 2019. – С. 592–597.

10 **Белашова, И. С.** Влияние различных режимов азотирования на механические характеристики и структуру легированных сталей в условиях низких температур / И. С. Белашова, Л. Г. Петрова, М. А. Фролов [Текст] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : Материалы XXX Международного симпозиума имени А. Г. Горшкова. – М. : ООО «ТРП», 2024. – С. 39–41.

11 **Куксенова, Л. И.** Влияние структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях при азотировании сталей на их эксплуатационные свойства / Л. И. Куксенова, М. С. Алексеева, С. А. Поляков [Текст] // Исследования и обоснование прочности и безопасности машин : Посвящается 300-летию Российской академии наук, 85-летию Института машиноведения РАН. – М. : МГОФ «Знание», 2023. – С. 523–555.

12 **Щукина, Л. Е.** Азотирование легированных марок сталей / Л. Е. Щукина, А. Е. Семин, Г. А. Филиппов [Текст] // Физико-химические основы металлургических процессов : Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина, Москва, 14–15 ноября 2017 года. – М. : ООО «Интерконтакт Наука». 2017. – С. 63.

13 **Нечаев, Л. М.** Влияние азотирования на износостойкость сталей, работающих при высоких контактных нагрузках / Л. М. Нечаев, Н. Б. Фомичева, Г. В. Сержантова, И. Ю. Канунникова [Текст] // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 11. – С. 111.

14 **Герасимов, С. А.** Азотирование конструкционных сталей триботехнического назначения и комплексная оценка качества обработки / С. А. Герасимов, Л. И. Куксенова, М. С. Алексеева, М. А. Бахирев [Текст] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – № 2(776). – С. 18–25.

REFERENCES

1 Koncepciya razvitiya obrabatyvayuscheii promyshlennosti Respubliki Kazakhstan na 2023 – 2029 gody, utverzhdennaya Pravitelstvom Respubliki Kazakhstan ot 20 decabriya 2018 goda № 846 [The concept of development of the manufacturing industry of the Republic of Kazakhstan for 2023–2029, approved by the Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated December 20, 2018 № 846].

2 **Barzov, A. A., Seina, Ya. D., Mukanov, R. B.** Opredelenie potenciala rezul`tativnosti nauchno- kvalifikacionnogo issledovaniya texnologicheskogo profilya na e`tape ego planirovaniya [Determination of the potential for the effectiveness of scientific and qualification research of technological profile at the stage of its planning] [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2024. – № 2. – P. 49–58. – https://doi.org/10.48081/XICF8407.

3 **Gumarov, G. S.** Razrabotka mnogonomenklaturny`x mexanoobrabaty`vayushhix proizvodstv s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya / G. S. Gumarov, S. G. Mitin [Text] [Development of multiple mechanclature machining productions using automated design systems] // Science and technology of Kazakhstan. – 2023. – № 1. – P. 59–72. – https://doi.org/10.48081/FGNE1148.

4 **Fernández-Valdés, D., Vidal-Torres, J., Lopez-Lievano, A., Meneses-Amador, A., Lopez-Garcia, C., Rodriguez-Castro, G. A.** Evaluation of adhesive damage in a nitrided stainless steel under cyclic contact loading [Text] // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 474. – P. 130101. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130101.

5 **Borgioli, F., Adachi, S., Lindner, T.** Advances in Low-Temperature Nitriding and Carburizing of Stainless Steels and Metallic Materials: Formation and Properties [Text] // Metals. – 2024. – Vol. 14. – №. 10. – P. 1179. – https://doi.org/10.3390/met14101179.

6 **Andreev, A.** Results of approbation of the innovative method of ion nitriding for steels with low temperatures of tempering / A. Andreev, O. Sobol, S. Shevchenko [Text] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3. – № 5(87). – P. 31–36. – https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.104179.

7 **Mamontov, D. V.** Study of the effect of asymmetric rolling followed by ion nitriding on the hardness and structure of HSS M2 tool steel / D. V. Mamontov, I. D. Sklizkov, A. V. Asylbaev, R. K. Vafin [Text] // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Vol. 5. – № 4(14). – P. 126–134. – https://doi.org/10.54708/26587572_2023_5414126.

8 **Gerasimov, S. A.** Povy`shenie xarakteristik mexanicheskix svojstv teplostojkix stalej metodom aktivizacii processa azotirovaniya [ Improvement of mechanical properties of heat-resistant steels by activation of the nitriding process] / S. A. Gerasimov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva [Text] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – № 2. – P. 90–96.

9 **Polikevich, K. B.** Issledovanie zakonomernostej processa azotirovaniya mnogoslojny`x metallicheskix materialov, poluchenny`x na osnove stalej [Investigation of the regularities of the nitrating process of multilayer metal materials based on the

steels] / K. B. Polikevich, A. I. Ploxix [Text] // Klyuchevy`e trendy` v kompozitax: nauka i texnologii : cbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Moskva: OOO «Diona», 2019. – P. 592–597.

10 **Belashova, I. S.** Vliyanie razlichny`x rezhimov azotirovaniya na mexanicheskie xarakteristiki i strukturu legirovanny`x stalej v usloviyax nizkix temperatur [The influence of different nitriding modes on the mechanical characteristics and structure of alloy steels under low temperature conditions] / I. S. Belashova, L. G. Petrova, M. A. Frolov // Dinamicheskie i texnologicheskie problemy` mexaniki konstrukcij i sploshny`x sred : Materialy` XXX Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A. G. Gorshkova. – Moscow : OOO «TRP», 2024. – P. 39–41.

11 **Kuksenova, L. I.** Vliyanie strukturno-fazovy`x prevrashhenij v poverxnostny`x sloyax pri azotirovanii stalej na ix e`kspluatacionny`e svojstva [The influence of structural-phase transformations in surface layers during nitriding of steels on their operational properties] / L. I. Kuksenova, M. S. Alekseeva, S. A. Polyakov [Text] // Issledovaniya i obosnovanie prochnosti i bezopasnosti mashin: – Moscow : MGOF «Znanie», 2023. – P. 523–555.

12 **Shhukina, L. E.** Azotirovanie legirovanny`x marok stalej / L. E. Shhukina, A. E. Semin, G. A. Filippov [Nitriding of alloy steel grades] // Fiziko-ximicheskie osnovy` metallurgicheskix processov: Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, – Moscow : OOO «Interkontakt Nauka», 2017. – P. 63.

13 **Nechaev, L. M.** Vliyanie azotirovaniya na iznosostojkost` stalej, rabotayushhix pri vy`sokix kontaktny`x nagruzkax [The effect of nitriding on the wear resistance of steels operating under high contact loads] / L. M. Nechaev, N. B. Fomicheva, G. V. Serzhantova, I. Yu. Kanunnikova // Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. – 2011. – № 11. – P. 111.

14 **Gerasimov, S. A.** Azotirovanie konstrukcionny`x stalej tribotexnicheskogo naznacheniya i kompleksnaya ocenka kachestva obrabotki [Nitriding of structural steels for tribotechnical applications and complex estimation of the treatment quality] / S. A. Gerasimov, L. I. Kuksenova, M. S. Alekseeva, M. A. Baxirev [Text] // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 2020. – № 2(776). – P. 18–25.

Поступило в редакцию 20.04.25.
Поступило с исправлениями 10.07.25.
Принято в печать 07.08.25.

***П. О. Быков[1,2], С. А. Зигангиров[2], *Р. Б. Муканов[3], И. В. Бульдяев[4]***
[1]Инновациялық Еуразия университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[3] Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
20.04.25 ж. баспаға түсті.
10.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
07.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

# ТАУ-КЕН МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ЖАБДЫҚТАРДЫҢ ТИЕЛГЕН ДӨҢГЕЛЕКТЕРІН ДАЙЫНДАУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ДАЙЫНДЫҒЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

*Мақалада тау-кен металлургия кешені жабдықтарының жоғары жүктемелі тораптары үшін ТВЧ қатайтудың орнына азоттауды қолдана отырып, тісті доңғалақтар мен тісті доңғалақтар типіндегі бөлшектерді дайындаудың технологиялық процесін жетілдіруге арналған эксперименттік зерттеулердің нәтижелері келтірілген.*

*Соңғы жылдары Қазақстанда ірі корпорациялардың бақылауындағы кәсіпорындардың (ERG, KAZMinerals тобы және басқалары) Жөндеу-механикалық және машина жасау қуаттарын корпорациялардың барлық кәсіпорындарында жабдықтарды дайындауды, оларға қызмет көрсетуді және пайдалануды, жөндеу және қосалқы процестерді қолдауды және дамытуды қамтамасыз ететін бірыңғай компанияларға шоғырландыру үрдісі байқалды.*

*Машина жасау бөлшектерін өндірудің оңтайлы технологиялық процесін негіздеудегі шешуші тәсілдердің бірі өндірілетін өнімнің қажетті сапасының өлшемі болып табылады, ол өз кезегінде технологиялық жабдықтың сенімділігін және соның салдарынан жөндеуаралық тоқтап қалуын арттырады.*

*Дәстүрлі беріліс технологиясы әрқашан жоғары жүктеме мен үйкеліс жағдайында жұмыс істейтін бөлшектер үшін жеткілікті беріктікті қамтамасыз ете бермейді. Тау-кен металлургиялық жабдықтарының бөлшектері үшін қажет тағы бір маңызды критерий коррозияға төзімділік деп аталуы керек, өйткені көбінесе технологияның ерекшеліктеріне байланысты жетектер агрессивті ортада жұмыс істейді. Зерттеудің гипотезасы тау-кен металлургиялық жабдықтарының берілістеріне беріктік пен беріктіктің қажетті деңгейін ғана емес, сонымен қатар коррозияға төзімділікті қамтамасыз ететін қатайтатын өңдеудің оңтайлы түрі ретінде азоттауды қолдану болып табылады.*

*Зерттеудің мақсаты-жоғары жиілікті токтармен беттік сөндірудің орнына азоттауды қолдана отырып, тісті доңғалақтар мен тісті доңғалақтар сияқты бөлшектерді жасаудың технологиялық процесін салыстыру.*

*Азоттауды қолдану арқылы алынған «беріліс» бөлігінің сипаттамалары мен жұмысын салыстырмалы талдау ЖЖТ термиялық өңдеумен салыстырғанда ұсынылған өндіріс технологиясының артықшылықтарын көрсетті.*

*Кілтті сөздер: тау-кен металлургия кешені, беріліс, 38Х2МЮА Болат, термиялық өңдеу, азоттау.*

***P. O. Bykov[1,2], S. A. Zigangirov[2], *R. B. Mukanov[3], I. V. Buldyayev[4]***
[1]Innovative Eurasian University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[2]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[3]K. I. Satpayev Kazakh National Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]«Buster PRO» LLC, Russian Federation, Novosibirsk.
Received 20.04.25.
Received in revised form 10.07.25.
Accepted for publication 07.08.25.

## OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION FOR MANUFACTURING GEARS OF MINING AND METALLURGICAL EQUIPMENT

*This article presents the results of experimental studies to improve the technological process of manufacturing parts such as gears and gears using nitriding instead of HDPE quenching for highly loaded equipment components of the mining and metallurgical complex.*

*In recent years, there has been a tendency in Kazakhstan to concentrate the repair, mechanical and machine-building capacities of controlled enterprises of large corporations (ERG Group, KazMinerals and others) into single companies that ensure the manufacture, maintenance and operation of equipment, maintenance and development of repair and auxiliary processes at all enterprises of corporations.*

*One of the defining approaches in substantiating the optimal technological process for the production of machine-building parts is the criterion of the required quality of products, which in turn includes reliability and, as a result, increased maintenance downtime of technological equipment.*

*The traditional technology of manufacturing gears does not always provide sufficient durability for parts operating under high loads and friction. Another important criterion that is mandatory for mining and metallurgical equipment parts is corrosion resistance, since drives often operate in aggressive environments due to the peculiarities of technology. The hypothesis of the study is the use of nitriding as the optimal type of hardening treatment, which provides the gears of mining equipment with not only the necessary level of strength and durability, but also corrosion resistance.*

*The purpose of the study is to compare the technological process of manufacturing parts such as gears and gears using nitriding instead of surface quenching with high-frequency currents.*

*A comparative analysis of the characteristics and operation of the Gear part obtained using nitriding has shown the advantages of the proposed manufacturing technology compared to HFC heat treatment.*

*Keywords: mining and metallurgical complex, gear, 38Cr2MoAl steel, heat treatment, nitriding.*

МРНТИ 55.57.43

https://doi.org/10.48081/WRCO1955

***А. В. Вавилов[1], Г. А. Гурьянов[2], *Б. А. Молдаханов[3], Е. А. Асангалиев[4], В. С. Яковлев[5]***

[1,2]ТОО «НПО ИННОТЕХ», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]ТОО «ЕВРОПЛЮС ВОСТОК», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[4,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0356-0508
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3657-3735
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2977-693X
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4002-8350
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7315-4719
*e-mail: bek_m78@mail.ru

# *РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СМЕСИТЕЛЯ ИНГРЕДИЕНТОВ КОРМОВЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА*

*Статья посвящена изучению влияния степени перемешивания ингредиентов сыпучей кормовой смеси для их последующего формования и преобразования в кормовые добавки на основе отходов агропромышленных производств в новом комбинированном смесителе, на их однородность, качество смешивания, на равномерность распределения в объеме смеси микрокомпонентов, витаминов, на пригодность смеси к формованию и прессованию. Приведены фрагменты исследования влияния степени перемешивания компонентов смеси на изменение качества кормовых добавок и брикетов-лизунцов. Исследована кинетика процесса смешивания компонентов кормовых добавок и премиксов-лизунцов. Разработана механико-математическая модель перемешивания ингредиентов в смесителе с комбинированным (составным) валом. По результатам экспериментальных исследований даны зависимости формы, содержания и твердости полученных кормовых добавок и премиксов-лизунцов от состава и однородности исходной смеси. Проанализирована возможность сохранения кормовыми добавками и премиксами-лизунцами стойкости к неблагоприятным условиям, влажности и температуре окружающего пространства. Разработана методика подбора рациональной частоты вращения ротора комбинированного смесителя и определено ее влияние на однородность исходной смеси.*

*Приведены результаты экспериментальных исследований опытного образца комбинированного смесителя, подтверждающие полученные теоретические результаты и доказывающие эффективность и целесообразность полного и интенсивного перемешивания компонентов смеси для приготовления кормовых добавок и премиксов-лизунцов для снижения материалоемкости оборудования и общих затрат энергии.*

*Ключевые слова: смеситель, перемешивание материалов, однородность смеси, кормовые добавки, соль поваренная, премиксы, пробиотики, прессование.*

**Введение**

Качество и однородность любой смеси зависит от степени ее перемешивания и от конструкции смесительных машин. Пищевые и кормовые продукты для животных не исключение, так как перемешивания кормовых добавок, фитоингредиентов или соли, например, перед прессованием сыпучей кормовой смеси и ее превращением в гранулы кормовых добавок или в премиксы-лизунцы, оказывают в дальнейшем большое влияние на структуру и сохранность конечного продукта – готовых кормовых добавок. Здесь следует учесть, что долевой и фазовый состав ингредиентов кормовой смеси или премиксов-лизунцов перед смешиванием в смесителе не очень отличается по составу компонентов и их равное распределение по объему готового продукта является довольно-таки сложной задачей. Далее кормовые добавки прессуются, гранулируются или экструдируются в мелкие фракции, до 30 г., а премиксы-лизунцы прессуются в брикеты различной формы и объема весом до 5 кг. При этом кормовые добавки могут содержать соль кормовую, а могут готовиться и без нее. В данной работе рассмотрим, как качество и время перемешивания ингредиентов смеси для приготовления кормовых добавок и премиксов-лизунцов влияет на их пищевую и товарную привлекательность.

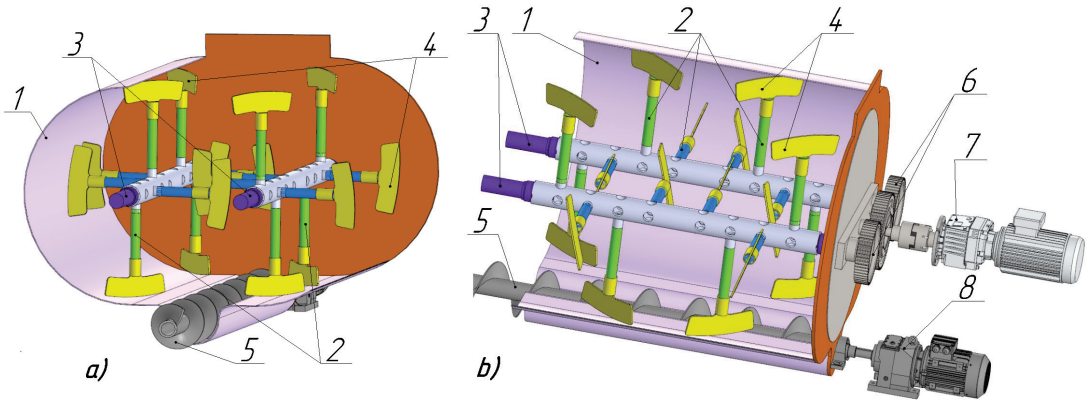
Высокое качество смешивания обеспечивают смесители с горизонтальными валами американского предприятия «Hayes & Stolz», быстро и тщательно перемешивающие компоненты смеси по всему объему смесительной камеры, сохраняя при этом высокую производительность. Горизонтальные смесители «Hayes & Stolz» также потребляют достаточно мало энергии, оставаясь высокопроизводительными, но экономичными аппаратами. Эти требования, малая потребляемая энергия и малое время перемешивания, были заложены еще в концепцию создания данных смесителей. Требования взаимозависимы, а сокращение времени перемешивания сокращает потребление энергии на каждом объеме смеси.

Разгрузка готовой смеси производится в отбрасываемое дно или в боковые двери по желанию заказчика [1]. Интересна конструкция и работа лемехообразного смесителя, выпускаемого на немецком концерне «Lödige», в котором генерируемое встречным вращением лемехов вихревое движение (поток) увлекает за собой компоненты смеси и перемешивает их [2]. По аналогичной схеме работают и смесители, производимые в Швейцарии на предприятии «Bühler», с той лишь разницей, что смесители «Bühler» работают циклически, а разгружаются принудительным пневматическим потоком, но при этом рабочий цикл гарантирует требуемую гомогенность смешанных компонентов в смеси [3]. В английском смесителе с горизонтальными валами «Simon-Barron» смешиваются ингредиенты кормовых брикетов-лизунцов, засыпаемые в бункер после предварительного порционного взвешивания [4].

Хорошо зарекомендовала себя установка смесителя-экструдера по патенту РФ № 2347606, в котором смешиваемые потоки материала двигались навстречу друг-другу, что давало им возможность более полного перемешивания. Однако такое перемешивание требовало громоздкой конструкции с тремя последовательными камерами перемешивания с различными устройствами смешивания в каждой камере и итоговым выходом продукта в виде экструдата. Понятно, что исходные смеси в таком смесителе не смогут быть полностью перемешаны из-за конечного продукта на выходе [5; 6]. Вышеуказанная конструкция смесителя была модернизирована в полезной модели РФ по патенту № 117698 [7].

Корпус смесителя выполнен трехкамерным, имеет загрузочные форсунки и патрубки, через которые засыпаются сыпучие ингредиенты будущей смеси. Последовательное перемешивание компонентов смеси конусообразными лопастями при их вращении производится во всех камерах и дополнительно они смешиваются завихряющими воздушными потоками, возникающими на внешних гранях лопастей [8, с. 20; 11]. Конструкция высокопроизводительна, но сложна в изготовлении, громоздка и перенасыщена собственными деталями.

На рисунке 1 приведена новая конструктивная схема смесителя с двумя смесительными валами и выгрузным шнеком.




a) вид конструкции слева; b) главный вид конструкции; 1 – корпус; 2 – радиальные стержни; 3 – валы; 4 – лопатки мешалок; 5 – шнек для выгрузки готовой смеси; 6 – механизм вращения валов мешалок; 7 – мотор-редуктор привода вращения валов мешалок; 8 – мотор-редуктор привода шнека

Рисунок 1 – Конструктивная схема разрабатываемого смесителя

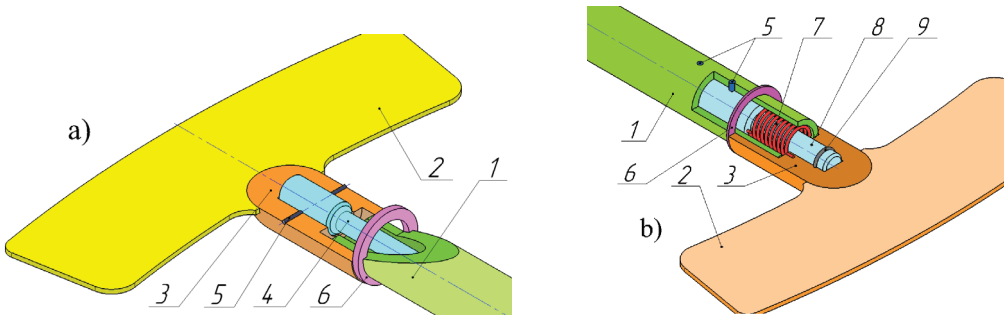
В корпусе 1, овальной формы, в центральной его части расположены два смесительных вала 3. На каждом конце вала установлены зубчатые колеса, которые входят в зацепление с зубчатой шестерней, закрепленной на валу мотор-редуктора 7. При таком приводе 6 вращение с мотор-редуктора передается таким образом, что смесительные валы 3 будут с одинаковой скоростью вращаться в противоположные друг от друга стороны, обеспечивая движение потоков перемешиваемых ингредиентов навстречу друг другу и смешиваемых по принципу перекрестных противопотоков.

На всей длине вала 3 имеются специальные отверстия, служащие для установки в них радиальных стержней 2, на концах которых установлены лопатки мешалок 4 на упругих элементах. Варианты установки мешалок 4 на упругие элементы стержней 2 показано на рисунке 2.

На рисунке 2,а качестве упругого элемента показана установка лопатки 2 мешалки на торсионный вал 4, а на рисунке 2, б – установка лопатки 2 мешалки с помощью пружины 7. Упругие элементы позволяют путем предварительной закрутки установить лопатку 2 мешалки на оптимальный угол атаки вхождения в перемешиваемую кормовую смесь. Положение мешалок после их установки фиксируется.

Упруго-подвижные лопатки мешалки препятствуют образованию застойных зон и за счет конвективного и диффузионного смешивания обеспечивают равномерное распределение компонентов в смеси с снижением сегрегации ингредиентов смеси и повышением ее однородности.

Для выгрузки готовой смеси в нижней части корпуса 1 (см. рисунок 1) установлен шнек 5, привод которого осуществлен с помощью мотор-редуктор привода шнека 8.




a) лопатка мешалки с торсионным валом; b) лопатка мешалки с пружиной;
1 – радиальный стержень; 2 – лопатка; 3 – втулка; 4 – вал торсионный;
5 – штифт; 6 – уплотнитель; 7 – пружина; 8 – палец; 9 – кольцо стопорное

Рисунок 2 – Схема устройства крепления мешалок смесителя

Смеситель работает следующем образом. Перед началом работы в отверстия валов 3 устанавливаются стержни 2 с мешалками 4 таким образом, чтобы при вращении валов стержни с установленными на них мешалками не касались друг друга рабочими поверхностями. Затем поворотом вокруг стержней 2 настраивается окончательное положение мешалок 4, после этого мешалка в этом положении фиксируется.

Данный двух вальный лопастной смеситель реализует процесс перемешивания с механическим псевдоожижением смешиваемых компонентов смеси.

**Материалы и методы**

Исходные ингредиенты в корпус 1 загружаются сверху. Валы 3 при этом уже вращаются, мешалки настроены, а шнек 5 неподвижен или может вращается в противоположную сторону от выгрузки. За счет движения мешалок навстречу друг другу происходит смешивание ингредиентов кормовой смеси на основе отходов производства (далее – кормовые смеси) в середине корпуса, частично разбрасывается в стороны, затем компоненты падают вниз, подхватываются лопаткой мешалок и процесс подачи ингредиентов для смешивания повторяется. После достижения требуемой однородности кормовой смеси начинает вращаться шнек 5 в противоположную сторону и постепенно происходит выгрузка приготовленной кормовой смеси из смесителя.

Проверка качественного состава кормовых смесей характеризуется проверкой содержания необходимых ингредиентов в выборочных гранулах или брикетах из произведенной партии кормовых добавок, в которых оценивается как содержание всех компонентов, так и их количественное отклонение от исходного рецепта. Этой же проверкой оценивается эффективность и равномерность перемешивания компонентов в смесителе.

Допустимое отклонение содержания компонентов в кормовых смесях не может превышать 4,5 % рецептурного значения, иначе вся партия кормовых добавок признается не соответствующей рецепту, а смеситель неэффективным.

Выборочная проверка равномерного распределения смесителем компонентов в произведенной партии кормовых добавок осуществляется стандартным путем отбора точечных проб, комбинированием объединенной пробы и получением из нее действительной опытной пробы путем смешивания, сокращения и деления объединенной пробы [6, с. 16–21].

Возможными вариациями неравномерного перемешивания и распределения компонентов смеси могут быть случайные погрешности методик количественного химического анализа активных ингредиентов перемешиваемой смеси и случайные погрешности оценок масс компонентов из активных веществ при их дозировании в смеситель.

Теоретическая оценка допустимых пределов отклонения равномерного распределения и содержания компонентов в партии кормовых добавок или премиксов-лизунцов от данных их рецепта может быть проведена с использованием известных методов математической статистики и теории вероятностей [9].

Смешивающий эффект смесителя выражает степень его совершенства и показывает какую долю равномерно-однородной смеси способна приготовить машина. Значение смешивающего эффекта можно определить по формуле:

$$E_{ff} = \frac{M_{real}}{M_{fin}} \leq 1 \quad (1)$$

где $M_{real}$ – действительная степень перемешивания смесителя;

$M_{fin}$ – теоретическая конечная степень смешивания.

Для создания лопастных смесителей с механическим псевдоожижением на основе совместного рассмотрения кинематических режимов смешивания с физико-химическими и структурно-механическими характеристиками компонентов смеси необходимо выполнение основного соответствия: гидродинамического режима технологического процесса – кинетике смешивания многокомпонентных смесей.

Исследование кинетики процесса смешивания компонентов премиксов-лизунцов. Определим влияние частоты вращения комбинированных валов смесителя на однородность смеси. Одним из важных факторов, влияющих на интенсивность процесса смешивания, является скорость движения мешалок смесителя. От ее величины зависит интенсивность взаимного перемещения частиц, характер их движения, что в конечном итоге влияет на время, необходимое для равномерного распределения компонентов по всему объему смеси [10].

Для выбора наиболее рационального режима смешивания проведены опыты по изучению влияния длительности смешивания на процесс смесеобразования при различных частотах вращения мешалок смесителя.

Основной компонент (наполнитель) – соль измельченная, индикаторный компонент – металломагнитная примесь. Порядок загрузки в смеситель – сначала основной компонент, затем индикаторный [11].

Изменение неоднородности смеси во времени при различных частотах вращения рабочих органов смесителя представлено на рис. 3,а. Анализ полученных зависимостей показывает, что кинетика процесса имеет неравномерный характер: при всех исследуемых частотах вначале процесс смешивания протекает быстро, затем замедляется и в конце при достижении равновесия работа смесителя не оказывает влияние на распределение контрольных компонентов [9].

В результате проведенных опытов выявлена зависимость, что при увеличении частоты вращения, а, следовательно, и окружной скорости вращения мешалок смесителя в диапазоне от 12 до 13 $с^{-1}$, время смешивания до наступления равновесного состояния смеси, когда процессы смешивания и сегрегации уравнивают друг друга, сокращается. Это объясняется увеличением количества воздействий рабочих органов смесителя (мешалок) на смешиваемые продукты в единицу времени, а, следовательно, более интенсивным движением частиц продукта относительно друг друга и корпуса смесителя [8; 9].

Следует отметить, что изменение окружной скорости мешалок смесителя проводилось с учетом того, чтобы не нарушить состояние механического псевдоожижения смешиваемых сыпучих компонентов, при котором происходит их наиболее равномерное смешивание [12].

Влияние коэффициента заполнения смесительной камеры на однородность смеси. Коэффициент заполнения смесительной камеры (К) представляет собой отношение объема, занятого продуктом, ко всему рабочему объему камеры.

Поскольку степень заполнения смесителя в основном зависит от его конструкции, то необходимо установить ее оптимальное значение для смесителя с новым рабочим органом при смешивании комбикормов и премиксов. В опытах использовали основной компонент (наполнитель) – 1) соль измельченная; 2) отходы

производства маслозавода; 3) индикаторный компонент – металломагнитная примесь. Обработка полученных результатов содержания индикаторного компонента в отобранных пробах позволила установить зависимость неоднородности смеси от степени заполнения смесительной камеры (рис. 3,б). Из графика следует, что для эффективного использования смесителя, его степень заполнения К должна быть в пределах 0,2–0,7 [8; 9].

Влияние соотношения компонентов на качество смеси. Во всех известных работах отмечается степень влияния данного фактора на распределение компонентов, в различных исследованиях представляются по-разному. Комбикорма, кормовые добавки и премиксы представляют собой смеси компонентов, входящих в различных количествах. Чтобы выяснить, как влияет соотношение компонентов на однородность смешивания, были проведены исследования при следующих концентрациях контрольного компонента (натрия хлористого): 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 %. Результаты приведены на рис. 3,с. Такие параметры как крупность, влажность и порядок загрузки приняты постоянными. Полученная зависимость свидетельствует о том, что концентрация компонентов до определенного предела оказывает влияние на качество смеси.

Таким образом, при концентрациях компонента в смеси выше 0,1 % смеси получаются более однородными. А если необходимо однородное распределение в смеси компонента с концентрацией менее 0,1–0,2 % необходимо применять двух- или трехстадийное смешивание [9].

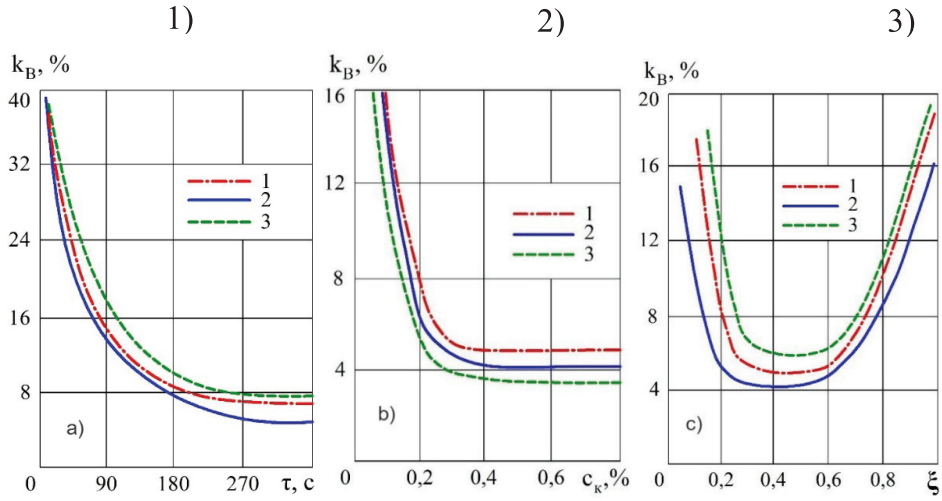



Рисунок 3 – Зависимость коэффициента вариации от: а) времени смешивания при различных значениях окружной скорости; б) от степени заполнения камеры смесителя; с) от концентрации ключевого компонента: 1 – металломагнитная примесь; 2 – соль поваренная NaCl; 3 – марганец сернокислый $MnSO_4$

Влияние влажности компонентов на качество смеси. Влажность оказывает значительное влияние не только на работу смесителя и смешивание компонентов

смеси, но и на физико-механические свойства кормовых добавок и премиксов-лизунцов. Следовательно, содержание влаги будет влиять и на качество смешивания. При установлении зависимости качества смеси от влажности основного компонента в качестве контрольных компонентов использовали марганец сернокислый влажностью 5,28 %, марганец углекислый влажностью 2,82 % и соль поваренную влажностью 0,4 %. Содержание влаги в шроте подсолнечном изменяли от 7,8 % до 27,0 %, что сопровождалось увеличением угла естественного откоса продукта с 33° до 46° и уменьшением насыпной плотности с 550 кг/м$^3$ до 460 кг/м$^3$ (табл. 1) [8; 9].

Таблица 1 – Физико-механические свойства подсолнечного шрота

| Содержание влаги, % | Насыпная плотность, кг/м$^3$ | Угол естественного откоса, ° (градус) |
|---|---|---|
| 7,8 | 550 | 33–34 |
| 10,2 | 520 | 37–38 |
| 14,5 | 490 | 42–43 |
| 20,0 | 460 | 44–45 |
| 27,0 | 460 | 46 |

Для исследования влияния влажности контрольного компонента на однородность смеси использовали марганец сернокислый с влажностью от 2,7 % до 27,9 %.

Зависимость коэффициента вариации от влажности компонентов представлена графически на рис. 4. Исследования показали, что при увеличении влажности основного компонента незначительно улучшается распределение соли поваренной и марганца сернокислого. Обратная зависимость получена для марганца углекислого. Объяснение выявленных зависимостей, по всей вероятности, в том, что при повышении влажности продукта на поверхности частиц появляется плёнка жидкости.

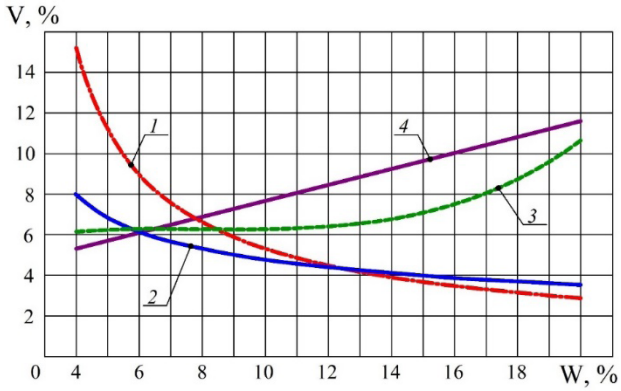



Рисунок 4 – Зависимость коэффициента вариации от влажности основного (1, 2, 3) и влажности контрольного (4) компонентов:
1 – NaCl; 2 – $MnSO_4 \cdot 5H_2O$; 3 – $MnCO_3 \cdot mH_2O$

Последняя является причиной прилипания частиц индикаторов – соли поваренной и марганца сернокислого и, более того, приводит в некоторой степени к растворению мелких пылевидных частиц. Углекислый марганец представляет собой водонерастворимый продукт. При смешивании марганца углекислого с отходами производства, например, шротом повышенной влажности (20–27 %), пленка жидкости не смачивает его, а, наоборот, способствует образованию скоплений частиц, что в конечном итоге ухудшает качество смеси. Исследованиями также установлено, что при увеличении влажности контрольного компонента – марганца сернокислого – распределение его лопастями (мешалками) смесителя ухудшается.

Таким образом, повышение влажности основного компонента оказывает положительное влияние на распределение водорастворимых микрокомпонентов и отрицательное – на распределение водонерастворимых микрокомпонентов.

Нахождение рациональной области изменения параметров смешивания проводилось методами планирования экспериментов. Выбор диапазонов изменения факторов входной информации осуществлялся с помощью центрального ротабельного униформ-планирования, которое позволило в ходе 56 экспериментов в 3-х кратной повторности получить уравнения регрессии, адекватно описывающие реальный процесс смешивания ингредиентов при создании кормовых добавок [9].

В качестве основных факторов, влияющих на эффективность процесса, были выбраны: $X_1$ – содержание в смеси производственных отходов - компонентов хвои пихты сибирской, %; $X_2$ – содержание окиси кальция, %; $X_3$ – частота вращения мешалки, об/мин; $X_4$ – содержание соли в рецепте, %; $X_5$ – время смешивания, мин (таблица 2). Критериями оценки влияния выбранных параметров являлись: $Y_1$ – удельная производительность, кг/кВтч; $Y_2$ – энергозатраты, кВт; $Y_3$ – однородность смешивания, %. Однородность смешивания ингредиентов $Y_3$ определяли по распределению витаминов А, Е, Д, а их содержание контролировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [13].

Таблица 2 – Основные характеристики плана эксперимента

| Условия планирования | Пределы изменения факторов | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ |
| Нулевой уровень (0) | 50 | 15 | 35 | 35 | 10 |
| Интервал варьирования | 10 | 5 | 15 | 15 | 2 |
| Верхний уровень (+1) | 60 | 20 | 50 | 50 | 12 |
| Нижний уровень (-1) | 40 | 10 | 20 | 20 | 8 |
| Верхняя «звездная» точка (+2) | 70 | 25 | 65 | 65 | 14 |
| Нижняя «звездная» точка (-2) | 30 | 5 | 5 | 5 | 6 |

$$Y_1 = 51{,}512 - 6{,}230 \cdot X_1 - 1{,}910 \cdot X_2 + 1{,}790 \cdot X_3 - 1{,}564 \cdot X_4 + 1{,}672 \cdot X_5 + \\ +1{,}063 \cdot X_1X_3 - 0{,}63 \cdot X_2X_4 + 0{,}75 \cdot X_3X_5 - 0{,}81 \cdot X_4X_5 + 1{,}92 \cdot X_4^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 0{,}53 + 0{,}034 \cdot X_1 + 0{,}024 \cdot X_2 + 0{,}023 \cdot X_3 + 0{,}018 \cdot X_4 - 0{,}01 \cdot X_5 - \\ - 0{,}013X_1X_3 - 0{,}012X_1X_4 - 0{,}019 + 0{,}024X_3X_4 - 0{,}022X_1^2 + 0{,}033X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 88{,}979 - 4{,}00 \cdot X_1 + 1{,}11 \cdot X_2 + 1{,}46 \cdot X_3 - 1{,}14 \cdot X_4 + 1{,}29 \cdot X_5 + \\ +0{,}781 \cdot X_1X_2 + 0{,}719 \cdot X_3X_5 + 0{,}718 \cdot X_4X_5 - 0{,}993 \cdot X_1^2 \quad (4)$$

Была сформулирована задача оптимизации: найти такие соотношения компонентного состава массы кормовых добавок и фито-брикетов, которые бы позволили в широком диапазоне изменения входных параметров процесса перемешивания обеспечить максимум удельной производительности и равномерной однородности, минимальный расход энергозатрат при производстве конечной продукции:

$$q = q(Y_1, Y_2, Y_3) \rightarrow opt \qquad \text{при x} \in D$$
$$D{:}Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow max$$
$$Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow min$$
$$Y_3(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \rightarrow max$$

Был достигнут компромисс между входными факторами при выборе рациональной области изменения режимных параметров путем их сканирования методом наложения друг на друга (таблица 3).

Таблица 3 – Наиболее оптимальные интервалы изменения параметров Xi для всех исследуемых выходных параметров

| Y | $X_1$, % | | $X_2$, % | | $X_3$, об/мин | | $X_4$, % | | $X_5$, | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max |
| $Y_1$ | 30 | 60 | 3 | 30 | 60 | 70 | 3 | 30 | 70 | 80 |
| $Y_2$ | 60 | 70 | 20 | 30 | 60 | 70 | 20 | 30 | 40 | 60 |
| $Y_3$ | 30 | 50 | 20 | 30 | 50 | 70 | 3 | 15 | 60 | 70 |

В результате были получены рациональные значения интервалов входных параметров: $X_1$=40–47 %; $X_2$=9,5–19 %; $X_3$=50–60 об/мин; $X_4$=9,5–19 %; $X_5$= 65–70 °С.

Полученные результаты попадают в рассчитанные доверительные интервалы по всем критериям. При этом среднеквадратическая ошибка не превышала 12 %.

**Результаты и обсуждение**

Для достижения оптимального роста животных, воспроизводства или лактации необходимо, чтобы питательные вещества были равномерно распределены в корме, ингредиенты которого перемешиваются и смешиваются в комбинированном смесителе [11, с. 598–608]. Однако фактически данных, подтверждающих это мнение, очень мало. Как отмечалось ранее, при перемешивании компонентов в смесителе одновременно с процессом смешивания идет процесс разделения готовой смеси, а поэтому повышения эффективности процесса можно достичь, снижая процесс разделения компонентов.

Для исследования по методике О. А. Апалихиной выполнены следующие опыты. Для проверки работы смесителя с высоковязкими материалами проверим его на смешивании компонентов кормовых добавок и фито-соле-брикетов и добавим в качестве одного из компонентов измельченную мелассу, а в качестве

основного компонента (наполнителя), используем ячмень измельченный. Контрольные компоненты – марганец сернокислый и соль поваренную смешивали с основным компонентом, содержание мелассы в котором изменялось от 15 до 47 %.

В результате работы комбинированного смесителя с составным валом выявлена обратно пропорциональная зависимость коэффициента неоднородности смеси от содержания мелассы в основном компоненте (рис. 5).

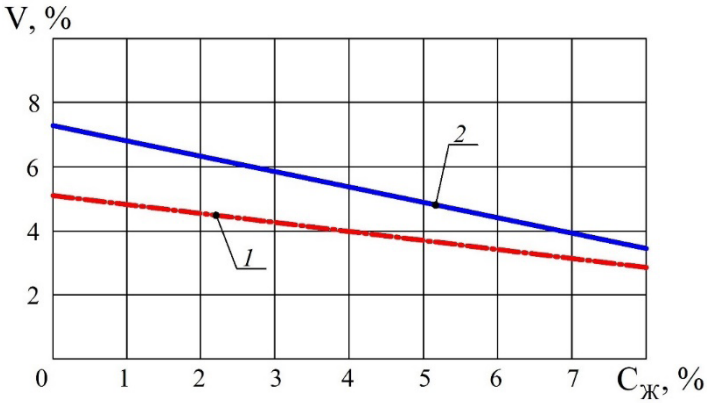



Рисунок 5 – Зависимость коэффициента вариации индикаторов (1) NaCl; 2) $MnSO_4 \cdot 5H_2O$) от содержания мелассы в основном компоненте

Анализ полученных результатов показывает, что наличие смоляного жира, например, из хвои пихты сибирской или мелассы, улучшает распределение контрольных компонентов. Наличие жира в основном компоненте снижает интенсивность процесса разделения вследствие прилипания частиц [6]. Таким образом, содержание мелассы благоприятно влияет на распределение контрольных компонентов.

Влияние природы основного компонента на равномерность распределения в нем микрокомпонентов после их перемешивания в смесителе. Проверим работу смесителя с комбинированным рабочим органом еще раз на смешивании компонентов кормовых добавок и премиксов. В качестве объекта исследований использовали следующие макрокомпоненты: отруби пшеничные, мясокостную и рыбную муку, дрожжи кормовые, измельчённый горох и ячмень, шрот подсолнечный, сухое молоко, мел.

Крупность частиц компонентов соответствовала проходу через сито диаметром отверстий 1,5 мм. Влажность и гранулометрический состав продуктов представлены в табл. 2 Контрольным компонентом был марганец сернокислый ($MnSO_4 \cdot 5H_2O$).

Полученные результаты смешивания показаны на рис. 6, и для сравнения приведены результаты для спирального противоточного смесителя.

Таблица 2 – Гранулометрический состав компонентов кормовых добавок и фито-брикетов (лизунцов)

| Наименование продуктов | Влаж-ность, % | Остаток на ситах, % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1,00 | 0,63 | 0,50 | 0,40 | 0,20 | дно |
| Отруби пшеничные | 9,3 | 19,0 | 15,0 | 14,5 | 20,5 | 24,5 | 6,5 |
| Мясокостная мука | 4,5 | 1,0 | 12,0 | 8,0 | 10,5 | 28,5 | 40,0 |
| Мел | 0,4 | 2,0 | 22,0 | 28,0 | 20,5 | 7,0 | 20,5 |
| Дрожжи кормовые | 7,4 | 0,5 | 8,0 | 7,5 | 9,0 | 34,5 | 40,5 |
| Измельченный горох | 10,0 | 5,0 | 41,5 | 12,0 | 11,5 | 17,0 | 13,0 |
| Шрот подсолнечный | 7,8 | 4,5 | 48,0 | 14,0 | 12,0 | 16,5 | 5,0 |
| Рыбная мука | 7,0 | 1,0 | 10,0 | 6,5 | 15,0 | 36,5 | 31,0 |
| Сухое молоко | 8,3 | 0,5 | 9,0 | 7,0 | 9,5 | 34,0 | 40,0 |
| Измельченный ячмень | 10,1 | - | - | - | - | - | - |

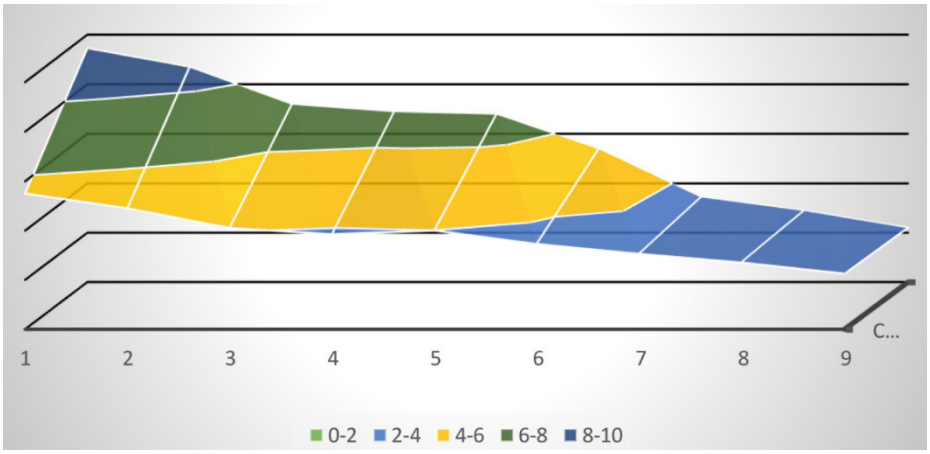



Рисунок 6 – Коэффициенты неоднородности распределения $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ при смешивании различных компонентов: 1 – отруби пшеничные; 2 – мясокостная мука; 3 – мел; 4 – дрожжи; 5 – измельченный горох; 6 – шрот подсолнечный; 7 – рыбная мука; 8 – сухое молоко; 9 – ячмень измельченный

Анализ результатов показывает, что в комбинированном смесителе с составным валом и новым рабочим органом (независимыми мешалками) влияние природы основного компонента на равномерность распределения в нем микрокомпонентов значительно меньше, чем в спиральном противоточном смесителе, а причиной этому является прогрессивный метод смешивания в состоянии «механической невесомости» или в «кипящем» слое [13, с. 598–608].

Предложенный метод позволяет смешивать компоненты с сильно различающейся насыпной плотностью и другими физико-механическими свойствами перемешиваемых продуктов.

Результаты изучения неизменности механики операции перемешивания в области рациональных значений программных параметров добавляют возможности моделирования метода перемешивания на основе системы принципов, предложенной профессором Е. А. Асангалиевым [11, с. 598–608].

**Информация о финансировании**

Исследования, связанные с данной работой, финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК (грант AP23485224 – Разработка нового энергоэффективного оборудования по производству инновационных кормовых добавок для животноводства, с использованием промышленных отходов).

**Выводы**

1 Разработанная конструкция комбинированного смесителя, оснащенного составным валом и вращающимися независимыми мешалками показала высокую эффективность перемешивания компонентов смеси, а работа его независимых мешалок не оказала вредного воздействия на целостность и сохранность качества смешиваемых компонентов;

2 При исследовании кинетики смешивания компонентов смеси для выработки кормовых добавок и премиксов определен наиболее рациональный режим варьирования параметров смешивания компонентов смеси, в дальнейшем способствующих выработке качественных прессованных кормовых добавок: протяженность смешивания 65–70 с; частота вращения валов с мешалками 12,0–13,0 $с^{-1}$; концентрация контрольного ингредиента в лизунце – не менее 0,2 %; коэффициент заполнения смесительной камеры 0,5–0,7; коэффициент вариации контрольного ингредиента в лизунце 4,4–4,9 %.

3 Качество полученных кормовых добавок и брикетированных премиксов было проверено на зависимость от перемешивания компонентов, их размеров и влажности, от влажности самих кормовых добавок, от пластичности компонентов. Было проверено наличие биологически активных веществ до прессования, после прессования и по истечении контрольного времени хранения, 10 и 14 месяцев. Рациональным признан срок, не превышающий 10 месяцев.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Hayes & Stolz. Double Ribbon Mixer Demonstration. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=MRrfSZXdOoc (Дата обращения: 29.04.2025).

2 Lödige. Ringlayer mixer corimix for continuous operation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.loedige.de/en/machines/ringlayer-mixer-corimix-for-continuous-operation (Дата обращения: 29.04.2025).

3 Solutions for premixes and concentrates [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dam.buhlergroup.com/asset/f458cf6f578042cba9f2df3f0e10e548/Brochure_VN_Feed_ru.pdf (Дата обращения: 29.04.2025).

4 120L Simon Barron Conditioning Mixer M/S [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rigal-bennett.com/Industry/Cosmetic/GetStockItem/11734 (Дата обращения: 29.04.2025).

5 Смеситель-экструдер: пат. 2347606 Рос. Федерация: МПК7 B01F 7/02 / Шевцов А. А., Лыткина Л. И., Чайкин И. Б., Острикова Е. А.; заявитель и

патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2007146093/15; заявл. 11.12.2007; опубл. 27.02.2009, Бюл. № 6.

6 **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. – 2016. – № 2. – P. 16–21.

7 Смеситель с Z-образным органом: пат. 117698 Рос. Федерация: МПК7 B01F 7/02 / Апалихина О. А., Переверзева С. А. и др.; ВГУИТ. – Бюл. № 17, 2016.

8 **Апалихина, О. А.** Разработка и научное обеспечение энергоэффективного способа производства брикетов-лизунцов для подкормки крупного рогатого скота: дис. … канд. техн. наук: 05.18.12. – Воронеж: ВГУИТ, 2017. – 149 с.

9 **Кафаров, В. В.** Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение: монография / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов; под ред. Н. М. Жаворонкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во Юрайт, 2023. – 440 с.

10 **Ганин, Е. В.** Совершенствование процессов измельчения и смешивания для получения однородных комбикормов требуемого гранулометрического состава: дис. … канд. техн. наук. – М., 2005. – 182 с.

11 **Asangaliev, Y., Kim, V., Kim, A., Doudkin, M., Guriyanov, G.** Improvement of Technology, Machines, and Recipes for the Production of Compound Feed and Feed Additives for Farm Animals // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15. – № 11. – P. 598–608.

12 **Лыткина, Л. И., Шенцова, Е. С., Переверзева, С. А., Михайлов, А. Г.** Новая технология производства брикетированной кормовой добавки // Вестник ВГУИТ = Proceedings of VSUET. – 2019. – Т. 81. – № 2. – С. 191–195.

13 **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. – Vol. 31. – № 1. – P. 81–90. – http://doi.org/10.30657/pea.2025.31.8

REFERENCES

1 Hayes & Stolz. Double Ribbon Mixer Demonstration. – [Electronic resource]. – Available at: https://www.youtube.com/watch?v=MRrfSZXdOoc (Accessed: 29.04.2025).

2 Lödige. Ringlayer mixer corimix for continuous operation. – [Electronic resource]. – Available at: https://www.loedige.de/en/machines/ringlayer-mixer-corimix-for-continuous-operation (Accessed: 29.04.2025).

3 Solutions for premixes and concentrates [Electronic resource]. – Available at: https://dam.buhlergroup.com/asset/f458cf6f578042cba9f2df3f0e10e548/Brochure_VN_Feed_ru.pdf (Accessed: 29.04.2025).

4 120L Simon Barron Conditioning Mixer M/S. – [Electronic resource]. – Available at: https://www.rigal-bennett.com/Industry/Cosmetic/GetStockItem/11734 (Accessed: 29.04.2025).

5 Smesitel'-ekstruder [Extruder-mixer]: pat. 2347606 Ros. Federaciya: MPK7 V01F 7/02 / SHevcov A. A., Lytkina L. I., CHajkin I. B., Ostrikova E. A.; zayavitel' i patentoobladatel' Voronezh. gos. tekhnol. akad. – № 2007146093/15; zayavl. 11.12.2007; opubl. 27.02.2009, Byul. № 6.

6 **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 [The probabilistic model of the process of mixing animal feed ingredients into a continuous mixer-reactor] // Proceedings of VSUET. – 2016. – № 2. – P. 16–21.

7 Smesitel' s Z-obraznym organom [Mixer with a Z-shaped element]: pat. 117698 Ros. Federaciya: MPK7 V01F 7/02 / Apalihina O. A., Pereverzeva S. A. i dr.; VGUIT. – Byul. № 17, 2016.

8 **Apalihina, O. A.** Razrabotka i nauchnoe obespechenie energoeffektivnogo sposoba proizvodstva briketov-lizuncov dlya podkormki krupnogo rogatogo skota [Development and scientific substantiation of an energy-efficient method for the production of lick-blocks for cattle feeding]: dis. … kand. tekhn. nauk: 05.18.12. – Voronezh: VGUIT, 2017. – 149 p.

9 **Kafarov, V. V.** Sistemnyj analiz processov himicheskoj tekhnologii: izmel'chenie i smeshenie: monografiya [System analysis of chemical technology processes: grinding and mixing: monograph] / V. V. Kafarov, I. N. Dorohov, S. Yu. Arutyunov; pod red. N. M. ZHavoronkova. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moscow : Izd-vo YUrajt, 2023. – 440 p.

10 **Ganin, E. V.** Sovershenstvovanie processov izmel'cheniya i smeshivaniya dlya polucheniya odnorodnyh kombikormov trebuemogo granulometricheskogo sostava [Improvement of grinding and mixing processes for obtaining homogeneous compound feeds of the required granulometric composition]: dis. … kand. tekhn. nauk. – Moscow : 2005. – 182 p.

11 **Asangaliev, Y., Kim, V., Kim, A., Doudkin, M., Guriyanov, G.** Improvement of Technology, Machines, and Recipes for the Production of Compound Feed and Feed Additives for Farm Animals [Improvement of technology, machines, and recipes for the production of compound feed and feed additives for farm animals] // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15. – № 11. – P. 598–608.

12 **Lytkina, L. I., Shencova, E. S., Pereverzeva, S. A., Mihajlov, A. G.** Novaya tekhnologiya proizvodstva briketirovannoj kormovoj dobavki [A new technology for the production of briquetted feed supplement] // Vestnik VGUIT = Proceedings of VSUET. – 2019. – Vol. 81. – № 2. – P. 191–195.

13 **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 [Analysis of experimental studies on the efficiency of a new mixer for molding mixture components for the production of premix lick blocks and the

final product effect] // Production Engineering Archives. – 2025. – Vol. 31. – № 1. – P. 81–90. – http://doi.org/10.30657/pea.2025.31.8.

Поступило в редакцию 21.08.25.
Поступило с исправлениями 21.08.25.
Принято в печать 22.08.25.

***А. В. Вавилов[1], Г. А. Гурьянов[2], *Б. А. Молдаханов[3], Е. А. Асангалиев[4], В. С. Яковлев[5]***
[1,2]«NPO INNOTECH» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]ТОО «ЕВРОПЛЮС ВОСТОК», Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[4,5]Д. Серікбаева атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
21.08.25 ж. баспаға түсті.
21.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
22.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ӨНДІРІС ҚАЛДЫҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ ЖЕМДІК ҚОСПАЛАР ИНГРЕДИЕНТТЕРІН АРАЛАСТЫРҒЫШТЫҢ КОНСТРУКЦИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

*Мақала сусымалы жем қоспасының ингредиенттерінің араласу дәрежесінің жаңа құрамдастырылған араластырғышта агроөнеркәсіптік өндіріс қалдықтары негізінде оларды кейіннен түзу және жем қоспаларына айналдыру, олардың біртектілігіне, араластыру сапасына, қоспаның көлемі бойынша таралу біркелкілігіне, микрокомпоненттердің қоспаның түзілу қабілетіне, престеуге жарамдылығына әсерін зерттеуге арналған. Әртүрлі жағдайларда сақтау кезінде қоспаның құрамдас бөліктерінің араласу дәрежесінің жемдік қоспалар мен жалап брикеттерінің сапасының өзгеруіне әсерін зерттеудің фрагменттері келтірілген. Азық қоспалары мен премикс ликтерінің компоненттерін араластыру процесінің кинетикасы зерттелді. Комбинирленген (композициялық) білікті араластырғышта ингредиенттерді араластырудың механикалық-математикалық моделі әзірленді. Тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері бойынша алынған азықтық қоспалар мен лик премикстерінің пішіні, мазмұны және қаттылығының бастапқы қоспаның құрамы мен біртектілігіне тәуелділігі келтірілген. Қолайсыз жағдайларға, ылғалдылыққа және қоршаған орта температурасына жемдік қоспалар мен премикс лайктары арқылы төзімділікті сақтау мүмкіндігі талданды. Аралас араластырғыш роторының рационалды айналу жиілігін таңдау әдісі әзірленді және оның бастапқы қоспаның біртектілігіне әсері анықталды. Алынған теориялық нәтижелерді растайтын және жабдықтың материалды тұтынуын және жалпы энергия шығындарын азайту үшін қоспаның құрамдас бөліктерін жемдік қоспалар мен премикс лайктарын дайындау үшін толық және қарқынды араластырудың тиімділігі мен орындылығын дәлелдейтін*

*біріктірілген араластырғыштың тәжірибелік үлгісін тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері ұсынылған.*

*Кілтті сөздер: араластырғыш, материалдарды араластыру, қоспаның біртектілігі, жемдік қоспалар, ас тұзы, премикстер, пробиотиктер, престеу.*

***A. V. Vavilov[1], G. A. Guryanov[2], *B. A. Moldakhanov[3],***
***E. A. Asangaliev[4], V. S. Yakovlev[5]***
[1,2]LLP «NPO INNOTEKH», Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]LLP «EUROPLYUS VOSTOK», Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[4,5]East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 21.08.25.
Received in revised form 21.08.25.
Accepted for publication 22.08.25.

## DEVELOPMENT DESIGN MIXER OF FEED ADDITIVE INGREDIENTS FROM PRODUCTION WASTE

*The article is devoted to the study of the influence of the degree of mixing of ingredients of a bulk feed mixture for their subsequent formation and transformation into feed additives based on waste from agro-industrial production in a new combined mixer, on their homogeneity, mixing quality, on the uniformity of distribution in the volume of the mixture of microcomponents, vitamins, on the suitability of the mixture for formation and pressing.*

*The article presents fragments of the study of the influence of the degree of mixing of the components of the mixture on the change in the quality of feed additives and lick briquettes during their storage under various conditions. The kinetics of the process of mixing the components of feed additives and lick premixes is studied. A mechanical and mathematical model of mixing the ingredients in a mixer with a combined (composite) shaft is developed. Based on the results of experimental studies, the dependences of the form, content and hardness of the obtained feed additives and lick premixes on the composition and homogeneity of the original mixture are given. The possibility of maintaining the resistance of feed additives and lick premixes to adverse conditions, humidity and temperature of the surrounding space is analyzed. A method for selecting a rational rotation frequency of the rotor of a combined mixer has been developed and its influence on the homogeneity of the initial mixture has been determined. The results of experimental studies of a prototype of a combined mixer are presented, confirming the theoretical results obtained and proving the effectiveness and feasibility of complete and intensive mixing of the components of the mixture for the preparation of feed additives and premix licks to reduce the material consumption of the equipment and overall energy costs.*

*Keywords: mixer, mixing of materials, homogeneity of the mixture, feed additives, table salt, premixes, probiotics, pressing.*

МРНТИ 55.22.29

https://doi.org/10.48081/MMTM6428

***А. А. Генбач[1], *Д. Ю. Бондарцев[2]***

[1,2]Алматинский университет энергетики и связи
имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3819-4387
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-7851
*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

# *ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ*

*Исследованы процессы теплообмена в капиллярно-пористых природных покрытиях, создаваемых термическим напылением порошков при их нанесении термоинструментом. Создана горелка с детонационной струей и разработана технология получения порошков в замкнутом объёме. Горелка за счет встроенного автоматического устройства позволяет управлять режимом создания покрытий, изменяя мощность горелки и длину факела. Разработана вытеснительная схема питания, охлаждения и методика проведения. Горючее дожигалось на покрытии с коэффициентом избытка окислителя 0.6÷0.8. Даны расчетные формулы для обработки порошковых материалов. Представлены результаты ситового анализа. Поперечная скорость участка воспламенения спинового детонационного факела близка к скорости детонации и вдвое превышала скорость звука в струе. Она определялась из наклона к образующей спирального следа. Предельная область тепловых нагрузок для покрытий превосходила кипение в тонких пленках, в большом объёме и тепловых трубах. Исследования с помощью голографической интерферометрии показало, что остаточная деформация, не исчезает при снятии тепловой нагрузки. Обнаружена нелинейная кривая перемещения частиц. Детонационное напыление снижает разрушение частиц порошка по границам раздела нерасплавленных частиц, так как анизотропность повышает роль капиллярных сил.*

*Ключевые слова: природные материалы, покрытия, термоинструмент, напыление, теплообмен, деформация.*

**Введение**

В теплоэнергетических установках важное значение приобретает система охлаждения различных ограждающих конструкций [1], таких как камеры сгорания [2] и двигатели [3], сопловые аппараты турбин [4], инструменты в виде ракетных горелок для нанесения покрытий. Во всех перечисленных конструкциях используется теплообмен.

Весьма актуально проводить научные исследования теплообмена в капиллярно-пористых природных материалах. В качестве таких материалов

выбираются горные породы: туфы, мраморы, кварциты, граниты и тешениты. Из них изготавливаются порошки и наносятся напылением на подложку. На основе физической модели в реальной капиллярно-пористой структуре записываются уравнения теплопроводности термоупругой задачи. Решение проводится для предельных величин тепловых потоков плавления $q_{пл}$, сжатия $q_{сж}$ и растяжения $q_{раст}$, вызывающих соответствующие термические напряжения σ. Модель проверяется экспериментом с использованием скоростной киносъёмки образующихся частиц [5].

Авторами [6] проводится разработка метода диагностики переходных режимов кипения на основе флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности $T_{ст}$ с помощи дискретного вейвлет – преобразования взамен традиционнном преобразованию Фурье для получения амплитудно-частотных характеристик флуктуаций температуры и диагностирования смены режима теплообмена.

Для настоящего исследования представляет интересс взаимосвязь предельного состояния капиллярно-пористого покрытия и кризиса теплообмена в капиллярно-пористой структуре при смене режима теплообмена, что позволит в режиме реального времени создавать систему диагностики покрытий и структур (φ', φ'кр).

В работе [7] числено исследовано турбулентное пламя сгорания газа и воздуха. Горелка частично заполнена пористым материалом. Пламя становится короче и более широким при определенном значении пористости. При большей толщине пористого слоя δ температура распределяется в большем объёме при меньшей длине пламени. Однако в [7] не ясно размещение и вид пористого материала, в работе не приводится эксперимент.

В работе [8] разработана пористая решетчатая структура, работающая при соударении струи. Высота h структуры $(4\div12)\times10^{-3}$ м, пористость ε (0.52÷0.92) и скорость струи V (1÷4) м/с. Теплообмен возрастал с уменьшением пористости, и имел оптимум при высоте решетки $6\times10^{-3}$ м. Теплообмен на 35 % больше, чем у ребристой структуры, и улучшался за счет интеграции структуры и воздействия струи. Исследование [8] трудно применить для процесса нанесения напылением покрытия.

В данной статье предлагается создать технологию нанесения напылением порошков природных материалов (факелы, дробление материалов) и изучить механизм разрушения.

**Материалы и методы**

Термоинструмент для нанесения напыления покрытий представляет из себя горелку ракетного типа (см. рис. 1), за счет автоматического устройства имеется возможность управлять режимами создания покрытий, изменяя мощность горелки и длину факела L. Контролируется качество покрытия и экономится расход горючего и окислителя. Вязкие и высокопористые материалы (например туф) напылялись с оплавлением покрытия. Схема горелки (термоинструмента) представлена в работе [1].

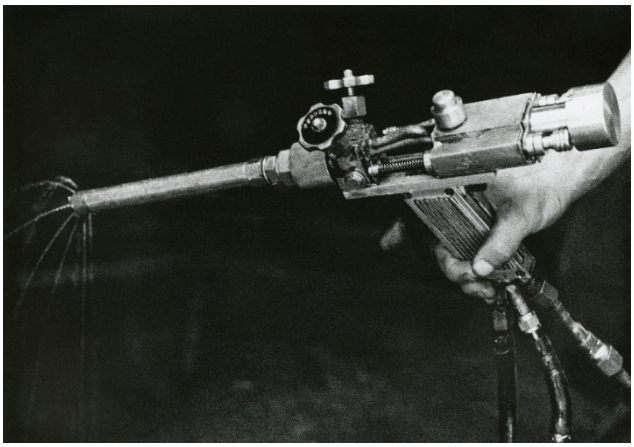


Рисунок 1 – Термоинструмент с встроенным автоматическим устройством

Эксперимент с ракетными горелками (термоинструментом) проводился по вытеснительной либо по насосной схеме.

Рассмотрим экспериментальный стенд для питания горелки по вытеснительной схеме (вода из баллона вытеснялась воздухом), см. рис. 2: 1 – вентиль воздушного баллона, 2 – манометр высокого давления, 3 – редуктор с предохранительным клапаном, 4 – манометр низкого давления, 5 – вентиль со сбросом, 6 – запорный вентиль, 7 – накидная гайка, 8 – фильтр отстойник, 9 – кран, 10 – редуктор с предохранительным клапаном, 11 – манометр низкого давления, 12 – вентиль со сбросом, 13 – запорный вентиль, 14 – накидная гайка, 15 – фильтр отстойник, 16 – вентиль, 17 – фильтр, 18 – командный редуктор, 19 – обратный клапан, 20 – фильтр, 21 – дроссель, 22 – обратный клапан, 23 – запорный клапан, 24 – запорный вентиль, 25 – редуктор, 26 – командный редуктор, 27 – обратный клапан, 28 – фильтр, 29 – дроссель, 30 – обратный клапан. Горючее – керосин. Окислитель – кислород. Система охлаждения – вода, пористые покрытия. Также применялась насосная система (вода и горючее из баков нагнетались насосом). Порошки из природного материала (кварциты, граниты, тешениты, мраморы, туфы) приготавливались после обработки массива горелкой ракетного типа [1].

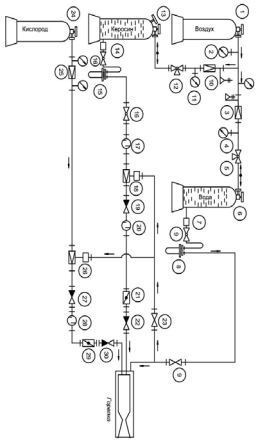



Рисунок 2 – Вытеснительная схема питания и охлаждения термоинструмента, установленного на экспериментальном стенде

Другой способ получения порошков заключался в приготовлении специальных форм из необходимого материала и их взрывания, что позволяло применять упрочняющие технологии для создания покрытий. С этой целью производились исследования моделей из песчано-цементной смеси, представляющих собой замкнутый объём, ограниченный в одном случае системой сопряженных эллиптических поверхностей, в фокусах которых расположены шпуры (модель № 1), в другом случае ограниченный прямолинейными свободными поверхностями (модель № 2) см. рис. 3.

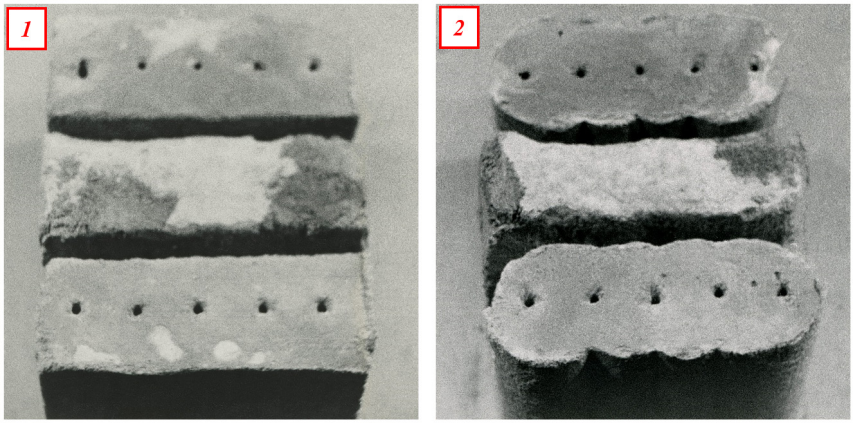



Рисунок 3 – Общий вид моделей:
1 – модель с эллиптическими свободными поверхностями;
2 – модель с прямолинейными свободными поверхностями

Модель № 1, изображенная на рис. 3 состояла из четырех сопряженных эллиптических цилиндров с эксцентриситетом 0.47, в фокусах которых располагались шпуры диаметром $d_ш$ $5\times10^{-3}$ м глубиной h $50\times10^{-3}$ м.

Размер среднего куска рассчитывался по формуле

$$d_{ср} = \frac{\sum_1^n d_i \times w_i}{\sum w_i},$$

где $d_i$ – средний размер $i$ – ой фракции, мм; $w_i$ – выход $_i$ – ой фракции, %. Величина суммарной вновь образованной поверхности:

$$S_н = \frac{6}{\gamma}\sum_1^n \frac{P_i}{d_i} - S_0,$$

где $n$ – число фракций; $P_i$ – вес каждой фракции, $г$; – удельный вес материала, г/см$^3$; $S_0$ – первоначальная поверхность модели, см$^2$.

На рисунке 4 представлено распределение по фракциям гранулометрического состава. Фракции, расположенные: 1 – для модели с эллиптической свободной поверхностью, фракции 2 – для модели с прямолинейной свободной поверхностью.

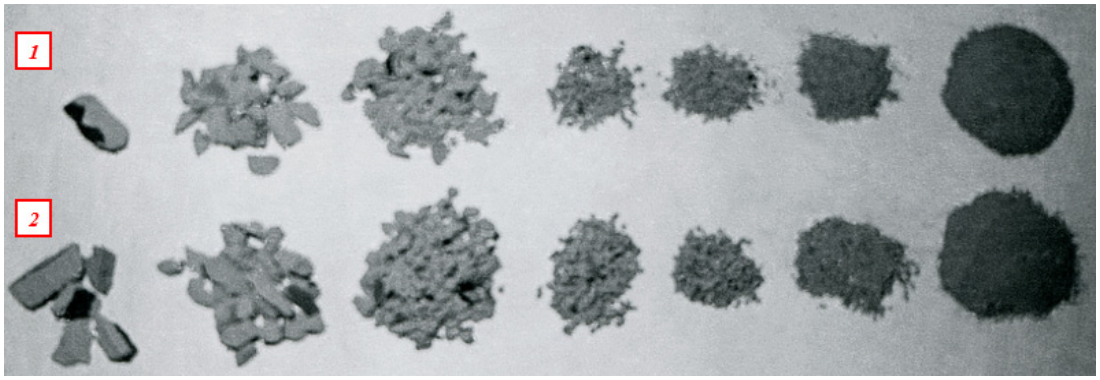



Рисунок 4 – Общий вид распределения по фракциям
массы моделей № 1 и № 2

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показывают, что для модели №1 (см. рис. 3) выход отдельных классов от 0 до $2\times10^{-3}$ м составил 12.5 %, а для модели № 2 – 8.6 %. Кроме того, возрастает степень упрочнения частиц порошка. Для напыления порошка частицы отбирались по крупности: $0.1\times10^{-3}$ м – 3.1 %; $0.25\times10^{-3}$ м – 4.2 %; $0.5\times10^{-3}$ м – 7.3 %.

Упрочняющая технология производства порошков получается за счет разрушения энергии взрыва в фокусе эллиптического цилиндра на энергию сжатых газов и энергию волны. Происходит синергический эффект суммирования этих энергий в каждом из фокусов цилиндра. Термические напряжения сжатия частиц порошка возрастали до двух раз [1].

**Результаты и обсуждение**

Использованы детонационные высокотемпературные пульсирующие двухфазные факелы керосино-кислородного термоинструмента, позволяющие дожигать горючее на поверхности покрытия с $\alpha = 0.6 \div 0.8$. Это позволяет существенно увеличить удельные тепловые потоки q при небольшом перегреве $\Delta T$ покрытия, которые могут быть до шести раз выше по сравнению с обычным процессом сжигания. Максимальные q на покрытии достигали величины $(2 \div 15) \times 10^6$ Вт/м$^2$ (см. рис. 5). На рис. 5 приняты обозначения: 1 – ствол горелки; 2 – выброс струй воды; 3 – вздутие струи, 4 – диаметр критического сечения сопла, $d_к$, м; 5 – диаметр струи на срезе сопла, $d_a = 2r_a$, м.

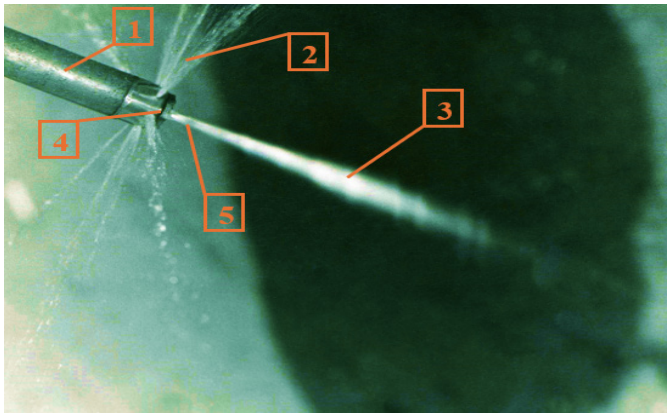



Рисунок 5 – Структурная спиновая детонация факела
с вздутием струи на конечном участке

Граниты, кварциты и тешениты напылялись без оплавления. За счет системы управления термоинструментом регулировалась длина L детонационной струи, истекающей из сопла (см. рис. 6). Частота колебаний давления на покрытии составляла около 200 Гц, процесс напыления протекал стабильно. Температура струи находилась в пределах (3000÷850) °С, радиус струи $r_a = 3 \times 10^{-3}$ м, rc = $10 \times 10^{-3}$ м. Зависимость предельных тепловых потоков q, вызывающих напряжения σ сжатия, растяжения и оплавления различных природных материалов, представлены в работах [1]. Определены различные толщины отрывающихся частиц (шелушек) покрытий в зависимости от времени τ подачи теплового потока. Экспериментальное подтверждение проведено за счет скоростной киносъёмки СКС-1М, когда определялось время процесса τ и размер оторвавшейся частицы δ. На рис. 6 приняты обозначения: 1 – ствол горелки; 2 – диаметр критического сечения сопла, $d_{к,}$ 3 – выброс струй воды. Струя истекала с высоким уровнем шума и резкими звуковыми колебаниями. Охлаждающаяся вода струйками отводится из калибратора термоинструмента с целью обеспечения технологии напыления.

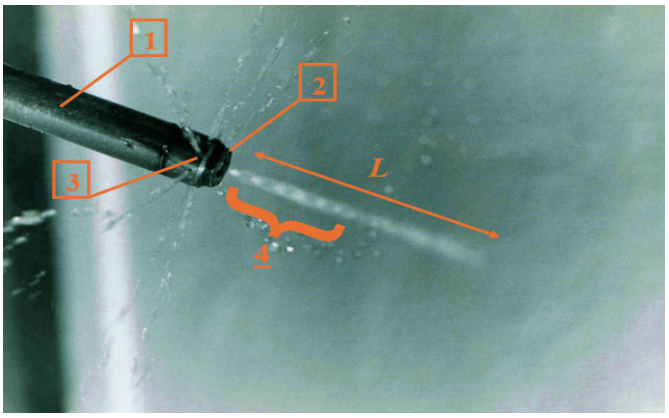



Рисунок 6 – Зарегистрирована структурная спиновая детонация факела (восемь участков) 4.

Поперечная скорость участка воспламенения спинового детонационного факела (см. рис. 5–6) определяется из наклона к образующей спирального следа. Поскольку угол наклона близок к 45 градусам, то поперечная скорость вдвое превышает скорость звука в газовой струе. На рис. 6 эта волна сделала восемь полных оборотов. Процесс дожигания горючего (керосина) протекает устойчиво на покрытии, непрерывно и наблюдается за ударной волной, а периодичность воспламенения связана с отрывом горения газа от фронта ударной волны.

В целом, стабилизация горения пульсирующих волн имеет место за счет торможения газа на капиллярно-пористом покрытии в виде сверхзвукового потока смеси, аналогично процессам в ударных трубах.

Из исследованных горных пород гранит имеет низкое значение $\lambda = (2.2 \div 4.1)$ Вт/(м×К), а значение $\alpha = (0.6 \div 0.9)\times10^{-5}$ $К^{-1}$. Если будут иметь иные случаи, то можно воспользоваться быстрым охлаждением покрытия, которое быстро будут затвердевать с получением реакционно-отверждаемых покрытий.

Предельная область работы тепловых нагрузок для капиллярно-пористых покрытий из естественных (природных) материалов, не имеющих оплавления поверхности, для поддерживаемого перегрева покрытия $\Delta T = T_{ст} - T_{н} = (20 \div 75)$ К, дает следующие величины: для тешенитных покрытий – $(2.2 \div 4)\times10^{6}$ Вт/м$^2$; для гранитных покрытий – $(4 \div 6.2)\times10^{6}$ Вт/м$^2$; для кварцевых покрытий – $(6.2 \div 15)\times10^{6}$ Вт/м$^2$. Полученные области q значительно превосходят такие высокофорсированные системы, как кипение в тонких пленках [9] и в большом объёме [10], кипение в сетчатых фитилях тепловых труб [11].

На рис. 7 представлены фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из тешенита. Пористость образца – 7%. Объёмный тепловой источник вплоть до разрушения образца. Нагружение образца на верхней грани.

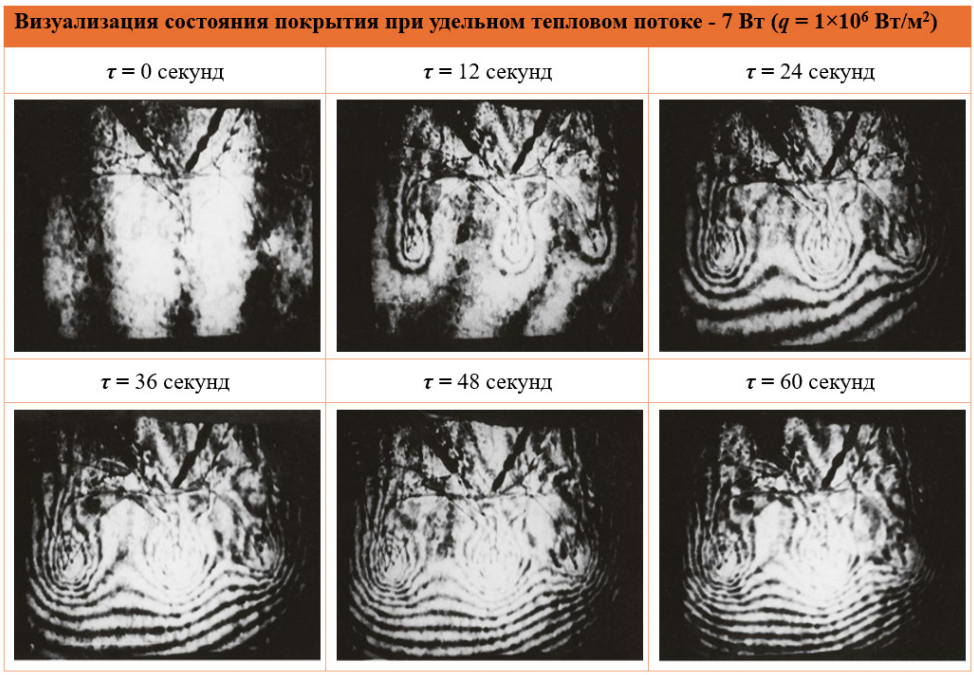



Рисунок 7 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из тешенита

Оценка действия напряжений покрытий уменьшает вероятность возникновения трещин при создании устройств и позволяет управлять развитием опасных трещин. Покрытие с тремя тепловыми источниками представляет собой экран, который поглощает ударные и детонационные волны факела термоинструмента.

Исследования современных технологий поверхностей и покрытий обычно рассматривают целостность термически напыленных покрытий металлов и сплавов на основе воздействия напряжений растяжения и деформаций. Однако для предельного состояния природных покрытий из минеральных сред (тешенит, см. рис. 7) при определенных размерах δ частиц и времени подачи удельного теплового потока решающую роль в разрушении покрытия имеют напряжения сжатия [1].

Более того, различные методы термического напыления (атмосферно-плазменный процесс; высокоскоростной кислородо-топливный, высокоскоростной воздушно-топливный дают различную микроструктуру и отношение напряжения сжатия, растяжения и сдвига к деформации.

Это связано с прочностью сцепления между частицами минеральной среды, т.к. полностью или частично расплавление частицы порошка металлов ударяются и затвердевают на подложке, а степень сцепления между частицами металлов может составлять всего 20÷80 % площади поверхности границ частицы.

Создаваемое термическим способом капиллярно-пористое покрытие будет всегда анизотропно, что имеет преимущества в процессе охлаждения, т.к. активнее

участвуют капиллярные силы в равномерности распределения охлаждающей жидкости.

Для исследования с помощью интерферометрии точкой отсчета всегда будет остаточная деформация в капиллярно-пористом покрытие, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки.

Для термического напыления металлов и сплавов стремятся к максимальному расплавлению частицы, что положительно влияет на коррозионную способность капиллярно-пористого покрытия. Для частиц минеральной среды проблема кавитационного эрозионного износа капиллярно-пористых покрытий не является основной.

Расшифровка интерферограмм (см. рис. 7) для покрытия показывает нелинейную кривую перемещения частиц, причем кислородно-керосиновое напыление имеет преимущество в том, что расплавление частиц на капиллярно-пористом покрытии достигается с помощью спинового детонационного факела на поверхности покрытия. Это значительно снижает разрушение частиц порошка по границам раздела нерасплавленных частиц в капиллярно-пористом покрытие.

**Выводы**

Исследован процесс создания покрытий из природных материалов. Применен способ образования порошков с помощью управления энергией волны и газов в фокусах эллиптических цилиндров, что позволило провести упрочнение природного материала и повысить выход мелких фракций в диапазоне гранулометрического состава $(0\div2)\times10^{-3}$ м. Создан термоинструмент, имеющий спиновую структуру детонационного факела, дожигаемого на поверхности природного покрытия, и имеющей пульсирующую двухфазную высокотемпературную высокоскоростную струю. Поперечная скорость участка воспламенения спинового факела близка к скорости детонации. Интенсификация теплообмена на природном покрытии превосходит кипение в пленках, большом объёме и сетчатых тепловых трубах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Genbach, N. A., Genbach, E. A.** Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. – https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5

2 **Maoqi, Lu.** Investigation of swirl premixed dimethyl ether/methane flame stability and combustion characteristics in an industrial gas turbine combustor // Energy. – 2024. – Vol. 310. – P. 133255. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133255

3 **Zhenhua, Wang.** Thermal behavior of steam reforming reaction at different aspect ratios in the scramjet engine cooling channel // Energy. – 2025. – Vol. 314. – P. 134166. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134166

4 **Xing, Yang.** Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. –2019. – Vol. 140. – P. 25–40. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109

5 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloev, H. I., Genbach, N. A.** Boiling crisis in porous structures // Energy. – 2022. – Vol. 259. – P. 125076. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076

6 **Litvintsova, Y. E.** Diagnostics of Transient Heat-Transfer Regimes during Pool Boiling Based on Wavelet Transform of Temperature Fluctuations // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70. – P. 875–884. – https://doi.org/10.1134/S0040601523110101

7 **Santiphong, K., Watit, P.** Effects of porous insertion in a round-jet burner on flame characteristics of turbulent non-premixed syngas combustion // Case Studies in Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 14. – P. 100451. – https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100451

8 **Miao, Qian.** Study on heat dissipation performance of a lattice porous structures under jet impingement cooling // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 49. – P. 103244. – https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103244

9 **Jamialahmadi, M.** Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. – № 9. – P. 2482–2493. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052

10 **Xinghui, Wu.** An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 45. – P. 102921. – https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921

11 **Min, Yu.** Analytical study of impact of the wick's fractal parameters on the heat transfer capacity of a novel micro-channel loop heat pipe // Energy. – 2018. – Vol. 158. – P. 746–759. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.075

REFERENCES

1 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Genbach, N. A., Genbach, E.A.** Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. – https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5.

2 **Maoqi, Lu.** Investigation of swirl premixed dimethyl ether/methane flame stability and combustion characteristics in an industrial gas turbine combustor // Energy. – 2024. – Vol. 310. – P. 133255. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133255

3 **Zhenhua, Wang.** Thermal behavior of steam reforming reaction at different aspect ratios in the scramjet engine cooling channel // Energy. – 2025. – Vol. 314. – P. 134166. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134166

4 **Xing, Yang.** Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 140. – P. 25–40. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109

5 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloev, H. I., Genbach, N. A.** Boiling crisis in porous structures. Energy. – 2022. – Vol. 259. – P. 125076. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076

6 **Litvintsova, Y. E.** Diagnostics of Transient Heat-Transfer Regimes during Pool Boiling Based on Wavelet Transform of Temperature Fluctuations // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70. – P. 875–884. – https://doi.org/10.1134/S0040601523110101

7 **Santiphong, K., Watit, P.** Effects of porous insertion in a round-jet burner on flame characteristics of turbulent non-premixed syngas combustion // Case Studies in Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 14. – P. 100451. – https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100451

8 **Miao, Qian.** Study on heat dissipation performance of a lattice porous structures under jet impingement cooling // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 49. – P. 103244. – https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103244

9 **Jamialahmadi, M.** Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. – № 9. – P. 2482–2493. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052

10 **Xinghui, Wu.** An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 45. – P. 102921. – https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921

11 **Min, Yu.** Analytical study of impact of the wick's fractal parameters on the heat transfer capacity of a novel micro-channel loop heat pipe // Energy. – 2018. – Vol. 158. – P. 746–759. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.075

Поступило в редакцию 22.05.25.
Поступило с исправлениями 27.05.25.
Принято в печать 03.07.25.

***А. А. Генбач[1], *Д. Ю. Бондарцев[2]***
[1,2]Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
22.05.25 ж. баспаға түсті.
27.05.25 ж. түзетулерімен түсті.
03.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ЖАБЫНДАРҒА АРНАЛҒАН ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДАН ҰНТАҚТАР ЖАСАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

*Ұнтақтарды термиялық құралмен жағу кезінде термиялық бүрку нәтижесінде пайда болатын капиллярлық-кеуекті табиғи жабындардағы жылу алмасу процестері зерттелді. Детонациялық ағыны бар оттық жасалды және жабық көлемде ұнтақтарды алу технологиясы жасалды. Кіріктірілген автоматты құрылғы арқылы оттық оттықтың қуаты мен алаудың ұзындығын өзгерту арқылы жабын жасау режимін басқаруға мүмкіндік береді. Қуаттандырудың, салқындатудыңесыстыру схемасы және жүргізу әдістемесі жасалды. Жанармай 0.6÷0.8 артық тотықтырғыш коэффициентімен жабынға жағылды. Ұнтақты материалдарды өңдеуге*

*арналған есептелген формулалар берілген. Елек талдауының нәтижелері ұсынылған. Айналмалы детонация алауының тұтану аймағының көлденең жылдамдығы детонация жылдамдығына жақын және ағындағы дыбыс жылдамдығынан екі есе көп. Ол спираль ізін қалыптастыратын көлбеуден анықталды. Жабындарға арналған жылу жүктемелерінің шекті аймағы жұқа пленкаларда, үлкен көлемде және жылу құбырларында қайнатудан асып түсті. Голографиялық интерферометрияны қолдана отырып жүргізілген зерттеулер жылу жүктемесін алып тастағанда қалдық деформация жойылмайтынын көрсетті. Бөлшектердің сызықтық емес қисығы анықталды. Детонациялық бүрку ұнтақ бөлшектерінің балқымаған бөлшектердің интерфейсі бойынша ыдырауын азайтады, өйткені анизотроптылық капиллярлық күштердің рөлін арттырады.*

*Кілтті сөздер: табиғи материалдар, жабындар, жылу құралдары, бүрку, жылу алмасу, деформация.*

***A. A. Genbach[1], *D. Yu. Bondartsev[2]***
[1,2]Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 22.05.25.
Received in revised form 27.05.25.
Accepted for publication 03.07.25.

## TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF POWDERS FROM NATURAL MATERIALS FOR HIGH-TEMPERATURE COATINGS

*The processes of heat exchange in capillary-porous natural coatings created by thermal spraying of powders during their application with a thermal tool have been investigated. A burner with detonation jet was created and the technology of powder production in a closed volume was developed. The burner due to the built-in automatic device allows controlling the mode of coating creation by changing the burner power and torch length. The displacement scheme of power supply, cooling and methodology was developed. The burner was afterburning on coating with oxidizer excess coefficient 0.6÷0.8. Calculation formulas for powder materials processing are given. The results of sieve analysis are presented. The transverse velocity of the ignition section of the spin detonation plume is close to the detonation velocity and was twice the speed of sound in the jet. It was determined from the slope to the spiral trace pattern. The thermal limit region for the coatings exceeded boiling in thin films, large volume and heat pipes. Holographic interferometry studies showed that the residual strain, does not disappear when the thermal load is removed. A nonlinear particle displacement curve was found. Detonation sputtering reduces the destruction of powder particles at the interfaces of unmelted particles, since anisotropy increases the role of capillary forces.*

*Keywords: natural materials, coatings, thermal tools, spraying, heat transfer, deformation.*

ҒТАМР 55.03.35

https://doi.org/10.48081/OCGR8081

***А. Б. Есиркепова[1], Н. Б. Абишева[2], А. К. Шеров[3],***
***Н. Ж. Карсакова[4], С. И. Мендалиева[5]***

[1,2,4]А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Казахстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Казахстан Республикасы, Астана қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4524-5135
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8564-0055
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1433-957X
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2002-1557
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4819-8656
*e-mail: yessirkepova85@mail.ru

# *ТҮЙІСТІРІП ДӘНЕКЕРЛЕНГЕН ҚОСЫЛЫСТАРДЫ АЙНА-КӨЛЕҢКЕ ӘДІСІМЕН САПАСЫН БАҚЫЛАУ*

*Бұл мақалада әртүрлі диаметрлі және әртүрлі материалдардан жасалған шыбықтардың түйістіріп дәнекерленген қосылыстарының сапасын зерттеу және бақылау жүргізілді. Шетелдік ғалымдар жүргізген ғылыми зерттеулерге талдау жүргізілді, оның нәтижелері түйістіріп дәнекерлеу әдісі біртекті, сонымен қатар, әртекті металл материалдарын біріктіру үшін кеңінен қолданылатынын көрсетті. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, түйістіріп дәнекерлеу, атап айтқанда балқытып дәнекерлеу, түйіспелі дәнекерлеудің жалпы көлемінің 40 %-дан астамын құрайды. Өндірісте, атап айтқанда машина жасау және құрылыс кәсіпорындарында түйістіріп дәнекерлеуді пайдаланудың тиімділігі мен технологиялық мүмкіндігін арттыру қажеттілігі анықталды. Осы мақсатта А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті жанындағы Халықаралық дәнекерлеу институтының зертханалық жағдайында түйістіріп дәнекерлеу тәсілімен әртүрлі материалдарды қосу бойынша бірқатар эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Түйістіріп дәнекерленген қосылыстың сапасын бақылау айна-көлеңкелі әдіспен жүзеге асырылды. Сондай-ақ, балқыту арқылы түйіспелі дәнекерлеу кезінде қосылыстардың пайда болу кезеңдері, сонымен қатар, түйістіріп балқытып дәнекерлеу процесінің типтік циклограммасы қарастырылды. Түйістіріп дәнекерлеу арқылы алынған дәнекерленген қосылыстардың айна-көлеңке әдісімен бақылау нәтижелері тексерілген үлгілердің 95 %-дан астамында дәнекерленген жіктерде ақаулар жоқ екенін көрсетті.*

*Кілтті сөздер: дәнекерленген жіктің сапасы, түйістіріп дәнекерлеу, айна-көлеңкелі әдіс, ақаулар, град, төменгі беті, әртекті материалдар.*

**Кіріспе**

Түйіспелі дәнекерлеу – қалыңдығы мен қимасының кең ауқымында әртүрлі құрылымдық материалдардың ажырамас қосылыстарын алудың ең кең таралған және жылдам дамып келе жатқан түрлерінің бірі [1]. Қазіргі уақытта барлық дәнекерленген қосылыстардың шамамен 40 % түйіспелі дәнекерлеу арқылы жасалады. Механикаландыру және автоматтандыру дәрежесі бойынша түйіспелі дәнекерлеу дәнекерлеудің басқа түрлерінің арасында бірінші орында. Түйіспелі дәнекерлеу арқылы барлық белгілі констукционды материалдарды – аз көміртекті және легірленген болаттарды, ыстыққа төзімді және коррозияға төзімді қорытпаларды, алюминий, магний және титан негізіндегі және т. б. қорытпаларды жақсы біріктіруге болады [2; 3]. Түйістіріп балқытып дәнекерлеу кеңінен қолданыс тапты, ол құбырларды, теміржол рельстерін (түйіспесіз жолдар) стационарлық және далалық жағдайларда, әр түрлі құрылымдық болаттар мен қорытпалардан, түсті металдардан және т.б. ұзын өлшемді бұйымдарды дәнекерлеуде жақсы қолданылады [4; 5].

Түйістіріп дәнекерлеуді кесу құралын өндіруде де қолданылады. Мысалы, аспаптық болаттар мен қорытпалардан жасалған бұйымның жұмыс (кесу) бөлігі көміртекті болаттардан жасалып, астынғы (бекіту) бөлігімен дәнекерленген, бұл құралды арзандатады және оның өнімділігін жақсартады [6; 7].

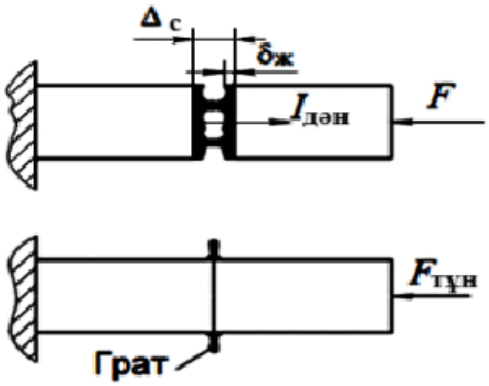
Түйістіріп дәнекерлеудің технологиялық мүмкіндігін зерттеу мақсатында шетелдік ғалымдардың ғылыми зерттеулеріне талдау жүргізілді [8; 9; 10].

Шетелдік ғалымдар жүргізген ғылыми зерттеулерді талдау нәтижелері түйістіріп дәнекерлеу әдісі біртекті, сонымен қатар әртекті металл материалдарын біріктіру үшін кеңінен қолданылатынын көрсетті. Бұл ретте түйістіріп дәнекерлеуді пайдаланудың тиімділігі мен технологиялық мүмкіндігін арттыру қажеттігі анықталды. Осыған байланысты әртүрлі материалдарды түйістіріп дәнекерлеу әдісімен біріктіру бойынша бірқатар эксперименттік зерттеулер жүргізілді.

Бұл мақаланың мақсаты – айна-көлеңкелі әдіспен түйістіріп дәнекерленген қосылыстардың сапасын бақылау.

**Материалдар мен әдістер**

Балқытумен түйістіріп дәнекерлеу кезінде жіктің пайда болуы бөлшектердің электр тогымен қыздырылған ұштарын тұндыру кезінде бірлескен пластикалық деформация нәтижесінде пайда болады. Қосылыс пайда болған кезде пайда болатын физикалық процестер нүктелік дәнекерлеу процесіне ұқсас. Бірақ металл байланыстарының пайда болу процестерін анықтайтын бірқатар маңызды белгілер бар. Түйістіріп дәнекерлеу екі кезеңнен тұратын схема бойынша жүреді: бөлшектердің ұштарын қыздыру және тұндыру (1-суретті қараңыз) [1, 144-б].




1-сурет – Балқытумен түйістіріп дәнекерлеу кезінде
қосылыстардың пайда болу кезеңдері

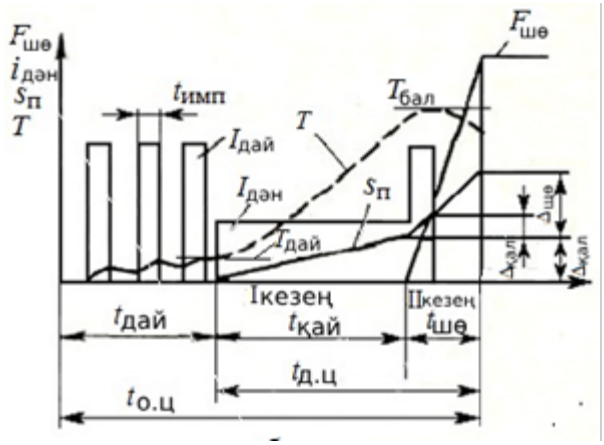
Бірінші кезеңінде, балқытумен түйістіріп дәнекерлеген кезде (1-суретті қараңыз) жанасу аймағының қыздырылуы δж бөлшектің белгілі бір жылдамдығында пайда болатын жергілікті жанасудың балқуы және бұзылуы нәтижесінде пайда болады (бөлшектер арасындағы Δс саңылауындағы микро-қисықтардың жанасуы), қалыңдығы δж балқытылған металл қабатының ұштарында пайда болғанға дейін. Екінші кезең, біріктірілетін беттердің Fтұн қысу күшінің күрт артуы нәтижесінде қыздырылған беттердің айтарлықтай деформациясымен бірге жүреді, яғни шөгеді.

Екінші кезеңде балқытумен дәнекерлеу үшін шөгу кезіндегі пластикалық деформация нәтижесінде атомаралық байланыстардың қалыптасу шарттары әртүрлі және жанасатын беттердің күйімен анықталады.

Балқытып дәнекерлеу кезінде оксидті пленкалар балқытылған металдың жұқа қабатының бетінде болады, ал бөлшектердің жанасу беттерін қысу кезінде олар балқымамен бірге гратқа ығысады. Байланыстың қалыптасуы негізінен қатты күйде және ішінара сұйық күйде жүреді. Қосылыстың қалыптасуын анықтайтын негізгі және ілеспе процестерді негізгі және ілеспе деп бөлуге болады. Негізгі: металды жылыту және салқындату, пластикалық деформация, оксидті пленкаларды жою. Ілеспе: металдың құрылымы мен қасиеттерінің өзгеруі, металдың термиялық кеңеюі және шөгуі, электрод-бөлік контактісіндегі массалық тасымалдау.

Соңғы екі көмекші процесс – термиялық кеңею және масса тасымалдау – көп жағдайда түйістіріп дәнекерлеу кезінде қосылыстардың сапасына айтарлықтай әсер етпейді.

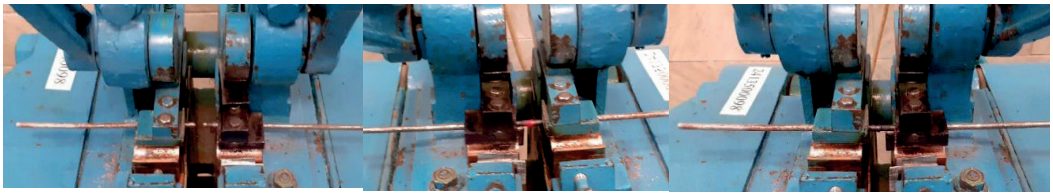
2-суретте балқытып дәнекерлеу процесінің типтік циклограммасы көрсетілген [1, 144-б.].




2-сурет – Балқытып дәнекерлеу процесінің типтік циклограммасы

Балқытып түйістіріп дәнекерлеу кезінде (tд.ц – дәнекерлеу циклі) қосылыстың пайда болуының бірінші кезеңінде (2-суретті қараңыз) бөлшектердің tқай уақытында балқуы орын алады, ол үшін бөлшектер Δқай ұзындығына қысқарады, екінші кезеңде бөлшектердің жалпы деформациясымен сипатталатын тұнба пайда болады tшө, оның бір бөлігі Δшө тогының астында жүреді tшө уақытында (ток астында тұнба уақыты). Екінші кезең уақытында металл байланыстары пайда болады, бұл негізінен жанасу аймағындағы ығысу деформацияларына байланысты және ішінара балқытылған металл қалған жергілікті жерлерге байланысты.

Дәнекерленетін арматура үлгілері мен болат сымдарын түйістіріп дәнекерлеуіне эксперименталдық зерттеулер жүргізу кезінде дәнекерлеудің мынадай режимдері пайдаланылды: белгіленген ұзындығы (екі дайындаманың) d диаметріне байланысты қабылданды: 0,5÷1,0 D мм; екі дайындама үшін балқу шамасы $\Delta t_{бал}$ = 2 – 4 мм; меншікті қуаты 0,15 – 0,4 ква/мм$^2$; балқу тоғының тығыздығы $j_{бал}$ = 20÷25 А/мм$^2$ және шөгу $j_{шө}$ =25 ÷ 30 А/мм$^2$; балқу жылдамдығы ибал = 0,5÷1,5 мм/с; шөгу жылдамдығы 50–60 мм/с; шөгудің меншікті қысымы 2–3 кг/мм$^2$. 3-суретте көміртекті болат үлгілерін балқытып түйістіріп дәнекерлеу процесі көрсетілген.



*а)* *б)* *в)*

а – түйістіріп дәнекерлеу процессін дайындау;
б – дәнекерлеу процессі; в – дәнекерлеуден кейін
3-сурет – Көміртекті болат үлгілерін балқытып
түйістіріп дәнекерлеу процесі

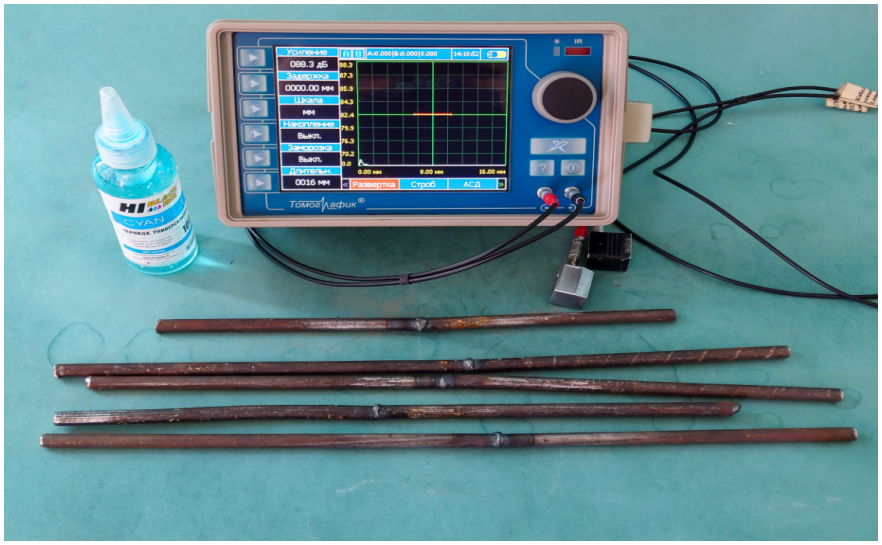
4-суретте диаметрлері әртүрлі А3 арматуралық болаттардың түйістіріп дәнекерленген және одан әрі біріктіруге дайындалған үлгілер көрсетілген.

4-сурет – Диаметрлері әртүрлі А3 арматуралық болаттардың түйістіріп дәнекерленген (а) және одан әрі біріктіруге дайындалған үлгілер (б)

Дәнекерленген үлгілердің ішкі құрылымдарын зақымдамай тексеруге арналған бұзбайтын ультрадыбыстық бақылау әдісін қолданып, МЕСТ 14782-86 бойынша ультрадыбыстық толқындардың көмегімен үлгідегі ақаулардың бар-жоғы анықталды.

Ультрадыбыстық тербелістер (жиілігі әдетте 0,5-10 МГц) материалға еңгізіледі. Бұл толқындар материалдың ішкі құрылымында шағылады, сыналайды және тарайды. Егер толқын жолында ақаулар болса – ол ультрадыбысты шағылдырады. Шағылған толқындар дефектоскоп құрылғысы арқылы тіркеледі.

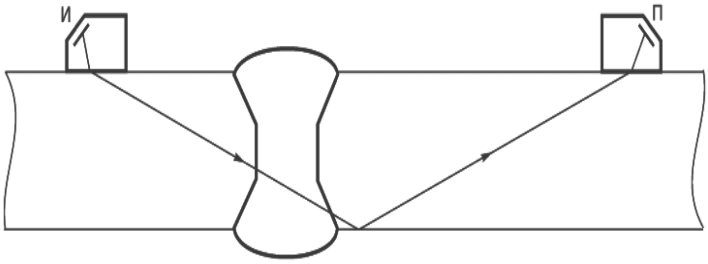
5-суретте УД4 ТМ томография құрылғысы мен түйістіріп дәнекерленген және бақылауға дайындалған кейбір үлгілер көрсетілген.



5-сурет – УД4 ТМ томография құрылғысы мен түйістіріп дәнекерленген және бақылауға дайындалған кейбір үлгілер

Айна-көлеңке әдісі (бір реттік сынған сәулемен бақылау, МЕСТ 14782-69) – көлеңкелі әдістің бір түрі болып табылады. Бақылау кезінде қабылдау және сәулелену басы бұйымның бір жағына орнатылады. Серпімді тербелістер қарқындылығының өзгеруін тіркеу олар қарама-қарсы бетінен шағылысқаннан кейін жүзеге асырылады (6-суретті қараңыз).

Серпімді толқындарды шағылыстыратын қарама-қарсы бет төменгі бет деп аталады, ал одан шағылысқан импульс төменгі импульс деп аталады. Айна-көлеңке әдісімен бақылау кезінде ақаудың болу критерийі төменгі эхо импульсін белгілі бір рет азайту болып табылады. Ақау неғұрлым үлкен болса, төменгі эхо импульсінің әлсіреуі соғұрлым көп болады.




И – шағылыстырғыш; П – қабылдағыш
6-сурет – Серпімді тербелістер қарқындылығының өзгеруін тіркеу

Ультрадыбыстық бақылау жүргізуге арналған операциялар тізбесі:

– 2 түрлендіргішті құрылғыға бөлек кабельдермен қосу (бөлек қосылу схемасы);

– дефектоскопты қосу. Генератор-қабылдағыштың бөлек жұмыс режимін қосу;

– құрылғыда түрлендіргіштердің параметрлерін орнату (бұрышы 70 градус, жиілігі 5 МГц, жылдамдығы 3200 м/с);

– беттерін кірден, тоттан, шашыраған металдан алдын-ала тазартқаннан кейін түрлендіргіштерді бір-біріне қарама-қарсы ақаусыз бақылау аймағына орнату қажет, кедір-бұдырлығы Rz40. Әрі қарай, акустикалық байланыстырғыш сұйықтық қабатын жағу (сұйықтық неғұрлым қою болса, соғұрлым жақсы – солидол литол және т. б. сияқты әртүрлі гельдер мен майлағыштарды қолдануға болады) біздің жағдайда медициналық ультрадыбыстық гель қолданылды;

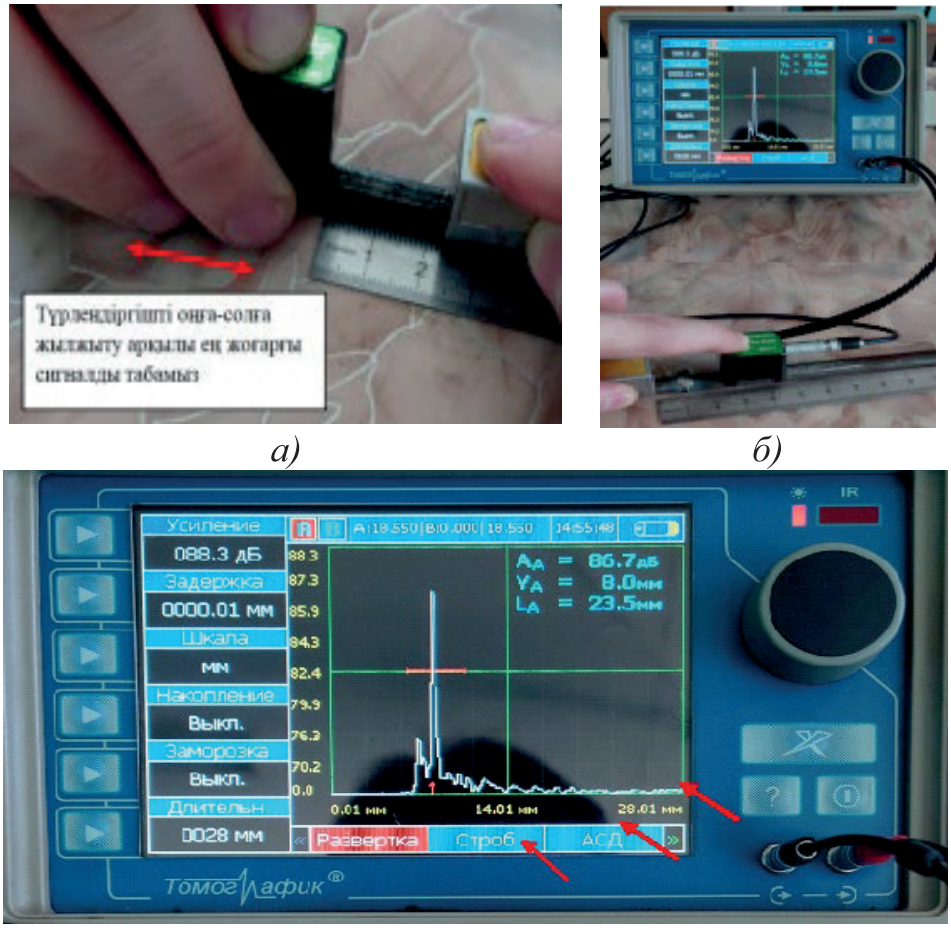
– строб параметрлерін және қолданылатын шыбық қалыңдығына сәйкестендіріп келтіру. Бізде 8 мм болғандықтан, стробты ені 3–4 мм және стробтың басын 6 мм етіп орнату керек;

– дефектоскоп экранында сигнал пайда болғаннан кейін, төменгі бетінен максималды сигналды табу керек, қажет болған жағдайда сигнал экранның 80 % болуы үшін күшейтуді реттейміз: ол үшін түрлендіргіштердің бірі алға қарай жылжиды. Дефектоскоп экранында ең жоғарғы сигнал байқалатын

жерде түрлендіргіштің орны бекітіледі. Алынған күшейту мен түрлендіргіштер арасындағы қашықтық өзгермейді, бізде 24 мм шықты;

– түрлендіргіштердің параметрлерін тереңдіктің мәні 8 мм болатындай етіп призмадағы кідіріс мәнін өзгерту;

– дәнекерленген қосылыстарды бақылау. Жоғарыда 6-суретте көрсетілгендей етіп түрлендіргіштерді қойып, 24 мм қашықтықты сақтай отырып, түрлендіргіштерді дәнекерленген жіктің бойымен әртүрлі бағытта жылжытамыз. МЕСТ Р 55724-2013 бойынша, егер сигналдың әлсіреуі байқалмаса (оның биіктігі төмендесе), онда дәнекерленген жік жарамды болып саналады. 7-суретте дәнекерленген жіктің сапасын бақылау процесі көрсетілген.




*а)* *б)*

*в)*

а, б – бақылау процессі; в – томография құрылғы
экранының кеңейтілген көрінісі

7-сурет – Дәнекерленген жіктің сапасын бақылау процесі

Дефектоскоп экраны – бұл А типті уақытша сканерлеу, мұнда горизонталь бойынша уақыт немесе тереңдік бойынша қашықтық, мм қойылады, ал ДБ-дегі сигнал амплитудасы вертикаль жүреді, мұнда сигнал неғұрлым күшті болса,

соғұрлым ол құрылғы экранында жоғары болады. Экрандағы строб сызығы пайдалы сигналды пайдасыз сигналдан ажырату үшін қажет. Сигнал параметрлері сигнал строб сызығын кесіп өткен жағдайда ғана құрылғының экранына шығарылады.

**Нәтижелер және талқылау**

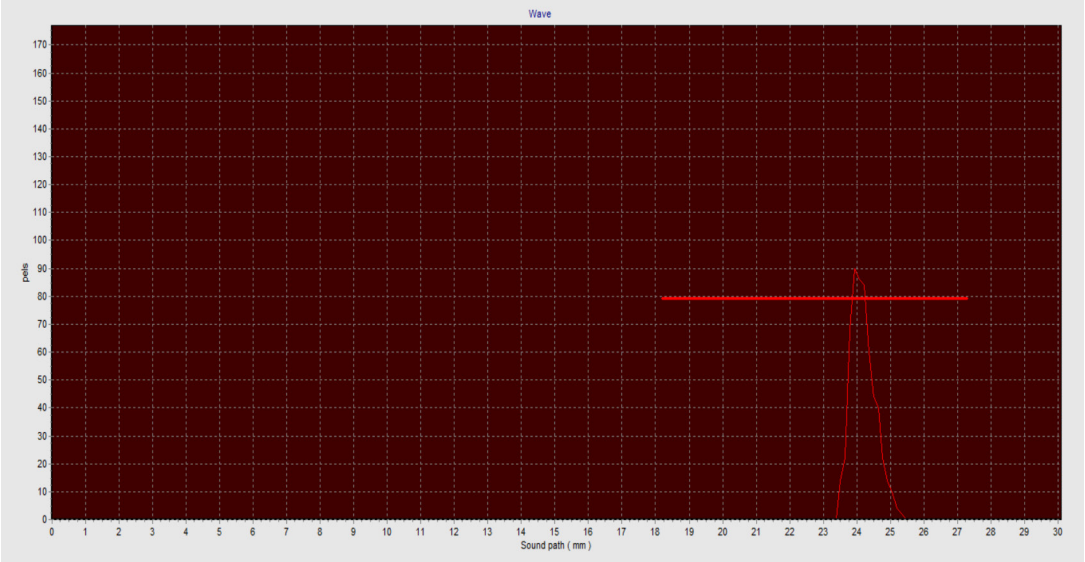
8-суретте диаметрі 6 мм арматура шыбықтарын айна-көлеңке әдісімен бақылау нәтижелері көрсетілген.

Parameter of State

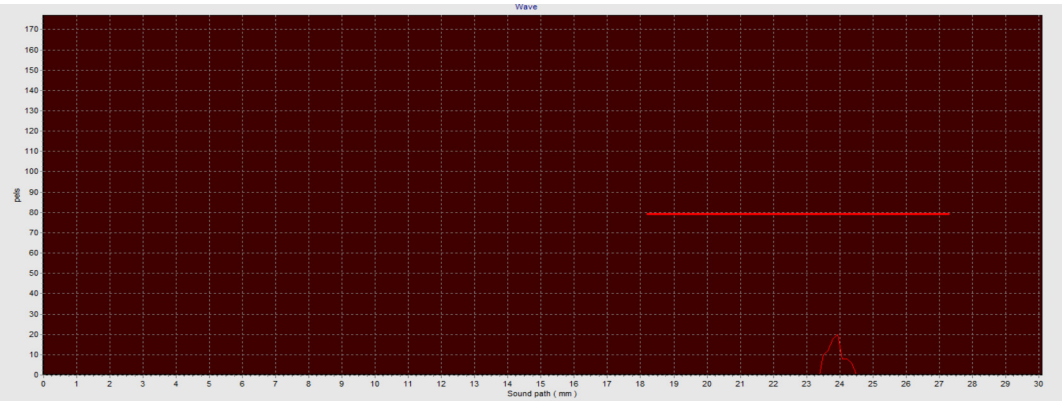
| State | Value | State | Value | State | Value | State | Value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Part-ID | TEST003 | P-Delay | 7,39 us | bTHRSH | 18 % | Depth(%) | 12 % |
| Date | 10.02.2025 | Reject | 0 % | Angle | 60 deg | Horizontal distance | 10,86 mm |
| File-No. | 7 | Alarm Logic | POS | Thickness | 100,00 mm | Explain | |
| Operator | System | aStart | 18 mm | X-value | 10,000 mm | Job Number | 5 |
| Gain | 36 dB | aWidth | 9 mm | Velocity distan | 24,08 mm | DAC Repair | |
| Range | 28,00 mm | aTHRSH | 49 % | Echo range(%) | 51,4 % | DAC-EL | |
| MTLVEL | 3260 m/s | bStart | 9 mm | Echo range(pel | 91 | DAC-SL | |
| D-Delay | 0 us | bWidth | 4 mm | Depth | 12,04 mm | DAC-RL | |
| | | | | | | | |

8-сурет – Диаметрі 6 мм арматура шыбықтарын айна-көлеңке әдісімен бақылау нәтижелері

9-суретте диаметрі 6 мм арматура шыбықтарының дәнекерленген жіктерін сканерлеу нәтижелері көрсетілген.




а)




б)

а – диаметрі 6 мм ақаусыз арматура шыбықтарының А-Сканы; б – диаметрі 6 мм ақауы бар арматура шыбықтарының А-Сканы (толық балқымаған)

9-сурет – Диаметрі 6 мм арматура шыбықтарының дәнекерленген жіктерін сканерлеу нәтижелері

А-Сканда абсцисс осі ДБ-дегі күшейтуді білдіреді, ординат осі түрлендіргіштің 60 градус бұрышын ескере отырып, сәуле бойымен жүріп өткен қашықтық. Диаметрі 6 мм ақаусыз арматура шыбықтарының А-Сканы. Бұл жағдайда сигнал строб импульсінен асады. Генератордың күшейуі 36 дБ құрайды (9-суретті қараңыз, а). Диаметрі 6 мм ақауы бар арматура шыбықтарының А-Сканы (толық балқымаған). Мұнда сигнал өте әлсіреді, ол сынау үлгісінде ақау бар екенін көрсетеді. Генератордың күшейуі 36 дБ құрайды (9-суретті қараңыз, б).

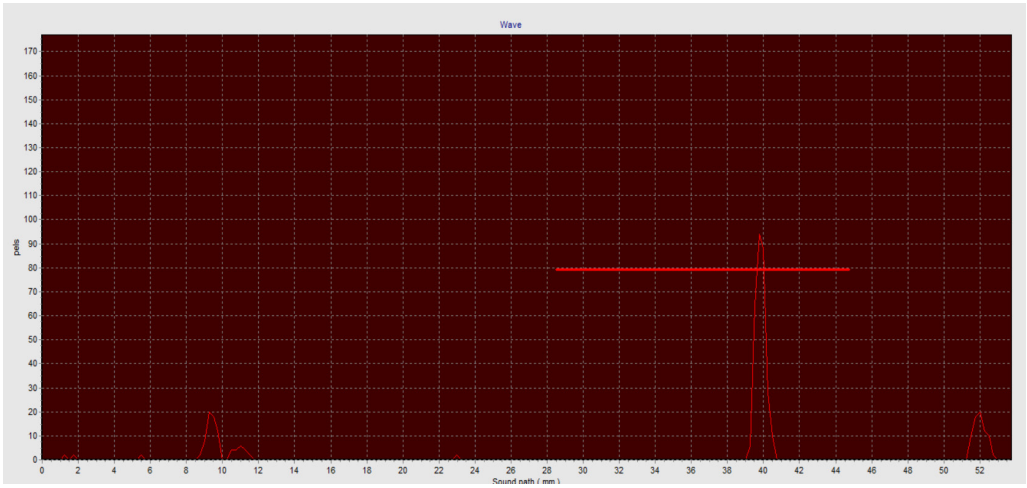
10-суретте диаметрі 10 мм арматура шыбықтарын айна-көлеңке әдісімен бақылау нәтижелері көрсетілген.

Parameter of State

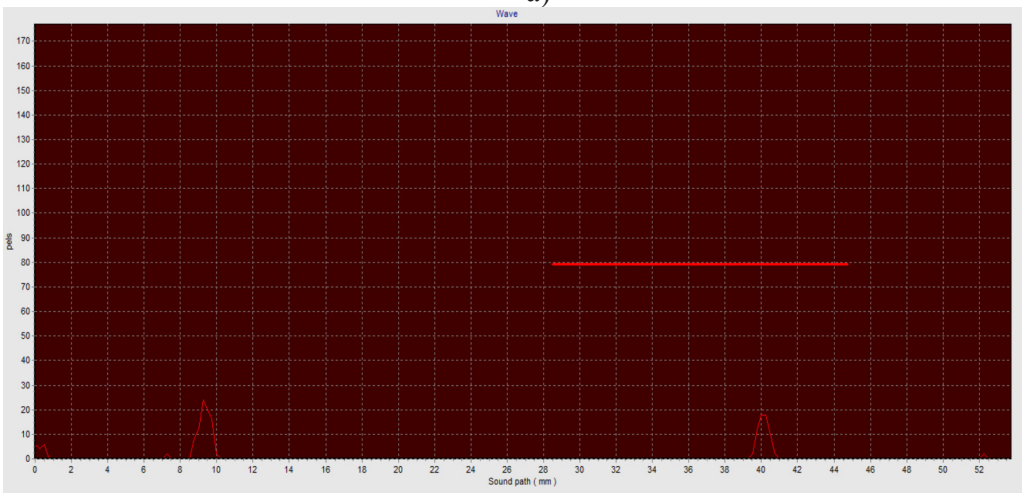
| State | Value | State | Value | State | Value | State | Value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Part-ID | TEST003 | P-Delay | 7,39 us | bTHRSH | 18 % | Depth(%) | 20 % |
| Date | 10.02.2025 | Reject | 0 % | Angle | 60 deg | Horizontal distance | 24,65 mm |
| File-No. | 9 | Alarm Logic | POS | Thickness | 100,00 mm | Explain | |
| Operator | System | aStart | 28 mm | X-value | 10,000 mm | Job Number | 7 |
| Gain | 53 dB | aWidth | 16 mm | Velocity distan | 40,02 mm | DAC Repair | |
| Range | 50,00 mm | aTHRSH | 49 % | Echo range(%) | 53,7 % | DAC-EL | |
| MTLVEL | 3260 m/s | bStart | 17 mm | Echo range(pel | 95 | DAC-SL | |
| D-Delay | 0 us | bWidth | 8 mm | Depth | 20,01 mm | DAC-RL | |
| | | | | | | | |

10-сурет – Диаметрі 10 мм арматура шыбықтарын айна-көлеңке әдісімен бақылау параметрлері

11-суретте диаметрі 10 мм арматура шыбықтарының дәнекерленген жіктерін сканерлеу нәтижелері көрсетілген.




а)




б)

а – диаметрі 10 мм ақаусыз арматура шыбықтарының А-Сканы;
б – диаметрі 10 мм ақауы бар арматура шыбықтарының А-Сканы (толық балқымаған)
11-сурет – Диаметрі 10 мм арматура шыбықтарының дәнекерленген жіктерін сканерлеу нәтижелері

Диаметрі 10 мм ақаусыз арматура шыбықтарының А-Сканы. Бұл жағдайда сигнал строб импульсінен асады. Генератордың күшейуі 53 дБ құрайды (11-суретті қараңыз, а).

Диаметрі 10 мм ақауы бар арматура шыбықтарының А-Сканы (толық балқымаған). Мұнда сигнал қатты әлсіреді, ол сынау үлгісінде ақау бар екенін көрсетеді. Генератордың күшейуі 36 дБ құрайды (11-суретті қараңыз, б).

Айна-көлеңкелі бақылау әдісімен ақаулардың анықталуын сандық бағалау үшін ақауды анықтау коэффициенті еңгізілді (1-формуланы қараңыз), бұл

бұйымның тікелей іздестіру басымен дыбысталуы кезінде бірінші төменгі эхо импульсінің әлсіреуін сипаттайды:

$$k_д = A_{д1}/A_{01} \quad (1)$$

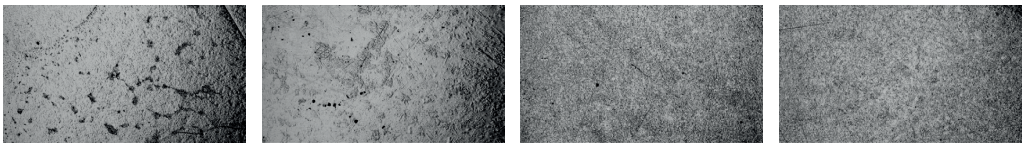
мұндағы, $k_д$ – ақауды анықтау коэффициенті;

$A_{01}$ – ақау болмаған кездегі бірінші төменгі эхо импульсінің амплитудасы;

$A_{д1}$ – ультродыбыстық сәуле аймағында ақау болған кездегі сол төменгі эхо импульсінің минималды амплитудасы.

$k_д$ мәні 0-ден 1-ге дейінгі аралықта және неғұрлым аз болса, соғұрлым ақау көп болады. Кейбір жағдайларда дәнекерленген қосылыста анықталған ақаулардың эквивалентті мөлшерін осы коэффициент бойынша бағалауға болады.

Дәнекерленген қосылыстардың үлгілеріне оптикалық микроскоппен х500 үлкейте отырып зерттеу жүргізген кезде анықталған ақаулар түрлері 12-суретте көрсетілген.



*а)* *б)* *в)* *г)*

а – дәнекерленген жік бойымен қара созылған дақтар мен жарықшақ тәрізді сызықтар; б – қара дақтар мен әртүрлі пішіндегі қара нүктелер, қож қосындылары; в,г – біркелкі сұр түсті дәнді құрылым

12-сурет – Оптикалық микроскоппен анықталған ақаулар түрлері

Суретте (12-суретті қараңыз, а) дәнекерленген арматураның бірінші үлгісінен дайындалған макрошлифте дәнекерленген қосылысқа тән макроқұрылымның ақаулары анықталды. Дәнекерленген жік бойымен қара созылған дақтар мен жарықшақ тәрізді сызықтар көрінеді. Бұл әдетте деформация процесінде илектелген металл емес қосылыстардың болуына байланысты.

Екінші үлгісінен дайындалған макрошлифте (12-суретті қараңыз, б) қара дақтар мен әртүрлі пішіндегі қара нүктелер анық көрінетінін байқауға болады, әсіресе кескіннің төменгі жағында (орталық дақ сызығы). Бұл дәнекерлеуден кейін қалған қождың немесе оксидтердің болуының типтік белгісі.

Үшінші және төртінші макрошлиф құрылымдарында біркелкі сұр түсті дәнді құрылым (12-суретті қараңыз, в, г). Кішкентай қара нүктелер мен ұзартылған метал емес қосылыстарды көруге болады (12-суретті қараңыз, в). Шамалы түстердің контрасттары бар, бірақ үлкен бос жерлері немесе толық балқымау айқын аймақтары жоқ (12-суретті қараңыз, в, г). Қара ұсақ нүктелер дәнекерлеу процесінде алынбаған шлак қалдықтары болуы мүмкін, олар әдетте балқу шекарасында орналасады (12-суретті қараңыз, в). Ал металл емес қосылыстар

дәнекерлеу процесіне тікелей қатысы жоқ арматураның бастапқы ақаулары болуы да мүмкін.

Жалпы жүргізілген зерттеулер нәтижесінде үлгілерден айқын ақаулар байқалмайды, МЕСТ 14098-2014 талаптарына сәйкес келеді, сондай-ақ толық балқымау, жарықтар мен күйіктер анықталған жоқ.

**Қаржыландыру туралы ақпарат**

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырған AP19174909 «Режимдерді оңтайландыру арқылы арматуралық өзекшелер мен әртүрлі цилиндрлік дайындамалардың түйістіріп дәнекерлеу сапасын арттыру» гранттық тақырыбын орындау шеңберінде жүргізілді.

**Қорытынды**

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, түйістіріп дәнекерлеу, атап айтқанда балқытып дәнекерлеу, түйіспелі дәнекерлеудің жалпы көлемінің 40 %-дан астамын құрайды. Шетелдік ғалымдар жүргізген ғылыми зерттеулерді талдау нәтижелері түйістіріп дәнекерлеу әдісі біртекті, сонымен қатар, әртекті металл материалдарын біріктіру үшін кеңінен қолданылатынын көрсетті. Бұл ретте түйістіріп дәнекерлеу әдісін пайдаланудың тиімділігі мен технологиялық мүмкіндігін арттыру қажеттігі анықталды.

Түйістіріп дәнекерлеу әдісімен алынған дәнекерленген қосылыстардың айна-көлеңке әдісімен жүргізілген бақылау нәтижелері 95 %–дан астам дәнекерленген үлгілердің жіктерінде ақаулар жоқ екенін көрсетті.

## ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Катаев, Р. Ф., Милютин, В. С., Близник, М. Г.** Теория и технология контактной сварки: учебное пособие [Текст]. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2015. – 144 с.

2 **Кучук-Яценко, С. И.** Контактная стыковая сварка оплавлением [Текст]. – Киев: Наукова думка, 1992. – 236 с.

3 **Алешина, Н. П.** Сварка. Резка. Контроль: справочник [Текст]. – М. : Машиностроение, 2004. – Т. 1. – 624 с.

4 **Ngo, T. T., Phong, N. H., Than, V. T.** Predicting and Validating Welding Distortion of Butt Joint // Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development [Text]. – 2021. – P. 844–850. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8_112

5 **Brätz, O., Arnim, M., Eichler, S., Gericke, A., Hildebrand, J., Bergmann, J. P., Kuhlmann, U., Henkell, K. M.** Mechanical properties of MAG butt welded dissimilar structural steel joints with varying strength from grade S355 up to S960 // Weld World 67 [Text]. – 2023. – P. 2791–2802. – https://doi.org/10.1007/s40194-023-01600-9

6 **Gevers, K., Tornede, A., Wever, M., Schöppner, V., Hüllermeier, E.** A comparison of heuristic, statistical, and machine learning methods for heated tool butt

welding of two different materials [Text] // Weld World 66 – 2022. – P. 2157–2170. – https://doi.org/10.1007/s40194-022-01339-9

7 **Ranjan, R., Jha, S. K.** Optimization of welding parameters and microstructure analysis of low frequency vibration assisted SMAW butt welded joints // Int J Interact Des Manuf 18 [Text]. – 2024. – P. 1687–1707. – https://doi.org/10.1007/s12008-023-01562-8

8 **Nafikov, M. Z., Akhmet'yanov, I. R., Masyagutov, R. F., Akhmarov, R. G., Zagirov, I. I., Yunusbaev, N. M.** Butt Contact Welding of Bars and Rods // Steel Transl. 53 [Text]. – 2023. – P. 277–279. – https://doi.org/10.3103/S0967091223030117

9 **Банов, М. Д.** Технология и оборудование контактной сварки: учебник [Текст]. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 224 с.

10 **Чуларис, А. А., Рогозин, Д. В.** Технология сварки давлением [Текст]. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 221 с.

REFERENCES

1 **Kataev, R. F., Milyutin, V. S., Bliznik, M. G.** Teoriya i texnologiya kontaktnoj svarki: uchebnoe posobie [Theory and technology of contact welding: a tutorial] [Text]. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural`skogo universiteta, 2015. – 144 p.

2 **Kuchuk-Yacenko, S. I.** Kontaktnaya sty`kovaya svarka oplavleniem [Contact butt welding by reflow] [Text]. – Kiev: Naukova dumka, 1992. – 236 p.

3 **Aleshina, N. P.** Svarka. Rezka. Kontrol`: spravochnik [Welding. Cutting. Control`: a reference book] [Text]. – Moscow : Mashinostroenie, 2004. – Vol.1. – 624 p.

4 **Ngo, T. T., Phong, N. H., Than, V. T.** Predicting and Validating Welding Distortion of Butt Joint // Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development [Text]. – 2021. – P. 844–850. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8_112

5 **Brätz, O., Arnim, M., Eichler, S., Gericke, A., Hildebrand, J., Bergmann, J. P., Kuhlmann, U., Henkell, K. M.** Mechanical properties of MAG butt welded dissimilar structural steel joints with varying strength from grade S355 up to S960 // Weld World 67 [Text]. – 2023. – P. 2791–2802. – https://doi.org/10.1007/s40194-023-01600-9

6 **Gevers, K., Tornede, A., Wever, M., Schöppner, V., Hüllermeier, E.** A comparison of heuristic, statistical, and machine learning methods for heated tool butt welding of two different materials // Weld World 66 [Text]. – 2022. – P. 2157–2170. – https://doi.org/10.1007/s40194-022-01339-9

7 **Ranjan, R., Jha, S. K.** Optimization of welding parameters and microstructure analysis of low frequency vibration assisted SMAW butt welded joints // Int J Interact Des Manufь 18 [Text]. – 2024. – P. 1687–1707. – https://doi.org/10.1007/s12008-023-01562-8

8 **Nafikov, M. Z., Akhmet'yanov, I. R., Masyagutov, R. F., Akhmarov, R. G., Zagirov, I. I., Yunusbaev, N. M.** Butt Contact Welding of Bars and Rods // Steel Transl. 53 [Text]. – 2023. – P. 277–279. – https://doi.org/10.3103/S0967091223030117

9 **Banov, M. D.** Texnologiya i oborudovanie kontaktnoj svarki: uchebnik [Contact welding technology and equipment: textbook] [Text]. – Moscow: Izdatel`skij centr «Akademiya», 2008. – P. 224.

10 **Chularis, A. A. Rogozin, D. V.** Texnologiya svarki davleniem [Pressure welding technology] [Text]. – Rostov-na-Donu: Feniks, 2006. – P. 221.

25.06.25 ж. баспаға түсті.
09.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
11.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***А. Б. Есиркепова[1], Н. Б. Абишева[2], А. К. Шеров[3],***
***Н. Ж. Карсакова[4], С. И. Мендалиева[5]***
[1,2,4]Карагандинский технический университет имени А. Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[3,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 25.06.25.
Поступило с исправлениями 09.07.25.
Принято в печать 11.08.25.

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОНТАКТНО СТЫКОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЗЕРКАЛЬНО ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

*В данной статье выполнены исследования и контроль качества контактно стыкового сварного соединения прутков различного диаметра и из различных материалов. Проведен анализ научных исследований выполненных зарубежными учеными, результаты которой показали, что способ контактной стыковой сварки широко используются для соединения однородных, а также разнородных металлических материалов. Результаты исследования показали, что контактно стыковая сварка, в частности сварка оплавлением, составляет более 40 % от общего объема применения контактной сварки. Выявлено, что есть необходимость в повышении эффективности и технологической возможности использования контактной стыковой сварки в производстве, в частности в машиностроительных и строительных предприятиях. С этой целью были проведены серия экспериментальных исследований по соединению различных материалов способом контактной стыковой сварки в лабораторных условиях института Международной сварки при Карагандинском техническом университете имени А. Сагинова. Контроль качества контактно стыкового сварного соединения осуществлялось зеркально теневым методом. Также были рассмотрены этапы образования соединений при контактно стыковой сварке оплавлением. А также типовая циклограмма процесса стыковой сварки оплавлением. Результаты контроля зеркально-теневым методом сварных соединений полученных контактной стыковой сваркой показали, что более 95 % проверенных образцов не имеют дефектов в сварных швах.*

*Ключевые слова: качества сварного шва, контактно стыковая сварка, зеркально теневой метод, дефекты, грат, донный поверхность, разнородные материалы.*

***A. B. Yessirkepova[1], N. B. Abisheva[2], A. K. Sherov[3],***
***N. Zh. Karsakova[4], S. I. Mendalieva[5]***
[1,2,4]A. Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3,5]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 25.06.25.
Received in revised form 09.07.25.
Accepted for publication 11.08.25.

## QUALITY CONTROL OF CONTACT BUTT WELDED JOINTS BY MIRROR-SHADOW METHOD

*In this article, research and quality control of contact butt welded joints of bars of various diameters and made of various materials are carried out. The analysis of scientific research carried out by foreign scientists has been carried out, the results of which have shown that the method of contact butt welding is widely used to connect homogeneous as well as heterogeneous metal materials. The results of the study showed that contact butt welding, in particular reflow welding, accounts for more than 40 % of the total volume of contact welding applications. It is revealed that there is a need to increase the efficiency and technological feasibility of using contact butt welding in production, in particular in machine-building and construction enterprises. To this end, a series of experimental studies were conducted on the connection of various materials by contact butt welding in the laboratory of the Institute of International Welding at the Karaganda Technical University named after A. Saginov. The quality control of the contact butt welded joint was carried out using a mirror shadow method. The stages of joint formation during contact butt welding by reflow were also considered. As well as a typical cyclogram of the reflow butt welding process. The results of the mirror-shadow inspection of welded joints obtained by contact butt welding showed that more than 95 % of the tested samples have no defects in the welds.*

*Keywords: weld quality, contact butt welding, mirror shadow method, defects, hail, bottom surface, heterogeneous materials.*

SRSTI 55.19.03

https://doi.org/10.48081/KSOW3486

***B. K. Kairolla[1], B. N. Absadykov[2], A. Zh. Kassenov[3], *A. V. Mazdubay[4], Kh. Mahkamov[5]***

[1]Kazakhstan Institute of Science and Technology LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[2]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3,4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[5]University of Northumbria, United Kingdom, Newcastle.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7020-6725
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7829-0958
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1439
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3396-1716
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4028-7654
*e-mail: asylkhan_m@mail.ru

## *THE ROUND SHAPED CUTTERS PROFILE CALCULATION FOR EXTERNAL PROCESSING*

*In this article, an original method for the graph-analytical profiling of round-shaped form tools for external processing is proposed, distinguished by its ability to systematize and automate calculations. Unlike existing approaches, the new method allows for the calculation of the cutter profile with a frontal surface of circular shapes, using both graphical constructions and analytical formulas. The method is based on constructing three projections of the tool profile and calculating main and auxiliary geometric parameters such as angles ε and β, as well as linear parameters $A_i$, $B_i$, $C_i$ and radius $R_i$. The graphical part of the method is presented as a 12-step procedure, which includes constructing the baseline, locating nodal points, and forming the form-cutting edge profile. The analytical part of the calculation includes seven steps detailing formulas for determining design distances, inclination angles, and tool radius. The proposed method ensures high accuracy and can be implemented manually or with software, especially when individual tool geometry is required. The methodology has been tested within the framework of a project on tooling support for the manufacturing sectors of the Republic of Kazakhstan and can be applied in the design and production of high-precision form tools.*

*Keywords: form tool, graph-analytical calculation, external processing, tool geometry, profile radius, sharpening angles.*

### Introduction

Shaped cutters are an integral element of technological equipment in mechanical engineering and other industries where the shaping of complex profile surfaces is required. Unlike standard turning tools, shaped tools allow you to form a given contour of a part in one or more passes without using additional operations, which increases productivity and processing accuracy. This is especially true when processing the outer

surfaces of rotating bodies that require high profile accuracy, such as rollers, cams, gears, pipe fittings, etc.

Modern production imposes increasingly stringent requirements on the geometric accuracy of the tool, the stability of its shape during operation and the manufacturability of manufacturing. Under these conditions, the calculation of the profile of the shaped cutter becomes a task requiring a high degree of engineering study. One of the key factors determining cutting efficiency is the geometry of the cutting part, which must precisely match the required profile of the workpiece, taking into account corrections for the geometry of the front surface, sharpening angles, radial feeds and other parameters [1-3].

There are many methods described in the literature for designing shaped cutters, among which purely graphical, analytical and combined grapho-analytical approaches can be distinguished. Graphical methods are based on constructing profile projections on planes, taking into account specified geometric parameters, and are usually performed manually on graph paper or in CAD environments. Their advantages are clarity and ease of implementation, but they are prone to inaccuracies when scaling and require a lot of experience from the designer. Analytical methods are based on a mathematical description of the surface of the part and its projection onto the cutting edge of the tool. These approaches can achieve high accuracy, but require serious calculations and are most often implemented in a software environment, which limits their use in small-scale and individual production.

Grapho-analytical methods combine the advantages of both approaches, providing a balance between accuracy and visibility. However, in existing publications, these methods are rarely adapted for shaped incisors with a rounded front surface and based in the radial direction – that is, along the so-called new baseline, which differs from the traditional tangential or cylindrical surface construction scheme. Moreover, there is no unified coordinate system and a unified calculation sequence, which makes it difficult to automate design and apply it in educational practice.

The need to develop a universal approach to the construction of a shaped circular cutter profile is especially relevant in the context of the digitalization of mechanical engineering, where CAD/CAM/CAE systems are being actively implemented and interest in automated generation of control programs for CNC machines is growing. The possibility of integrating the calculation method into the software allows not only to reduce the design time, but also to increase the accuracy and reliability of the created tools.

The present study is aimed at developing and substantiating a new method of grapho-analytical profile construction of a shaped circular cutter designed for external processing. The method is based on the introduction of a new baseline corresponding to the actual feed path of the cutter in the radial direction, as well as the use of a coordinate system that allows construction in three interconnected projections. At each stage of the proposed method, the possibility remains of both manual execution of constructions and their algorithmization with subsequent implementation in the form of software modules [3;4].

To be able to automate and reduce the time of shaped cutters calculation with the baseline, a new way of graphical and analytical shaped cutters profiling is suggested.

A new method of graphical profiling tool with round shaped front surface grinding angles is εр > 0 и εБ = εпр > 0 and the radial feed (the baseline) for external processing.

Graphic profiling shaped cutters with the baseline do not exist in the literature on the cutting tool and in shaped cutters in particular. In graph [5] there is a corrective calculation of profile shaped cutter, which is based on the determination of the radius of nodes shaped cutters through the projections between nodes on a horizontal plane. In this design the scheme is not unified, but it is strictly an individual profile for each part, which does not give a single algorithm and automate the calculation. The way of graphical and analytical calculation of the correction shaped cutters with baseline is developed. The main feature of the proposed method of calculating shaped cutters with the baseline is its consistency and the possibility to automate the calculations. Graphic profiling is simple, comprehensible and easily obtainable.

**Materials and methods**

Designing a shaped tool with a given machining contour is a task that has a long history in cutting theory and applied mechanics. The difficulty lies in the need to reproduce the exact contour of the workpiece in the form of the cutting edge of the tool, taking into account the kinematics of movement, the geometry of the front and rear surfaces, as well as the parameters of the installation and basing of the cutter on the machine.

Thus, the research is of a comprehensive nature and is aimed both at forming a scientific basis for further developments in the field of shaping tool design, and at solving specific engineering problems related to improving the accuracy, efficiency and manufacturability of cutting during exterior molding.

Despite the availability of developed methods, most of them are oriented towards processing according to a tangential (axial) scheme, when the tool is based along the axis of rotation of the part. However, with external processing based in the radial direction (along the feed), new geometric conditions appear. In particular:

– the profile of the cutter must be constructed taking into account the angle of inclination of the front surface in the radial plane;

– the shape of the cutting edge ceases to be a copy of the part in a direct projection;

– the structure of the baseline from which the construction is conducted is being changed;

– there is no single construction algorithm for variable radii and angles.

These features require a rethinking of the traditional approach and a transition to a universal technique that takes into account the features of radial profiling.

The problem of accurate and reproducible calculation of the profile of a shaped cutter remains relevant both in industrial practice and in research activities. Of particular difficulty is the design of round shaped cutters used for external machining of parts, where the profile of the cutting edge must take into account both the complex geometry of the part and the spatial arrangement of the front surface of the tool. In such a task,

classical construction methods lose their effectiveness, especially in the context of the need for automation and digitalization of calculations.

The development of an effective method for calculating the profile of a shaped cutter requires a systematic consideration of the geometric and kinematic features of the process of shaped exterior processing. The profile of the cutting edge of the cutter must ensure accurate shaping of the specified contour of the part, taking into account the front angle γ, the angle of inclination of the front surface ε and the method of bringing the cutter to the workpiece. At the same time, the rounded front surface of the shaped tool complicates the construction, since the cutting edge in space is not located in one plane, but in an inclined, turning into a curved surface.

Within the framework of the proposed approach, the profile calculation method is based on a grapho-analytical description of three key projections:

– frontal projection (front surface of the incisor);

– horizontal projection (projection of the cutting edge onto the XY plane);

– profile (lateral) projection – is not conventionally constructed, but is used to analyze the depth and direction of radial feed.

The central concept of the method is the baseline along which the cutter is fed as it radially moves towards the part. Unlike classical approaches, where projections are constructed from the point of contact on a cylindrical surface, here the baseline is a line lying in a horizontal plane passing through the axis of rotation of the part, but inclined at an angle to the front surface of the cutter. This line reflects the actual direction of movement of the cutter and serves as the basis for plotting the cutting edge trajectory.

The new method deals with three graphical profiling tool shaped projection in the position and one type of arrow K, directed at an angle γ (front corner) to the horizontal plane in the plane perpendicular to the axis of the work, along the front surface (Figure 1).

The front projection has R1, R2, R3, R4, R5, R6 – radii of nodal points of the part, numbered, started with the smallest radius. Radius R3 and R6 limit tapered portion parts.

For a graphic profile, you must first apply a baseline for front projection profiling scheme (Figure 1, lines 3-6, lying in a horizontal plane passing through the axis of details, which coincides with the cone part). After this, the graphical profiling shaped cutter begins. For systematization graphical profiling is divided into 12 steps.

Step one. There are points 3’and 6’, limiting the baseline for a K. For this the points 3 and 6 on the front of the projection angle γ (the arrow K) are held the line with arrows marked № 1 in the circle until receiving the point 3 ‘ and 6 ‘in the form of K at the intersection of lines with arrows one with the boundaries of steps details.

Step two. The length of points 3’-6 ‘extends to both sides (left and right to form K) to obtain the extreme points of the blade shaped cutter 1’ and 5 ‘. The resulting segment 1’-5 ‘(straight line) - the projection of complex shaped cutter blade to form K, which coincides with the trace of the front surface of the tool perpendicular to the front surface of the plane. Points 1’, 2’, 3’, 4’, 5’, 6’ – the points received at the intersection of the front surface of the respective boundaries of profile shaped cutter stages. These are key points to the point K. Lines of the second step graphic profiling are indicated by arrows with the number 2 in the form of a circle on K. The position of the W’ and 6’

εpr determines the angle - the angle along the anterior surface of the shaped cutter with baseline. Angle = εp εpr defined graphically and analytically confirmed by calculating the profile corrective tool.

Step three. Points 1 ‘and 5’ held the line, parallel lines with arrows 1, in the opposite direction to its intersection with the circle drawn through the respective nodal point, to get the points 1 and 5 on the front projection scheme profiling. The third step is indicated by lines and arrows with the number 3 in the circle.

Step four. Through the points 3 and 6 on the front projection the lines are shown, parallel lines, numbered 1 and 3 (angle γ) to the intersection with the circle of radius r1, 2 and r4, 5 to get points 2 and 4. These two lines and arrows marked with 4 in a circle.

Step five. Points 1 and 2, and 4 and 5, respectively are connected by circular arcs of radii r1, 2 and r4, 5. After the fifth step of the complex projection edge 1-2-3-6-4-5 shaped blade is obtained on the front of the plane. The fifth step is marked with 5 in the circle.

Step six- radii shaped cutter defining. Minimum outside radius shaped cutter is determined by the depth of the profile parts (Δri) by [5]. Structurally, the outer radius shaped cutters (R1) can be increased to improve the relations of its parameters. After determining the R1 center is shaped cutters on line lying on the value of H above the axis parts – OI. Distance from OI to points 2, 3, 4, 5, 6 is determined graphically by the scale and increasing circle of radius R1, R2, R3, R4, R5, R6. The sixth step is denoted by the number 6 in the circle. The remaining steps are intended to build the rest of the projections of cutting edges shaped cutter.

Step seven. Points 1, 2, 4, 5 of front view horizontal lines are shown to determine points 1’’, 2’’, 4’’, 5’’ on the front projection by crossing lines with arrows 7 in terms of the boundaries of the same level of shaped cutter.

Step eight. Point 1 is connected to the point’’ 2’’, 4’’ point is connected to the point 5’’ - produced blades 1 -2’’ and’’ 4’’ -5’’ extreme levels shaped cutter. The eighth step of the construction is marked by arrows with the number 8 in the circle.

Step nine. Points 3 and 6 of the front projection indicate horizontal lines (combined into one) for the segment 3’’ - 6’’ (baseline projection on the frontal plane). Ninth step is marked line number 9 in a circle with two lines out of two lines overlapping.

Step ten. Points 4’’ and 6’’, 2’’ and Z’’ are connected. Complex cutting edge shaped cutters projection is obtained on the front of the plane: 1’’ -2’’ W’’ -6’’ -4’’ -5’’. Tenth step (lineation 4’’ -6’’ and 2’’ W’’) is tagged with 10 in a circle.

Step eleven. Points 1, 2, 3, 4, 5, 6 of the front projection held vertical lines marked with number 11 in a circle, crossing the nodal points of the projection on the horizontal plane of the blade and points 1’’ ‘, 2’’’ 3’’ ‘, 4’’’, 5’’ ‘, 6’’’ complex cutting edge shaped cutters are situated on its horizontal projection.

Step twelve. Points 1’’ ‘and 2’’’, 2’’ ‘and 3’’’, 3’’ ‘and 6’’’, 4’’ ‘and 5’’’ are connected with arrows marked No. 12 in the circle. Projection edge shaped cutters is obtained on its horizontal projection: 1’’ ‘-2’’’ W’’ ‘-6’’’ -4’’ ‘-5’’’.

Note: 1. Cutting edge shaped cutters in front of the plane with the slope = εB εpr relative to the cylinder parts (horizontal plane), the line of the ellipse corresponds (the

section of the cylinder inclined plane). Cutting edge of the tool needs to be shaped in cross-section elliptical concave. To ensure these conditions in the cutting zone and produce a given cylinder on the details of the final grading shaped cutter disc should be done (finger) polished circle with a radius equal to the radius of the cylindrical section details the installation of the grinding wheel axis of the front face shaped cutter angle = εB εpr. In this case, theoretical accuracy is provided and error is made. However, it is not always possible to choose a given grinding wheel diameter (radius). Therefore, another way to form the cutting edge of the blade is shaped cutters of grinding disk around any diameter, profiled in accordance with the calculation that there is virtually no way of error profiling. When calculating shaped cutters on the cutting edge a number of points are selected with an interval between them along the axis of the tool (details). Corresponding radii shaped tool for these points are calculated on the following methods for nodal points 1, 2, 4 and 5.

2. Graphic evaluation of the accuracy of profiling. When using a drawing tool you can guarantee the accuracy of graphic constructions within 1mm. To increase the accuracy of the scale the most possible increase is used. At a scale of 20:1 accuracy is determined by the radius within 1 mm 20 = 0.05 mm. At a scale of 10:1 - 1 mm, respectively: 10 = 0.1 mm. In some cases, this can be quite accurate. If accurate, achievable graphical profiling is not sufficient, it is necessary to perform an analytical calculation of the profile.

3. Copyright of analytical (correctional) calculation of the round shaped cutter profile with a new baseline. After doing graphic profiling (or not) design model is built for shaped cutter analytical calculation.

**Results and discussion**

For clarity and easiness of automation calculation of it is divided into seven steps (stages) – Figures 2 and 3.

Step one. Definition of projection distances from profile nodes shaped cutters on the front surface to the axial plane of the details, parallel to the front surface, and the distance projection between nodes in the axial plane of the shaped cutter perpendicular to the direction of radial sharpening front surface (Figure 2).

Projection 1 - 2 = 1 ‘- 2’ = 1 ‘- 3’ = L3 - 3 ‘= $\boldsymbol{\ell_3^u\ tg\ \varepsilon_П}$;

Projection 2’-4 ‘= 3’ - 4 ‘= 2’ - 6 ‘= 3’ - 6 ‘= L4 - 6’ = $\boldsymbol{\ell_2^u\ tg\ \varepsilon_П}$;

Projection 4 ‘- 5’ = 6 ‘- 5’ = L5 - 5 ‘= $\boldsymbol{\ell_1^u \cdot tg\ \varepsilon_П}$;

Projection D3 - 3 = D2 - 2 = O1 ‘-3’ = O1 ‘- 2’ = $\boldsymbol{r_3 \cdot \sin\gamma}$;

Projection D1 - 1 = O1 ‘- 1 = (O1’ - 2’) - (1’ - 2’) = (O1’ - 3’) - (1’ - 3’) = $\mathbf{r_3\ \sin\gamma - \ell_3^u\ tg\ \varepsilon_п}$;

Projection

$$\mathbf{D_5 - 5} = O_1' - 5' = (1' - 5') + (O_1' - 1') = (L_3 - 3') + (L_4 - 4') + (L_5 - 5') + (r_3 \sin\gamma - \ell_3^u \cdot tg\ \varepsilon п) = (\ell_1^u + \ell_2^u + \ell_3^u)\ tg\ \varepsilon_п + r_3\ \sin\gamma - \ell_3^u\ tg\ \varepsilon_п = \mathbf{(\ell_1^u + \ell_2^u) tg\ \varepsilon_п + r_3 \sin\gamma};$$

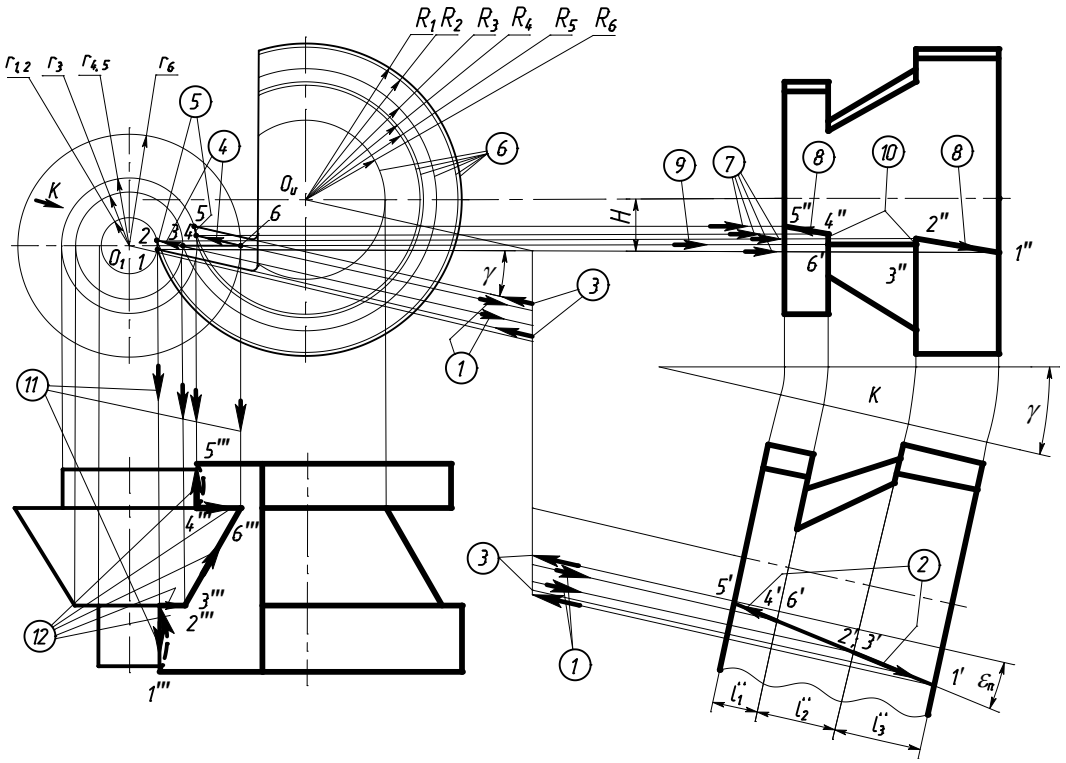



Figure 1 – Copyright of a graphical profiling round shaped cutter with a new baseline

Projection $\mathbf{D_4 - 4} = \mathbf{D_6 - 6} = (O_1' - 1') + (1' - 4') = (O_1' - 1') + (1' - 6') =$
$= r_3 \sin\gamma - \ell_3^u \cdot tg\ \varepsilon\pi + (\ell_3^u + \ell_2^u)\ tg\ \varepsilon n = \boldsymbol{r_3\ \sin\gamma + \ell_2^u\ tg\ \varepsilon_п}$

Or

$\mathbf{Д_6 - 6} = \boldsymbol{r_6\ \sin\gamma}$, which is easier;

Projection $\mathbf{E_г - 5'} = (E_г - 4') - (4' - 5') = (E_г - 6') - (5' - 6') = B_6\ tg\gamma - (4' - 5') = B_6\ tg\gamma - (5' - 6') = \mathbf{B_6\ tg\gamma - \ell_1^u\ tg\ \varepsilon_п}$.

$\ell_1^u$, $\ell_2^u$, $\ell_3^u$ – axial dimensions of the shaped incisors profile on the extreme levels should take into account additional cutting edges.

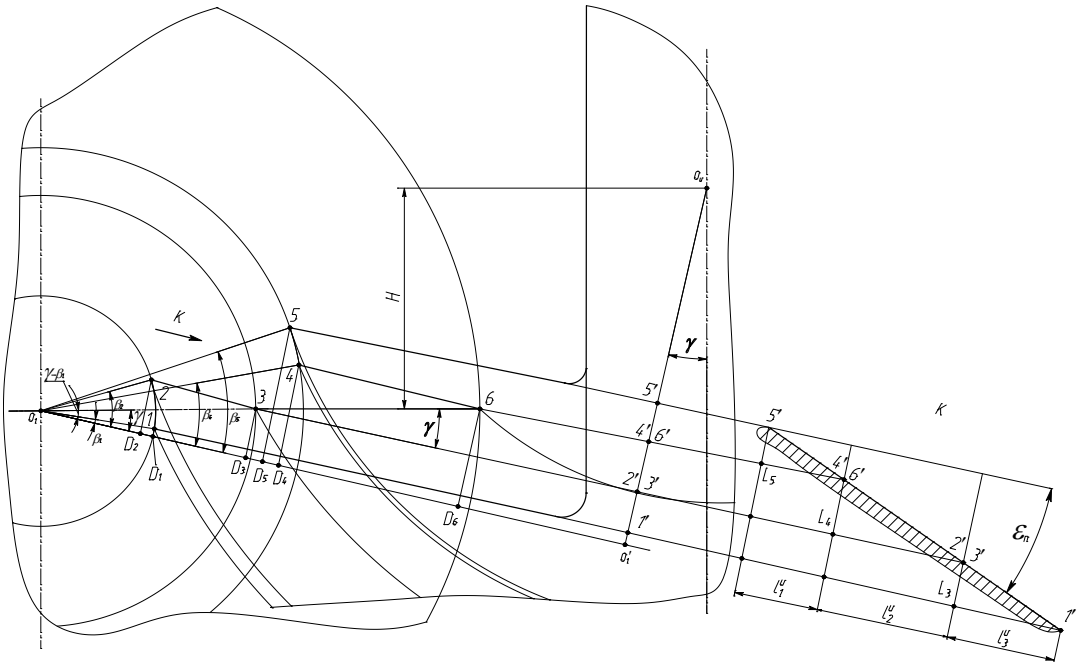



Figure 2 – Diagram of analytical profiling round shaped cutter with a new author's baseline method with intermediate linear and angular design parameters

Note: The size of the B6 see in «step five».

Thus, the projections of the distances to the front plane of the nodal points not lying on the baseline, defined in terms of axial dimensions and angle of the front surface of εp along the blade. The above is a projection of nodal points on the baseline, defined in terms of their radii (details) and rake angle γ.

Step two. Definition of intermediate angular parameters βi (Figure 2) to calculate the size of the auxiliary $A_i$ (Figure 3).

$\mathrm{Sin}\beta_1 = (D_1 - 1)/r_1 = (O_1' - 1')/r_1 = (r_3 \sin\gamma - \ell_3^u \operatorname{tg}\varepsilon_п)/r_1;$
$\mathrm{Sin}\beta_2 = (D_2 - 2)/r_2 = (O_2' - 2')/r_2 = (r_3 \sin\gamma)/r_2;$

Angular parameters for the baseline points: $\boldsymbol{\beta_3 = \gamma}$, $\boldsymbol{\beta_6 = \gamma}$;

$\mathrm{Sin}\beta_4 = [(D_4 - 4) = (D_6 - 6) = (O_1' - 4')]/r_4 = (r_3 \sin\gamma + \ell_2^u \operatorname{tg}\varepsilon_п)/r_4;$

$\mathrm{Sin}\beta_5 = [(D_5 - 5) = (O_1' - 5')]\, r_5 = (r_3 \sin\gamma + (\ell_1^u + \ell_2^u)\operatorname{tg}\varepsilon_п)/r_5;$

Step three. Definition of subsidiary linear parameters Ai (Figure 3).

$A_1 = r_1\cos\beta_1$;
$A_2 = r_2\cos\beta_2$;
$A_3 = r_3\cos\gamma$;
$A_4 = r_4\cos\beta_4$;
$A_5 = r_5\cos\beta_5$;
$A_6 = r_6\cos\gamma$.

Step Four. Definition of subsidiary linear parameters $C_i$.
$C_2 = A_1 - A_2 = r_1\cos\beta_1 - r_2\cos\beta_2$;
$C_3 = A_3 - A_1 = r_3\cos\beta_3 - r_1\cos\beta_1$;
$C_4 = A_4 - A_1 = r_4\cos\beta_4 - r_1\cos\beta_1$;
$C_5 = A_5 - A_1 = r_5\cos\beta_5 - r_1\cos\beta_1$;
$C_6 = A_6 - A_1 = r_6\cos\beta_6 - r_1\cos\beta_1$.

Step Five. Definition of subsidiary linear parameters $\mathbf{B_i}$. To do this, the outer radius is determined by the smallest shaped cutters $R_1 = f(\Delta r_i)$ as a function of the depth profile of the details. If necessary, it can be increased.
$B_1 = R_1\cos\varepsilon_1$;
$B_2 = B_1 + C_2$;
$B_3 = B_1 - C_3$;
$B_4 = B_1 - C_4$;
$B_5 = B_1 - C_5$;
$B_6 = B_1 - C_6$.

Step six. Definition of subsidiary angular parameters εi.

$\sin\varepsilon_1 = (O_u\text{-}1')/R_1$; или $\operatorname{tg}\varepsilon_1 = (O_u\text{-}1')/B_1$; **$\varepsilon_1 = \text{arc sin}[(O_u\text{-}1')/R_1]$;**
**$\varepsilon_1 = \text{arc tg}[(O_u\text{-}1')/B_1]$;**
$\operatorname{tg}\varepsilon_2 = [(O_u\text{-}1') - (1'\text{-}2')]/B_2 = (O_u\text{-}2')/B_2$; **$\varepsilon_2 = \text{arc tg}[(O_u\text{-}2')/B_2]$**;
$\operatorname{tg}\varepsilon_3 = [(O_u\text{-}3') = (O_u\text{-}2')]/B_3 = (O_u\text{-}3')/B_3$; **$\varepsilon_3 = \text{arc tg}[(O_u\text{-}3')/B_3]$**;
$\operatorname{tg}\varepsilon_4 = [(O_u\text{-}1') - (1'\text{-}4')]/B_4 = (O_u\text{-}4')/B_4$; **$\varepsilon_4 = \text{arc tg}[(O_u\text{-}4')/B_4]$**;
$\operatorname{tg}\varepsilon_5 = [(O_u\text{-}1') - (1'\text{-}5')]/B_5 = (O_u\text{-}5')/B_5$; **$\varepsilon_5 = \text{arc tg}[(O_u\text{-}5')/B_5]$**;
$\operatorname{tg}\varepsilon_6 = [(O_u\text{-}1') - (1'\text{-}6')]/B_6 = (O_u\text{-}6')/B_6$; **$\varepsilon_6 = \text{arc tg}[(O_u\text{-}6')/B_6]$**;

Step seven. Determination of the profile shaped cutters nodes radii $\mathbf{R_i}$.

$\mathbf{R_1}$ is selected depending on the depth of the profile details.
$\mathbf{R_2} = B_2/\cos\varepsilon_2$; $\mathbf{R_2} = [(O_u\text{-}1') - (1'\text{-}2')]/\sin\varepsilon_2 = (O_u\text{-}2')/\sin\varepsilon_2$;
$\mathbf{R_3} = B_3/\cos(\varepsilon_3 = \gamma)$; $\mathbf{R_3} = (O_u\text{-}3')/\sin\varepsilon_3$;
$\mathbf{R_4} = (O_u\text{-}4')/\sin\varepsilon_4 = [(O_u\text{-}E_r) + (E_r\text{-}4')]/\sin\varepsilon_4 = B_4/\cos\varepsilon_4$;
$\mathbf{R_5} = (O_u\text{-}5')/\sin\varepsilon_5 = [(O_u\text{-}E_r) + (E_r\text{-}5')]/\sin\varepsilon_5 = B_5/\cos\varepsilon_5$;
$\mathbf{R_6} = (O_u\text{-}6')/\sin\varepsilon_6 = [(O_u\text{-}E_r) + (E_r\text{-}6')]/\sin\varepsilon_6 = B_6/\cos\varepsilon_6$;

All cutter parameters are calculated.

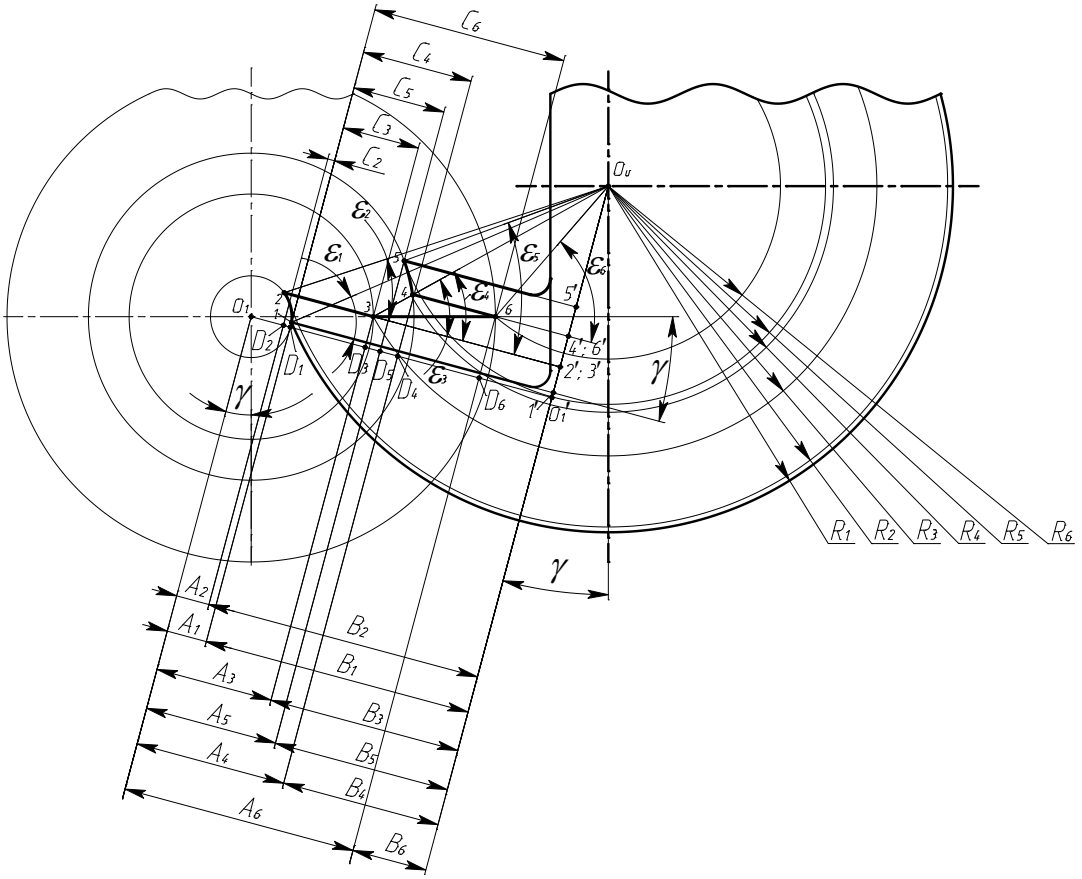



Figure 3 – Copyright of analytical profiling round shaped cutter with a new baseline way – intermediate size $A_i$, $C_i$, $B_i$ and the required cutter radius $R_i$

The proposed grapho-analytical method provides sufficient accuracy for practical application both in manual design and in the framework of automated engineering systems. Due to step-by-step control, the availability of formulas and the possibility of double verification (graphical and analytical), the method can be considered reliable and reproducible.

Errors are minimized when using scales from 10:1 and higher, as well as when implementing calculations in digital form. The method has the potential to be further expanded and adapted to more complex tool profiling tasks.

One of the significant advantages of the proposed grapho-analytical method is its high degree of algorithmization, which opens up broad prospects for automating the design processes of shaped round cutters. Modern trends in the digitalization of mechanical engineering require a transition from manual and visual approaches to formalized, digital methods with the possibility of integration into CAD/CAM/CAE class software products [6–10].

Automation of the calculation and construction of the profile of the shaped cutter allows:

– reduce the design time by 5–10 times;
– eliminate manual construction errors;
– increase the repeatability of the result;
– integrate settlements into corporate digital chains (PLM, MES);
– to train students on modern engineering platforms.

In this paper, a grapho-analytical method for calculating the profile of shaped circular cutters for external machining is proposed and justified in detail, based on the construction of three interconnected projections and the introduction of a new baseline corresponding to the direction of radial tool feed. The developed approach combines the clarity of graphical construction and the accuracy of analytical calculations, which allows it to be used both in engineering practice and in educational and scientific activities.

The study showed that traditional methods of profiling incisors either oversimplify geometry or require complex mathematical transformations. The proposed method ensures reproducibility, consistency and automation, and also allows you to take into account the most important parameters – the front angle γ, the angle of inclination of the front surface ε, the radii of the nodal points, interval displacements, as well as the shape of the cutting edge in space.

The methodology was formalized as a sequential algorithm, adaptable for implementation in the CAD/CAM environment and mathematical programs such as MathCAD, MATLAB, Python, Excel/VBA. A step-by-step graphical algorithm of 12 stages and an analytical part of 7 computational steps allow you to create an accurate geometry of the shaped cutter, suitable for building 2D and 3D models.

Using a specific example, the implementation of the method is demonstrated, its accuracy and operability are confirmed. Error analysis showed that even with manual construction on a 10:1 scale, the profiling accuracy falls within ± 0.1 mm, and with digital implementation – up to ± 0.02 mm.

Special attention is paid to the possibility of integrating the method into engineering education: the developed methodology can be successfully used in courses on cutting theory, tool design and digital engineering. The directions of application of the method in industry are also defined: in the manufacture and restoration of shaped cutters, the development of grinding profiles and the creation of databases of standard tools.

**Financing information**

The research was carried out within the framework of program-targeted financing of subjects of scientific and/or scientific and technical activities for 2024–2026 under the IRN project BR24993003 «Development of a set of measures for instrumental support of manufacturing sectors of the Economy of the Republic of Kazakhstan», funded by The Science Committee of the Ministry of education and science of the Republic of Kazakhstan.

**Conclusions**

Thus, the proposed grapho-analytical method has the following advantages:
– provides high accuracy and visibility;
– suitable for manual and automated design;
– easily integrated into CAD/CAM platforms;

– suitable for creating unique and standard profiles;

– supports the standards of engineering education and digital production.

The technique opens up opportunities for further development: automatic profile optimization, adaptation to 5-axis machining, tool wear accounting, integration with the modules of the digital twin of the tool and the technological process.

REFERENCES

1 **Солнцева, В. Д.** Проектирование резцов со сменными многогранными пластинами для обработки деталей фасонного профиля [Текст] // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2018. – № 6. – С. 48–51.

2 **Катаев, Ю. П., Салин, А. В.** Проектирование призматических фасонных резцов [Текст] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2005. – № 2. – С. 14–15.

3 **Можегова, Ю. Н., Князева, И. А.** Автоматизированное проектирование инструмента для изготовления изделий машиностроения [Текст] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 6. – С. 33–37.

4 **Касенов, А. Ж., Маздубай, А. В., Итыбаева, Г. Т. и др.** Дөңгелек пішінді кескіштерді параметрлеу [Текст] // Труды университета. – 2021. – № 3 (84). – Р. 37–41. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_3_37.

5 **Kassenov, A. Zh., Yanyushkin, A. S., Mazdubay, A. V., Iskakova, D. A., Yevtushenko, T. L.** Design of shaped cutters [Текст] // Science and technology of Kazakhstan. – 2021. – № 3. – P. 27–34. – https://doi.org/10.48081/XQGQ2851

6 **Паринов, А. В., Пачевский, Д. Е.** Автоматизация проектирования технологического процесса изготовления фасонных резцов [Текст] // Интеллектуальные информационные системы : труды Всероссийской конференции, 19–20 июня 2008 г. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2008. – С. 54–55.

7 **Бухарева, С. С., Жиляев, С. В.** Алгоритм проектирования круглых фасонных резцов в CAD/CAM системах [Текст] // Вестник КИГИТ. – 2014. – № 2 (44). – С. 64–67.

8 **Шамков, Н. А., Гусаров, А. М., Климентьев, А. Л.** Проектирование фасонных резцов средствами Autodesk Inventor [Текст] // Материалы докладов 48 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 50-летию университета : в 2 т., 29 апреля 2015 года. Т.2. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2015. – С. 357–359.

9 **Искакова, Д. А., Евтушенко, Т. Л.** Проектирование круглых фасонных резцов в Компас 3D [Текст] // Интеграция науки и практики в современных условиях: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Прага, 30 сентября 2021 года. – Нефтекамск : Научно-издательский центр «Мир науки», 2021. – С. 29–33.

10 **Ромашев, А. Н., Овчаренко, А. Г., Смирнов, В. В., Фирсов, А. М.** Проектирование фасонных резцов в графической среде [Текст] // Инновации

в машиностроении : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, 24–26 октября 2018 года. Барнаул : Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2018. – С. 212–216.

REFERENCES

1 **Solntseva, V. D.** Proyektirovaniye reztsov so smennymi mnogogrannymi plastinami dlya obrabotki detaley fasonnogo profilya [Design of cutters with replaceable multi-faceted plates for processing shaped profile parts] [Text] // Automated design in mechanical engineering. – 2018. – № 6. – P. 48–51.

2 **Katayev, Yu. P., Salin, A. V.** Proyektirovaniye prizmaticheskikh fasonnykh reztsov [Design of prismatic shaped cutters] [Text] // Bulletin of the Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev. – 2005. – № 2. – P. 14–15.

3 **Mozhegova, Yu. N., Knyazeva, I. A.** Avtomatizirovannoye proyektirovaniye instrumenta dlya izgotovleniya izdeliy mashinostroyeniya [Automated design of tools for the manufacture of mechanical engineering products] [Text] // Assembly in mechanical engineering, instrument making. – 2015. – № 6. – P. 33–37.

4 **Kasenov, A. Zh., Mazdubai, A. V., Itybayeva, G. T. et al.** Döñgelek pişindi keskişterdi parametrlew [Parameterization of circular cutters] [Text] // University Proceedings. – 2021. – № 3 (84). – P. 37–41. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_3_37.

5 **Kassenov, A. Zh., Yanyushkin, A. S., Mazdubay, A. V., Iskakova, D. A., Yevtushenko, T. L.** Design of shaped cutters [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2021. – № 3. – P. 27–34. – https://doi.org/10.48081/XQGQ2851

6 **Parinov, A. V., Pachevskiy, D. Ye.** Avtomatizatsiya proyektirovaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya fasonnykh reztsov [Automation of design of technological process of manufacturing of shaped cutters] [Text] // Intelligent information systems: works of the All-Russian conference, June 19–20, 2008. – Voronezh : Voronezh State Technical University, – 2008. – P. 54–55.

7 **Bukhareva, S. S., Zhilyayev, S. V.** Algoritm proyektirovaniya kruglykh fasonnykh reztsov v CAD/CAM sistemakh [Algorithm of designing round shaped cutters in CAD/CAM systems] [Text] // Bulletin of KIGIT. – 2014. – № 2 (44). – P. 64–67.

8 **Shamkov, N. A., Gusarov, A. M., Kliment'yev, A. L.** Proyektirovaniye fasonnykh reztsov sredstvami Autodesk Inventor [Design of shaped cutters using Autodesk Inventor] [Text] // Proceedings of the 48th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students Dedicated to the 50th Anniversary of the University: in 2 volumes, April 29, 2015. – Vol. 2. – Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2015. – P. 357–359.

9 **Iskakova, D. A., Yevtushenko, T. L.** Proyektirovaniye kruglykh fasonnykh reztsov v Kompas 3D [Design of round shaped cutters in Kompas 3D] [Text] // Integration of science and practice in modern conditions: Proceedings of the International (correspondence) Scientific and Practical Conference, Prague, September 30, 2021. – Neftekamsk : Scientific and Publishing Center «World of Science», 2021. – P. 29–33.

10 **Romashev, A. N., Ovcharenko, A. G., Smirnov, V. V., Firsov, A. M.** Proyektirovaniye fasonnykh reztsov v graficheskoy srede [Design of shaped cutters in a graphical environment] [Text] // Innovations in mechanical engineering: collection of works of the IX International scientific and practical conference, October 24–26, 2018. Barnaul : Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2018. – P. 212–216.

Received 15.08.25.
Received in revised form 15.08.25.
Accepted for publication 19.08.25.

***Б. К. Кайролла[1], Б. Н. Абсадыков[2], А. Ж. Касенов[3],***
****А. В. Маздубай[4], Х. Макхамов[5]***
[1]Қазақстан ғылым және технологиялар институты,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3,4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[5]Нортумбрия университеті, Ұлыбритания, Ньюкасл қ.
15.08.25 ж. баспаға түсті.
15.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## СЫРТҚЫ ӨҢДЕУГЕ АРНАЛҒАН ФАСОНДЫ ДӨҢГЕЛЕК КЕСКІШТЕРДІҢ ПРОФИЛІН ЕСЕПТЕУ

*Бұл мақалада сыртқы өңдеуге арналған фасонды дөңгелек кескіштердің профилін графо-аналитикалық тәсілмен есептеудің авторлық әдісі ұсынылады. Бұл әдіс есептеулерді жүйелеу және автоматтандыру мүмкіндігімен ерекшеленеді. Қолданыстағы тәсілдерден айырмашылығы, жаңа әдіс дөңгелек пішінді алдыңғы беті бар кескіштің профилін графикалық салулар мен аналитикалық формулалар арқылы есептеуге мүмкіндік береді. Әдіс кескіш профилінің үш проекциясын салу және негізгі әрі қосалқы геометриялық параметрлерді – ε және β бұрыштары, $A_i$, $B_i$, $C_i$ сызықтық шамалары мен $R_i$ радиустарын есептеуге негізделген. Графикалық бөлім 12 кезеңнен тұратын нұсқаулық түрінде ұсынылған, оған базалық сызықты салу, тораптық нүктелерді табу және фасонды кескіш жиегінің профилін қалыптастыру кіреді. Аналитикалық бөлім жеті кезеңнен тұрады және жобаланатын қашықтықтар, көлбеу бұрыштар мен кескіш радиустарын анықтау формулаларын егжей-тегжейлі сипаттайды. Ұсынылған әдіс жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді және қолмен де, бағдарламалық құралдарды қолдану арқылы да жүзеге асырылады, әсіресе құралдың жеке геометриясын қажет ететін жағдайларда тиімді. Әдістеме Қазақстан Республикасының өндірістік салаларын құралдық қамтамасыз ету жобасы аясында апробациядан өтті және жоғары дәлдікті фасонды кескіштерді жобалау мен дайындауда қолдануға болады.*

*Кілтті сөздер: фасонды кескіш, графо-аналитикалық есептеу, сыртқы өңдеу, құрал геометриясы, профиль радиусы, қайрау бұрыштары.*

***Б. К. Кайролла[1], Б. Н. Абсадыков[2], А. Ж. Касенов[3],***
****А. В. Маздубай[4], Х. Макхамов[5]***
[1]Казахстанский институт науки и технологий,
Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[5]Университет Нортумбрии, Великобритания, г. Ньюкасл.
Поступило в редакцию 15.08.25.
Поступило с исправлениями 15.08.25.
Принято в печать 19.08.25.

## РАСЧЁТ ПРОФИЛЯ ФАСОННЫХ КРУГЛЫХ РЕЗЦОВ ДЛЯ НАРУЖНОЙ ОБРАБОТКИ

*В данной статье предложен авторский метод графо-аналитического профилирования фасонных круглых резцов для наружной обработки, отличающийся возможностью систематизации и автоматизации расчетов. В отличие от существующих подходов, новый метод позволяет рассчитывать профиль резца, имеющего фронтальную поверхность с круглыми формами, используя как графические построения, так и аналитические формулы. Метод основан на построении трех проекций профиля резца и расчете основных и вспомогательных геометрических параметров, таких как углы $\varepsilon$ и $\beta$, а также линейные параметры $A_i$, $B_i$, $C_i$ и радиусы $R_i$. Графическая часть метода представлена в виде пошаговой инструкции из 12 этапов, включающей построение базовой линии, нахождение узловых точек и формирование профиля фасонной кромки. Аналитическая часть расчета включает семь этапов, в которых детализированы формулы определения проектируемых расстояний, углов наклона и радиусов резца. Предложенный метод обеспечивает высокую точность и может быть реализован как вручную, так и с применением программных средств, особенно в условиях необходимости индивидуальной геометрии инструмента. Методика апробирована в рамках проекта по инструментальному обеспечению производственных отраслей экономики Республики Казахстан и может быть использована при проектировании и изготовлении высокоточных фасонных резцов.*

*Ключевые слова: фасонный резец, графо-аналитический расчёт, наружная обработка, геометрия инструмента, радиус профиля, углы заточки.*

SRSTI 55.19.03

https://doi.org/10.48081/LMGF9953

***B. Kozhageldiyev[1], *A. Zh. Taskarina[2], Zh. K. Mussina[3], A. Zhankeldi[4], N. A. Bazhaev[5]***

[1,4,5]K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Republic of Kazakhstan, Almaty

[2,3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9094-3015

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2613-8799

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2233-4947

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8174-4209

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8601-0688

*e-mail: aya_taskarina@mail.ru

## *INCREASING THREAD CUTTING PRODUCTIVITY WITH A COMBINED TOOL*

*The article discusses increasing the productivity of thread cutting on a CNC lathe using a combined tool – a comb-type cutter. The tool consists of several consecutively arranged cutting teeth that provide sequential boring and thread cutting, combining roughing and finishing operations in a single pass.*

*Experimental studies were carried out on St20 steel blanks with a diameter of 30 mm. The cutting speed ranged from 40 to 70 m/min, the feed from 0.12 to 0.18 mm/rpm. At the same time, the thread processing time was reduced from 60 seconds (traditional chisel) to 32 seconds (comb cutter). The wear of the cutting edges under optimal conditions was 0.18 mm, which is 28 % less than with a classic tool. The quality of the thread profile corresponds to GOST 24705-81 with a surface roughness of no more than Ra 1.6 microns.*

*The comb cutter reduces vibrations and ensures uniform load distribution between the teeth, which increases tool life and processing stability. The recommended optimal modes are a speed of 60 m/min, a feed of 0.15 mm/rpm.*

*This technology makes it possible to increase threading productivity by 40–47 %, reduce cost and increase tool life, which makes it promising for mass production.*

*Keywords: comb cutter, threading, combined tool, productivity, cutting modes, tool wear, thread quality, metalworking.*

### Introduction

Thread cutting is a complex and critical operation, especially when machining parts made of carbon steels. The traditional method involves separate roughing and finishing operations using different tools, which requires significant time (up to 60 seconds per operation) and leads to rapid tool wear due to load concentration.

Increasing the productivity of thread cutting with a combined tool is achieved by combining several operations into a single tool. For example, a drill-tap allows drilling and thread cutting to be performed in a single operation [1; 2; 3].

Productivity can also be improved by using combined cutting–forming taps. These tools have cutting teeth and forming protrusions, allowing the combination of cutting and plastic deformation elements in thread machining [4; 5].

The author's work [6] focuses on increasing the productivity of external thread cutting on high-strength materials by increasing the tool tip radius to the maximum allowable value, which, according to calculations, can increase productivity by up to 1.64 times while maintaining accuracy.

Errors in the kinematic process of thread cutting can be combined with tool and tool setup errors, geometric inaccuracies of the machine tool, and workpiece mounting errors [1; 3; 5].

Thread cutting is performed using threading tools of both domestic and imported manufacture, as well as various designs of combined threading tools [7; 8; 9].

**Materials and methods**

The development of a combined two-stage metal-cutting tool for internal thread cutting is based on the task of integrating boring and threading operations into a single technological pass. This approach makes it possible to reduce accumulated errors that occur during repeated workpiece setups and to ensure higher thread profile quality.

The combined tool consists of two functional zones:

– first stage – a boring section that forms a cylindrical hole with high diameter accuracy and minimal axis runout.

– second stage – a threading comb that directly forms the internal thread profile in a single pass.

Between the first and second stages, there is a finishing section with a width b equal to 0.5–1.0 of the thread pitch, with a main cutting edge angle in plan $\alpha = 0°$, which ensures surface smoothing and eliminates transition marks between operations.

The main calculated geometric parameters of the tool are:

$\varepsilon_{гр}$ – profile angle of the thread being cut;

$S_0$ – axial feed per revolution, equal to the thread pitch;

$D_p$ – major diameter of the thread being cut;

$H_p$ – profile height;

$\varphi_p$ – principal cutting edge angle of the boring section;

$\varphi_{1p}$ – auxiliary cutting edge angle.

The profile calculation is carried out using standard thread metrology formulas, taking into account the allowance remaining after boring:

$$H_p = \frac{\sqrt{3}}{2} \times P$$

where P – the thread pitch, $D_m$ – the mean diameter, $D_m = D_p - H_p$

Advantages of the proposed design:

- elimination of additional workpiece clamping;
- reduction of cycle time by 20–30%;
– decreased cutting edge wear due to optimized load distribution between stages;
– improved thread joint tightness by reducing structural and technological clearances.

The comb-type tool, consisting of 3–4 sequentially arranged cutting teeth, enables single-pass thread cutting, reducing cycle time to 32 seconds and lowering the load on each tooth. This increases tool life and improves machining quality, as confirmed by experimental data.

**Results and discussion**

A scheme for cutting an internal thread with a combined two-stage tool has been developed, as shown in Figure 1 [10].

In Figure 1: 1 – workpiece; 2 – metal-cutting tool; $\omega_0$ – rotational motion of the workpiece or the tool; εгр – profile angle of the thread being cut, equal to 60°; $S_0$ – axial feed per revolution, equal to the pitch of the thread being cut; Dp – major diameter of the thread being cut, mm; Lз – workpiece length; b – length of the finishing section of the boring tool cutting edge, with a principal cutting edge angle of zero; $\varphi_p$ – principal cutting edge angle of the boring cutter; $\varphi_1$p – auxiliary cutting edge angle of the cutter; $H_p$ – height of the thread profile being cut.

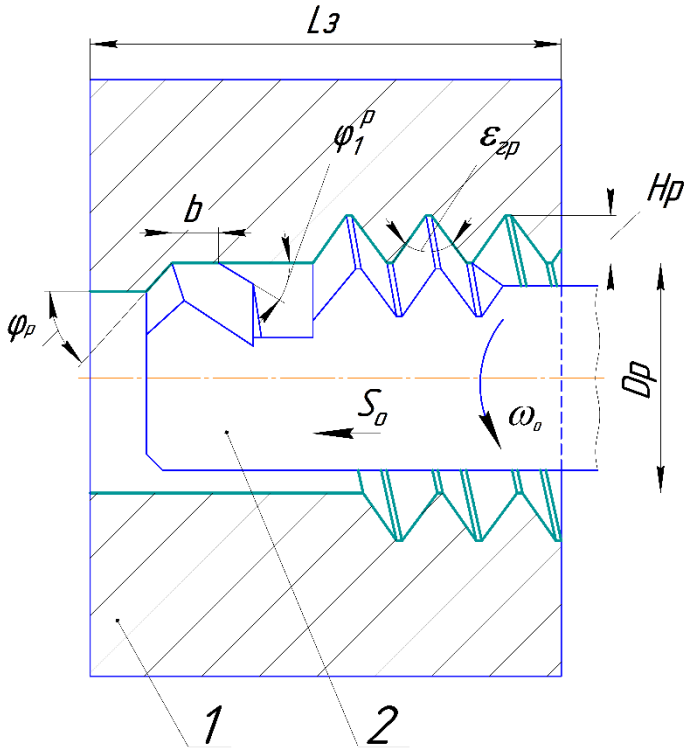



Figure 1 – Scheme of internal thread cutting with a comb-type tool

The analysis of thread-cutting designs and methods has led to the development of a new combined two-stage metal-cutting tool – the comb-type cutter (Figure 2).

Figure 2 – Design of the comb-type cutter

Design and geometry of the comb-type cutter:
– number of teeth: 4;
– tooth profile height: 2 mm;
– cutting edge rounding radius: 0.12 mm;
– tooth inclination angle: 15°.

Experimental studies were carried out on a CNC lathe with a positioning accuracy of ±0.005 mm using workpieces made of steel grade St20, diameter 30 mm, length 100 mm, thread type M20×2, and a threaded section length of 40 mm.

The cutting modes and the results of the experimental studies are presented in the table.

Table 1

| № | Cutting speed, V (m/min) | Feed rate, f (mm/rev) | Spindle speed, n (rpm) | Cutting time, t (s) | Tool wear, VB (mm) | Surface roughness, Ra (μm) | Compliance with GOST |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 40 | 0,12 | 318 | 45 | 0,15 | 1,2 | Yes |
| 2 | 50 | 0,14 | 398 | 38 | 0,16 | 1,3 | Yes |
| 3 | 60 | 0,15 | 478 | 32 | 0,18 | 1,4 | Yes |
| 4 | 70 | 0,18 | 559 | 29 | 0,22 | 1,6 | Partially |

The use of a comb-type cutter reduces thread cutting time from 60 seconds (traditional single-tooth cutter) to 29–32 seconds under optimal conditions. This reduction is achieved by combining multiple passes into one, eliminating setup change stages, and providing more uniform load distribution on the tool.

At a cutting speed of 60 m/min and a feed of 0.15 mm/rev, cutting edge wear was 0.18 mm, which is 28 % lower than that of a conventional cutter under the same conditions (0.25 mm). Uniform load distribution between the teeth reduces localized wear and vibration.

The thread profile meets GOST 24705-81, and the surface roughness Ra does not exceed 1.6 μm, improving the operational performance of the connections. A smooth transition between the roughing and finishing sections of the comb cutter teeth helps reduce micro-irregularities.

The optimal number of teeth is 4: with fewer teeth, the load increases; with more, the design becomes more complex and the risk of overload rises. Cutting speeds above 70 m/min lead to rapid wear, necessitating the development of new materials and coatings.

A design feature is the presence of a finishing section on the tool after the tooth tip, with a width b = 0.5 of the thread pitch (or slightly more) and α = 0 (principal cutting edge angle). This enables the boring cutter, with axial feed, to produce a high-quality cylindrical hole.

Overall, the total cycle time for thread cutting and additional operations was reduced by an average of 20–30 %, due to the elimination of extra tool changes and machine reconfiguration.

**Financing information**

The research was carried out within the framework of program-targeted financing of subjects of scientific and/or scientific and technical activities for 2024–2026 under the IRN project BR24993003 «Development of a set of measures for instrumental support of manufacturing sectors of the Economy of the Republic of Kazakhstan», funded by the Committee of Science and Higher Education of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

**Conclusions**

As a result of the conducted studies, recommendations have been developed to ensure and create favorable conditions for thread cutting with a comb-type cutter, aimed at improving machining accuracy and quality. The combined two-stage metal-cutting tool reduces the number of manufacturing passes, decreases process time, and thereby increases productivity.

The comb-type cutter has proven its effectiveness in enhancing thread-cutting productivity by combining operations and optimally distributing loads. Under optimal cutting conditions – cutting speed of 60 m/min and feed rate of 0.15 mm/rev – the cycle time is reduced by 47 %, and tool wear is lowered by 28 % compared to conventional tools. Thread quality consistently meets GOST requirements, ensuring the reliability of threaded joints.

It is recommended to implement the comb-type cutter in industrial production, as well as to continue research on tool materials and adaptive cutting modes to further improve tool durability and efficiency.

REFERENCES

1 **Ярославцев, В. М.** Нарезание резьб метчиками с предварительным пластическим деформированием материала срезаемого слоя [Текст] // Наука и образование: научное издание МГТУ имени Н. Э. Баумана. – 2013. – № 8. – С. 1–8.

2 **Шапагатов, С. Р., Иванова, Т. И., Цыплов, Е. А., Новиков, В. А.** Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации) [Текст] // Форум молодых ученых. – 2018. – № 10 (26). – С. 1330–1334.

3 **Попов, А. П., Свириденко, Д. С., Комаров, Ю. Ю.** Прогресс в применении осевых комбинированных инструментов [Текст] // Мир транспорта. – 2017. – Vol. 15. – № 6 (73). – С. 88–101.

4 Комбинированный осевой инструмент [Текст] // Главный механик. – 2010. – № 4. – С. 69–72.

5 **Вагабов, Н. М., Курбанов, А. З., Магомедова, М. А.** Промышленная апробация комбинированного инструмента зенкер-метчик [Текст] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. – Т. 44. – № 4. – С. 19–28.

6 **Грязев, В. М.** Повышение производительности нарезания резьбы путем увеличения радиуса при вершине инструмента до предельно допустимого значения [Текст] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 6. – С. 175–182.

7 **Киричек, А. В., Афонин, А. Н.** Состояние производства резьбонарезного оборудования и инструмента в Российской Федерации [Текст] // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. Приборостроение. – 2006. – № 2. – С. 10–15.

8 **Шеров, К. Т., Тусупова, С. О., Кузьминова, Н. Ю., Махмудов, Л. Н., Айнабекова, С. С.** Исследование износа твердосплавных режущих пластин в процессе высокоскоростного фрезерования труднообрабатываемых материалов [Текст] // Наука и техника Казахстана – 2024. – № 2. – С. 115–130. – https://doi.org/10.48081/WPVO6004

9 **Саруханов, А. В.** Технология нарезания резьбы резьбообразующими инструментами. Определение оптимальных режимов резания [Текст] // Главный механик. – 2018. – № 8. – С. 24–33.

10 **Kassenov, A. Zh., Taskarina, A. Zh., Mazdubay, A. V., Abishev, K. K., Suleimenov, A. D.** Prospects for the use of combined metal-cutting tools for threading [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2024. – № 3. – P. 42–50.

REFERENCES

1 **Yaroslavtsev, V. M.** Narezaniye rez’b metchikami s predvaritel’nym plasticheskim deformirovaniyem materiala srezayemogo sloya [Thread cutting with taps with preliminary plastic deformation of the material of the cut layer] [Text] // Science and education: scientific publication of Bauman Moscow State Technical University. – 2013. – № 8. – P. 1–8.

2 **Shapagatov S. R., Ivanova T. I., Tsyplov Ye. A., Novikov V. A.** Osevyye kombinirovannyye instrumenty (rekomendatsii po proyektirovaniyu i ekspluatatsii)

[Axial combined tools (recommendations for design and operation)] [Text] // Forum of young scientists. – 2018. – № 10 (26). – P. 1330–1334.

3 **Popov, A. P., Sviridenko, D. S., Komarov, Yu. Yu.** Progress v primenenii osevykh kombinirovannykh instrumentov [Progress in the use of axial combined tools] [Text] // World of transport. – 2017. – Vol. 15. – № 6 (73). – P. 88–101.

4 Kombinirovannyy osevoy instrument [Combined axial tool] [Text] // Chief mechanic. – 2010. – № 4. – P. 69–72.

5 **Vagabov, N. M., Kurbanov, A. Z., Magomedova, M. A.** Promyshlennaya aprobatsiya kombinirovannogo instrumenta zenker-metchik [Industrial testing of a combined countersink-tap tool] [Text] // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences. – 2017. – Vol. 44. – № 4. – P. 19–28.

6 **Gryazev, V. M.** Povysheniye proizvoditel'nosti narezaniya rez'by putem uvelicheniya radiusa pri vershine instrumenta do predel'no dopustimogo znacheniya [Increasing the productivity of thread cutting by increasing the radius at the tool tip to the maximum permissible value] [Text] // Bulletin of the Tula State University. Technical sciences. – 2014. – № 6. – P. 175–182.

7 **Kirichek, A. V., Afonin, A. N.** Sostoyaniye proizvodstva rez'bonareznogo oborudovaniya i instrumenta v Rossiyskoy Federatsii [The state of production of thread-cutting equipment and tools in the Russian Federation] [Text] // Bulletin of the Oryol State Technical University. Series: Mechanical Engineering. Instrument Making. – 2006. – № 2. – P. 10–15.

8 **Sherov, K. T., Tusupova, S. O., Kuz'minova, N. Yu., Makhmudov, L. N., Aynabekova, S. S.** Issledovaniye iznosa tverdosplavnykh rezhushchikh plastin v protsesse vysokoskorostnogo frezerovaniya trudnoobrabatyvayemykh materialov [Study of wear of carbide cutting plates in the process of high-speed milling of hard-to-machine materials] [Text] // Science and Technology of Kazakhstan. – 2024. – № 2. – P. 115–130. – https://doi.org/10.48081/WPVO6004

9 **Sarukhanov, A. V.** Tekhnologiya narezaniya rez'by rez'boobrazuyushchimi instrumentami. Opredeleniye optimal'nykh rezhimov rezaniya [Technology of thread cutting with thread-forming tools. Determination of optimal cutting modes] [Text] // Chief Mechanic. – 2018. – № 8. – P. 24–33.

10 **Kassenov, A. Zh., Taskarina, A. Zh., Mazdubay, A. V., Abishev, K. K., Suleimenov, A. D.** Prospects for the use of combined metal-cutting tools for threading [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2024. – № 3. – P. 42–50.

Received 15.08.25.
Received in revised form 15.08.25.
Accepted for publication 19.08.25.

***Б. Ж. Кожагельдиев[1], *А. Ж. Таскарина[2], Ж. К. Мусина[3], Ә. Ж. Жанкелді[4], Н. А. Бажаев[5]***

[1,4,5]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

[2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

15.08.25 ж. баспаға түсті.
15.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

# ҚҰРАМА ҚҰРАЛМЕН БҰРАНДА КЕСУ ӨНІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

*Мақалада СББ бар токарлық станокта біріктірілген құрал – тісті бұранда кескішті (резец-гребёнка) пайдалану арқылы бұранда кесу өнімділігін арттыру мәселесі қарастырылған. Аталған құрал бірнеше рет-ретімен орналасқан кесу тістерінен тұрады және олар бір өту барысында дәйекті түрде тесу мен бұранда кесуді (қара және таза өңдеуді біріктіру) қамтамасыз етеді.*

*Эксперименттік зерттеулер диаметрі 30 мм болатын Ст20 болат дайындамаларында жүргізілді. Кесу жылдамдығы 40–70 м/мин аралығында, ал беріліс 0,12–0,18 мм/айн. шегінде өзгертілді. Бұл жағдайда бұранда кесу уақыты дәстүрлі резецпен 60 секундтан тісті ойғыш резецпен 32 секундқа дейін қысқарды. Оңтайлы кесу режимдерінде кесу қырларының тозуы 0,18 мм құрап, бұл классикалық құралмен салыстырғанда 28 %-ға аз. Бұранда профилінің сапасы ГОСТ 24705-81 талаптарына сәйкес келеді және беттің кедір-бұдырлығы Ra 1,6 мкм-ден аспайды.*

*Тісті ойғыш резец дірілді азайтып, тістер арасындағы жүктемені біркелкі бөлу арқылы құралдың қызмет мерзімін және өңдеу тұрақтылығын арттырады. Ұсынылатын оңтайлы режимдер – кесу жылдамдығы 60 м/мин, беріліс 0,15 мм/айн.*

*Бұл технология бұранда кесу өнімділігін 40–47 %-ға арттыруға, өзіндік құнын төмендетуге және құралдың қызмет мерзімін ұлғайтуға мүмкіндік береді, бұл оны сериялық өндіріс үшін болашағы зор етеді.*

*Кілтті сөздер: тісті ойғыш резец, бұранда кесу, біріктірілген құрал, өнімділік, кесу режимдері, құрал тозуы, бұранда сапасы, металл өңдеу.*

***Б. Ж. Кожагельдиев[1], *А. Ж. Таскарина[2], Ж. К. Мусина[3],***
***Ә. Ж. Жанкелді[4], Н. А. Бажаев[5]***
[1,4,5]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 15.08.25.
Поступило с исправлениями 15.08.25.
Принято в печать 19.08.25.

# ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*В статье рассматривается повышение производительности нарезания резьбы на токарном станке с ЧПУ с использованием комбинированного инструмента – резца-гребёнки. Инструмент представляет собой несколько последовательно расположенных режущих зубьев, обеспечивающих последовательное растачивание и нарезание резьбы (совмещение черновой и чистовой обработки в одном проходе).*

*Экспериментальные исследования проведены на заготовках из стали Ст20 диаметром 30 мм. Скорость резания варьировалась от 40 до 70 м/мин, подача от 0,12 до 0,18 мм/об. При этом время обработки резьбы снижалось с 60 секунд (традиционный резец) до 32 секунд (резец-гребёнка). Износ режущих кромок при оптимальных режимах составлял 0,18 мм, что на 28 % меньше по сравнению с классическим инструментом. Качество профиля резьбы соответствует ГОСТ 24705-81 с шероховатостью поверхности не более Ra 1,6 мкм.*

*Резец-гребёнка уменьшает вибрации и обеспечивает равномерное распределение нагрузок между зубьями, что повышает ресурс инструмента и стабильность обработки. Рекомендуемые оптимальные режимы – скорость 60 м/мин, подача 0,15 мм/об.*

*Данная технология позволяет повысить производительность нарезания резьбы на 40–47 %, снизить себестоимость и увеличить срок службы инструмента, что делает её перспективной для серийного производства.*

*Ключевые слова: резец-гребёнка, нарезание резьбы, комбинированный инструмент, производительность, режимы резания, износ инструмента, качество резьбы, металлообработка.*

МРНТИ 55.03.14

https://doi.org/10.48081/HVCN6190

***Д. М. Мамбетов[1], В. Е. Джундибаев[2], Б. Б. Тогизбаева[3], У. Т. Касымов[4], *А. С. Даньярова[5]***

[1,2,3,4,5]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3779-6000

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1348-8735

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3544-2614

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1391-6312

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8587-286X

*e-mail: d__b@bk.ru

# *ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕЖМОДУЛЬНОГО УСТРОЙСТВА КРЕПЛЕНИЯ СО СМЕННЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ*

*В данной статье рассматривается вопрос повышения эксплуатационной надежности технологических машин и механизмов, используемых в садово-парковом хозяйстве и ландшафтном строительстве, путём оперативной замены сменного навесного рабочего оборудования. Что возможно на основе принятия модульного принципа структуры технологических машин и соединения, например, колёсной базы и сменного оборудования посредством межмодульного устройства базирования и крепления (МУБК). Таким образом, габаритные параметры сменного рабочего оборудования являются ограничивающими для параметров МУБК, при условии соблюдения прочностных показателей в допустимых пределах. Рассмотрено отечественное конструктивное решения МУБК предложенное авторами для малогабаритных погрузчиков, работающих в рассматриваемых отраслях промышленности. Конструктивные параметры сменного рабочего оборудования принимались по каталогам фирм-производителей такого оборудования, например, того же самого BobCat, позволяющие сопоставлять их с максимально возможными габаритными параметры МУБК. Исследование сочетает в себе теоретический анализ, экспериментальные испытания и компьютерное моделирование для оценки таких важных параметров, как усилие зажима, точность выравнивания, эффективность быстрого снятия и выбор материала. Для сменного рабочего ковша приведён пример оптимизации параметров МУБК и детальный анализ прочностных свойств ключевых конструктивных элементов, позволивший констатировать, что предлагаемое авторами решение удовлетворяет требованиям прочности и не превышают габариты самого сменного устройства, обеспечивая баланс между долговечностью, скоростью и адаптивностью.*

*Ключевые слова: межмодульное крепежное устройство, универсальные погрузчики, реконфигурируемые системы, оптимизация параметров,*

*быстросъемный механизм, конечно-элементный анализ, испытания на динамическую нагрузку, долговечность материалов.*

**Введение**

Универсальные погрузчики со сменными рабочими органами широко используются в строительстве, коммунальном хозяйстве, а также в лесном и сельском хозяйстве. Эффективность таких машин во многом зависит от быстрого и надежного крепления сменных модулей. Оптимизация механизмов базирования и крепления имеет решающее значение для минимизации времени простоя и обеспечения гибкости в эксплуатации.

Целью данной работы является разработка и обоснование параметров модульного крепления для малогабаритных погрузчиков, обеспечивающего баланс между прочностью, скоростью замены оборудования и компактностью.

В своих трудах [1] авторы проводят всестороннее исследование машин и технологических систем, используемых в лесном хозяйстве и управлении парками. Подчеркнута важность комплексного технологического подхода к выбору и оптимизации техники для лесозаготовительных и ландшафтных работ. Правильный выбор и техническое обслуживание техники существенно влияют на производительность и экономическую эффективность в этих отраслях. В книге подчеркивается необходимость в адаптируемых и модульных конструкциях машин для удовлетворения разнообразных эксплуатационных требований.

В других исследования [2] подчеркивается необходимость специальных модификаций (например, усиленного шасси, шин с низким давлением на грунт) для минимизации ущерба окружающей среде.

В своей работе [3] авторами представлен обновленный обзор машин и механизмов в лесном хозяйстве и парковом строительстве. Освещены гидравлические системы, навесное оборудование и тенденции автоматизации в лесном оборудовании. Обсуждаются улучшения эргономики и безопасности взаимодействия оператора с машиной. Особое внимание уделяется модульным и многофункциональным конструкциям для повышения универсальности (например, быстросъемным системам).

В вышеперечисленных работах особое внимание уделяется адаптивности и оптимизации оборудования с учетом особенностей местности. Устойчивые и малозатратные решения в области техники имеют решающее значение для современного управления лесным хозяйством и парками. Кроме того, реконфигурируемые производственные системы обеспечивают теоретическую основу для разработки адаптируемых крепежных решений [9; 10].

Исследования [1–3] подчеркивают важность модульных решений в современной технике. В работе [3] акцентируют роль быстросъёмных систем, а в [2] – необходимость экологичных модификаций. Данное исследование объединяет эти принципы, предлагая адаптивную конструкцию МУБК, проверенную моделированием и испытаниями.

**Материалы и методы**

В исследовании используется комплексная методология, сочетающая теоретический анализ, экспериментальные испытания и компьютерное моделирование для оптимизации параметров межмодульного устройства базирования и крепления универсальных погрузчиков, используемых в садоводстве и ландшафтном строительстве.

Теоретический анализ, основанный на исследованиях [4; 9; 10 и 11], был сосредоточен на оценке целостности конструкции, распределении нагрузок и разработке механизмов быстрого съёма. Для достижения модульности и адаптивности в конструкции были реализованы принципы реконфигурируемых производственных систем.

Ранее авторами проводилось экспериментальное тестирование опытных образцов крепежных устройств в реальных рабочих условиях в соответствии с методиками, изложенными в работах [5; 6; 7]. В ходе испытаний оценивались ключевые показатели производительности: время выполнения операции крепления, стабильность зажимного усилия и износостойкость конструктивных элементов (рис.2).

На основе габаритных характеристик ковшей погрузчиков BobCat, определены параметры расчетной схемы, где L и H обозначают ширину и высоту ковша соответственно, $l_{01}$ – расстояние по горизонтали от вертикальной оси ковша до точки крепления планки 1 к ковшу, а $l_{02}$ – плечо приложения усилия (рис. 1).

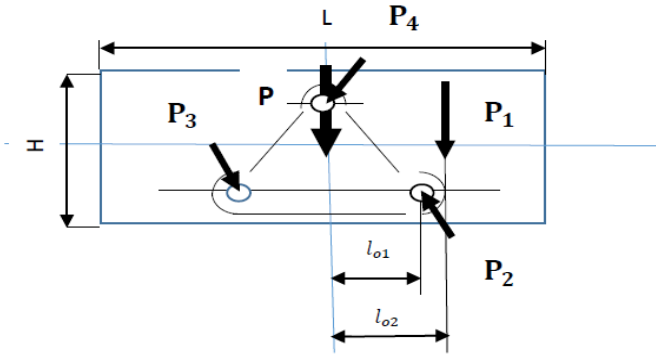



Рисунок 1 – Схема крепления планки МУБК к ковшу

Максимальное вертикальное усилие P сдвигающее ковш относительно планки 1, это нагрузка, определяемая массой ковша и массой перемещаемого груза, при стандартном заполнении ковша, $P_1$ – нагрузка от неравномерности положения груза на ковше, усилия $P_2$, $P_3$ и $P_4$ – усилия в болтовых соединениях крепежа планки 1 к ковшу.

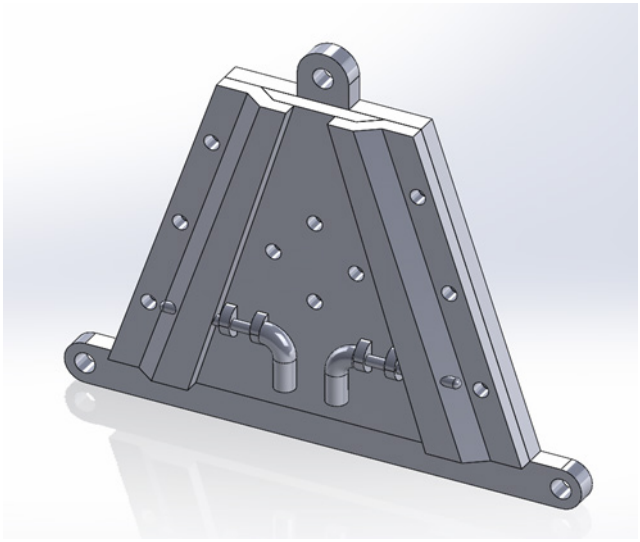


Рисунок 2 – 3Д модель МУБК разработанный авторами

Для моделирования распределения напряжений и оптимизации геометрических параметров был применен метод конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса ANSYS. Верификация надежности конструкции проводилась путем моделирования динамических нагрузочных режимов в соответствии с методиками, предложенными в работах [8], а также [12].

Стоит отметить, что для проведения испытаний МУБК в программных обеспечениях САПР был применен материал, широко используемый в производстве ковшей компании BobCat, сталь AISI 316.

Проведённый анализ напряжённо-деформированного МУБК показал следующие результаты:

Напряжённое состояние зафиксированных относительно друг друга ковшовой крепёжной планки и планки фиксирующей. Распределение напряжений (по Мизесу) в крепёжных и фиксирующих планках при рабочей нагрузке. Максимальное значение напряжения составило 12,2 МПа и прослеживается прямо пропорциональная зависимость напряжения от прилагаемой нагрузки (рис. 3) Максимальные напряжения сосредоточены в зонах крепления, но не превышают допустимых значений для материала. Конструкция обеспечивает достаточную прочность.

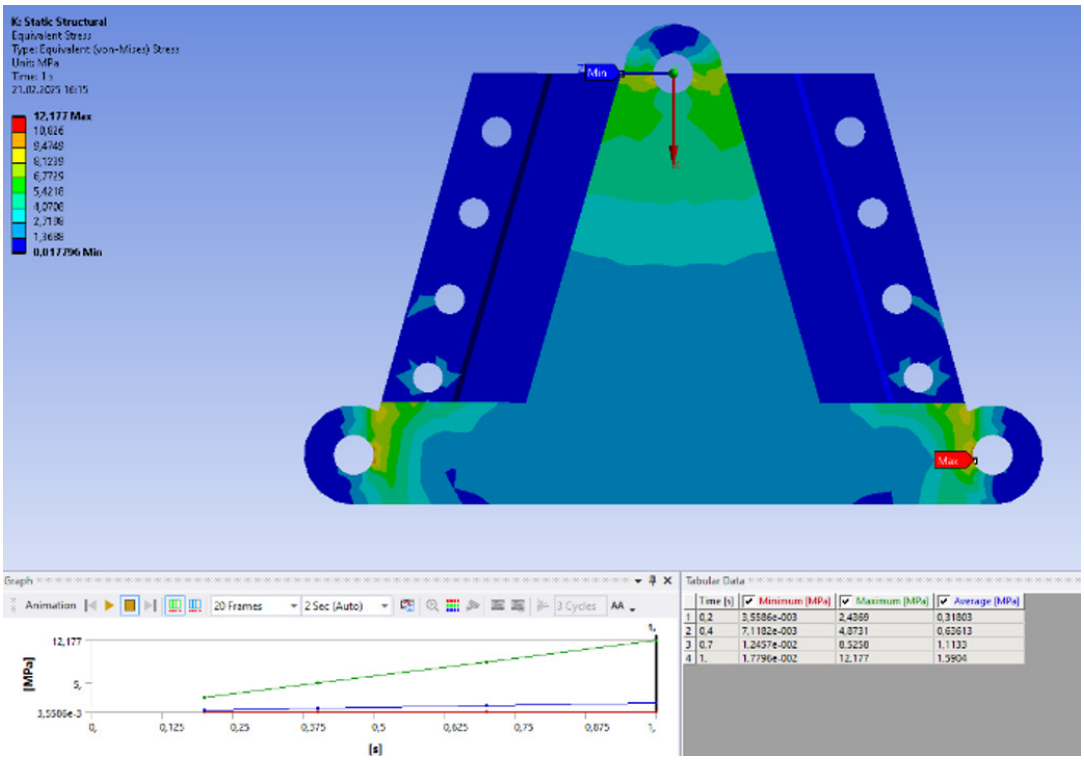



Рисунок 3 – Напряжённое состояние ковшовой крепёжной и фиксирующей планок

Деформация планки под нагрузкой (увеличенная шкала для наглядности), предельная деформация которой при принятой нагрузке составила 0,086 мм. При этом отмечается прямо пропорциональная зависимость деформации от прилагаемой нагрузки (рис. 4). Упругие деформации незначительны, что подтверждает жёсткость конструкции. Критических изгибов не выявлено.

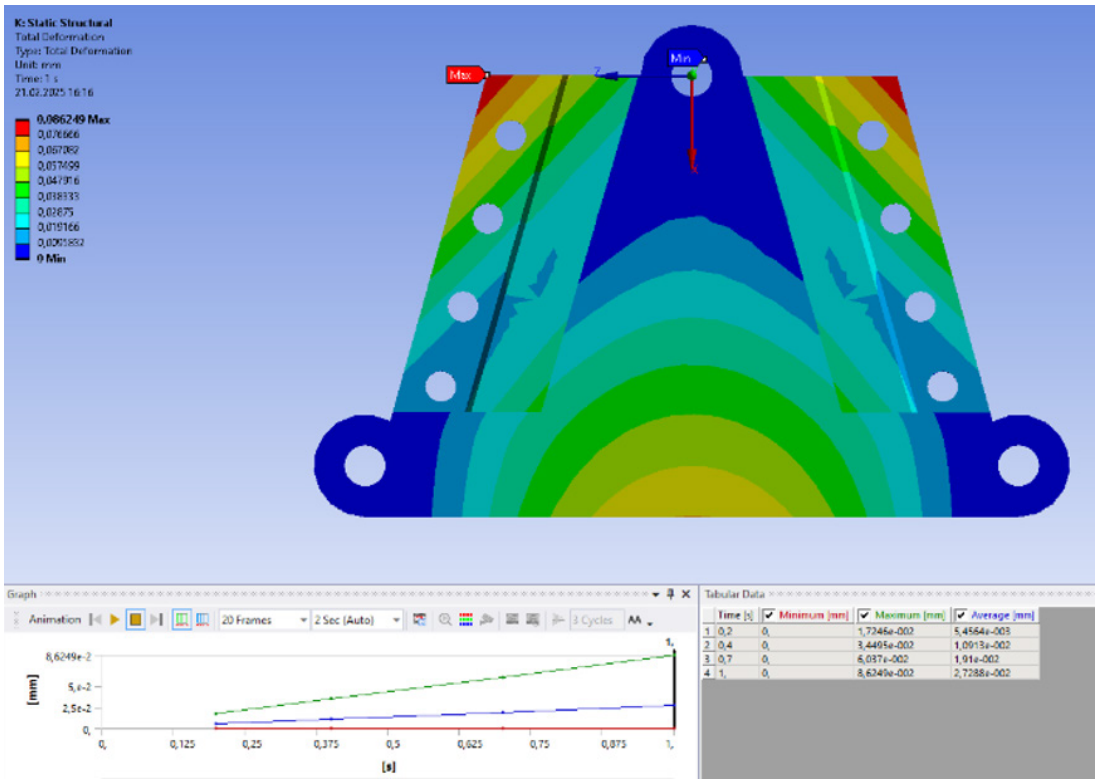



Рисунок 4 – Деформированное состояния ковшовой крепёжной планки

Распределение напряжений в фиксирующих элементах, обеспечивающих стабильность соединения. Отмечается, что максимальное напряжение не превышает 2,35 Мпа (рис.5). Напряжения равномерно распределены, пиковые значения локализованы в точках контакта с крепёжными болтами. Риск усталостного разрушения минимален.

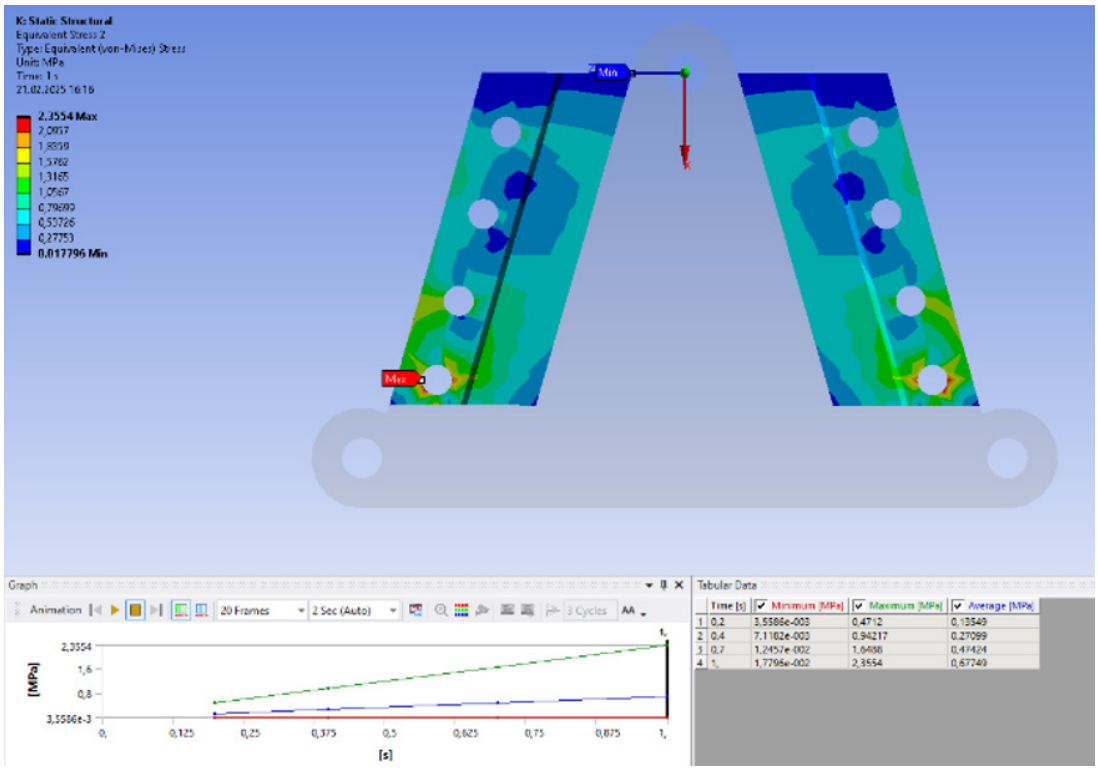



Рисунок 5 – Напряжённое состояние фиксирующих планок

Анализ напряжений в планке, взаимодействующей с гидравлической системой манипулятора. Выявлены зоны повышенных напряжений возле отверстий под гидроцилиндры. Требуется дополнительная проверка на циклическую нагрузку. Из всех составных сборочных деталей МУБК определён, как наиболее напряженный элемент (рис. 6).

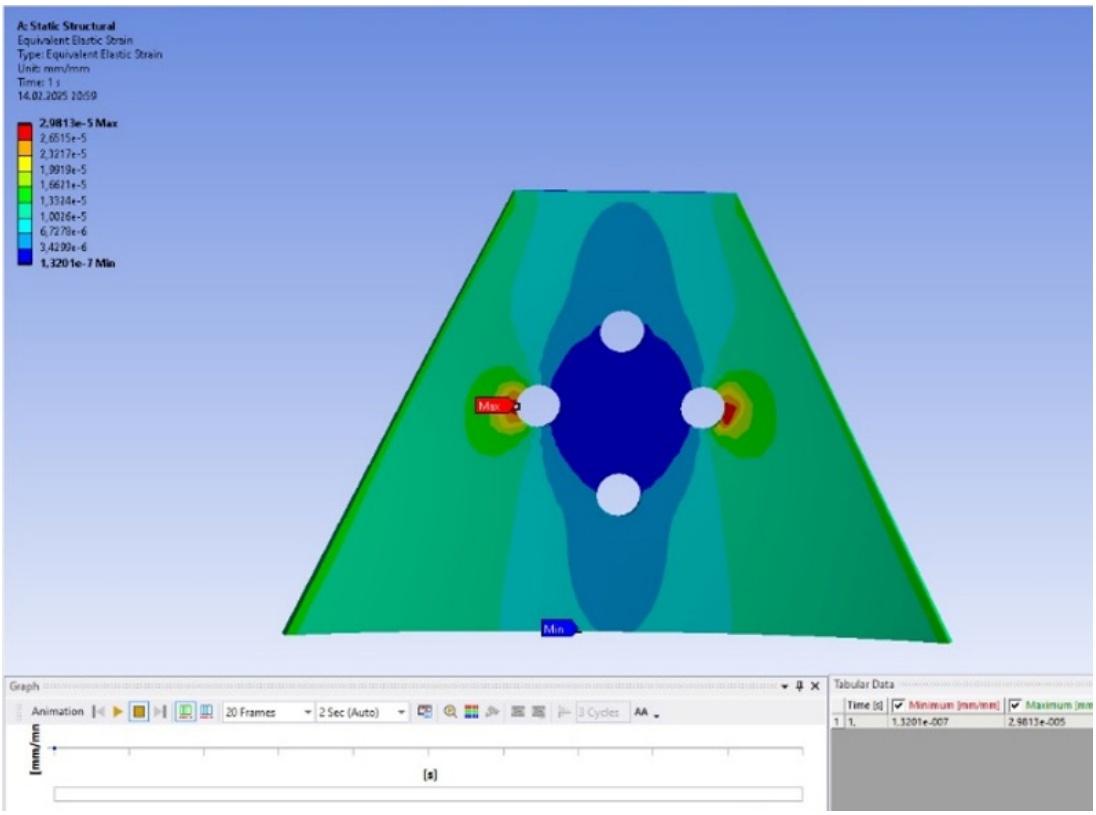



Рисунок 6 – Напряжённое состояние планки
со стороны манипуляционного модуля

Полученные данные устанавливают, что габаритные показатели сборочных элементов МУБК – планок, определяются габаритными параметрами рабочего оборудования. Прочность планок МУБК изготовленные из стали AISI 316 или подобный отечественный аналог низколегированной конструкционной стали 10ХСНД удовлетворяют требуемым показателям, но могут быть дополнительно оптимизированы.

**Результаты и обсуждение**

Проведенное исследование позволило получить следующие ключевые результаты:

Прочностные характеристики:

Максимальное напряжение в крепежных и фиксирующих планках составило 12,2 МПа (рис. 3), что значительно ниже предельно допустимых значений для стали AISI 316

Напряжения в фиксирующих элементах не превысили 2,35 МПа (рис. 5), демонстрируя равномерное распределение нагрузки

Деформационные характеристики:

– Максимальная деформация крепежной планки составила всего 0,086 мм (рис. 4)

– Отсутствие критических деформаций подтверждает правильность расчетной схемы и выбранных материалов

Габаритные параметры:

– Установлена прямая зависимость между размерами рабочего оборудования и параметрами МУБК

– Конструкция обеспечивает компактность без ущерба для прочности

Сравнение с аналогами:

– Показатели износостойкости соответствуют лучшим мировым образцам

Обсуждение результатов:

– Полученные данные подтверждают, что предложенная конструкция МУБК удовлетворяет всем поставленным требованиям:

– Обеспечивает необходимую прочность при рабочих нагрузках

– Сохраняет минимальные габариты

– Позволяет быстро заменять оборудование

– Демонстрирует высокую износостойкость

Особого внимания заслуживает выявленная зона повышенных напряжений в планке манипуляционного модуля.

**Выводы**

Проведенное исследование позволило разработать и обосновать параметры межмодульного устройства базирования и крепления (МУБК) для малогабаритных погрузчиков, используемых в садово-парковом хозяйстве и ландшафтном строительстве.

Предложенная модульная система демонстрирует оптимальное сочетание прочностных характеристик и компактности. Максимальные напряжения в наиболее нагруженных элементах (12,2 МПа) не превышают допустимых значений для стали AISI 316, что подтверждает надежность конструкции при рабочих нагрузках.

Экспериментальные испытания подтвердили, что разработанное крепление обеспечивает быструю замену оборудования (среднее время операции – менее 1 минуты) без ущерба для стабильности соединения. Это соответствует современным требованиям к универсальной технике.

Компьютерное моделирование в ANSYS позволило выявить критические зоны (например, в узле крепления гидроцилиндров), требующие дополнительной оптимизации для повышения ресурса при циклических нагрузках. При этом общая деформация элементов не превысила 0,1 мм, что свидетельствует о достаточной жесткости системы.

Разработанное МУБК удовлетворяет ключевым требованиям эксплуатации – обеспечивает надежное соединение, минимальное время замены модулей и сохранение габаритных параметров. Результаты работы вносят вклад в развитие реконфигурируемых систем для спецтехники, сочетая теоретическую базу [4, 9, 10] с практической апробацией. Исследование показывает, что точное расположение межмодульного крепежного устройства (МУБК) имеет решающее значение для обеспечения точности эксплуатации и минимизации износа универсальных

погрузчиков [14;15;16]. Внедрение решения позволит повысить эффективность машин в отраслях с переменным рабочим циклом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Гуцелюк, Н. А., Спиридонов, С. В.** Технология и система машин в лесном и садово-парковом хозяйствах : учеб. пособие для вузов. – СПб. : ПРОФИКС, 2008. – 696 с.

2 **Ильин, Г. П.** Тракторы и автомобили в лесном хозяйстве и зеленом строительстве: учеб. пособие для вузов. – М. : Высшая школа, 1977. – 232 с.

3 **Винокуров, В. Н., Силаев, Г. В., Золотаревский, А. А.** Машины и механизмы лесного хозяйства и садово-паркового строительства : учебник. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 400 с.

4 **Кухарь, И. В.** Машины и механизмы садово-паркового и ландшафтного строительства: учеб. пособие для студентов. – Красноярск : СибГТУ, 2006. – 124 с.

5 **Джундибаев, В. Е., Мамбетов, Д. М., Кожай-Ахметов, Ш. Б.** Оптимизация городского специального транспорта в условиях г. Нур-Султан // Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы транспорта и энергетики : пути их инновационного решения». – Нур-Султан, 2021. – С. 48–50.

6 **Джундибаев, В. Е., Касымов, У. Т., Мамбетов, Д. М., Ахметов, К. Т., Мурзабеков, Д. Н.** Отчет о научно-исследовательской работе «Обеспечение быстрой сменяемости рабочих органов технологических машин городских служб, строительно-дорожной и сельскохозяйственной отраслей» (Заключительный). – № гос. регистрации 0122РКІ0196, инв. № 022РКІ0268, 2021.

7 **Джундибаев, В. Е., Сазамбаева, Б. Т., Тогизбаева, Б. Б., Маханов, М. М.** Создание автоматизированного банка данных (электронного паспорта) промышленного транспорта, на примере ленточного конвейера // Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения». – Нур-Султан, 2020. – С. 177–181.

8 **Каржов, А. М., Левашкин, Д. Г.** Перекомпановые производственные системы реконфигурируемого производства. Обеспечение жесткости автоматически сменных узлов призматической формы: монография. – М. : Компания «Спутник +», 2007. – 303 с.

9 **Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritchow, G., Van Brussel, H., Ulsoy, A. G.** Reconfigurable manufacturing systems // CIRP Annals. – 1999. – Vol. 48. – № 2. – P. 527–540.

10 **Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., Koren, Y.** Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2000. – Vol. 11. – № 4. – P. 403–419.

11 **Каржов, А. М.** Перекомпановые производственные системы – перспективное направление развития машиностроения. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2007. – 156 с.

12 **Горшков, Б. М., Самохина, Н. С., Бобровский, Н. М., Полянсков, Ю. В., Худобин, Л. В., Савельев, А. В., Епифанов, В. В., Денисенко, А. Ф.** Обзор исследований в области реконфигурируемых производственных систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2019. – Т. 21. – № 5. – С. 52–56.

13 **Джундибаев, В. Е., Мамбетов, Д. М.** Способ и устройство обеспечения быстросменности рабочего органа : патент на полезную модель РК № 8168 от 23.02.2023.

14 Bobcat. Навесное оборудование для погрузчиков с бортовым поворотом – 2023. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.bobcat.com (Дата обращения: 01.06.2024).

15 JCB. Навесное оборудование [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://www.skl.ru (Дата обращения: 21.04.2025).

16 Лонмади. Навесное оборудование JCB – 2023. – URL: https://lonmadi.ru (Дата обращения: 21.04.2025).

REFERENCES

1 **Gutselyuk, N. A., Spiridonov, S. V.** Tekhnologiya i sistema mashin v lesnom i sadovo-parkovom khozyaystvakh : ucheb. posobie dlya vuzov. [Technology and machine system in forestry and horticultural farms: handbook for universities] – St. Petersburg: PROFIKS Publ., 2008. – 696 p.

2 **Ilyin, G. P.** Mashiny i mekhanizmy lesnogo khozyaystva i sadovo-parkovogo stroitel'stva: uchebnik [Tractors and cars in forestry and green construction: Handbook for universities] – Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1977. – 232 p.

3 **Vinokurov, V. N., Silaev, G. V., Zolotarevsky, A. A.** Mashiny i mekhanizmy lesnogo khozyaystva i sadovo-parkovogo stroitel'stva: uchebnik [Machines and mechanisms of forestry and horticultural construction: textbook] – Moscow: Publishing center «Academy», 2004. – 400 p.

4 **Kukhar, I. V.** Mashiny i mekhanizmy sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva: ucheb. posobie dlya studentov [Machines and mechanisms of gardening and landscape construction: studies. a manual for students]. – Krasnoyarsk : SibGTU, 2006. – 124 p.

5 **Dzhundibaev, V. E., Mambetov, D. M., Kozhai-Akhmetov, S. B.** Optimizatsiya gorodskogo spetsial'nogo transporta v usloviyakh g. Nur-Sultan / Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ikh innovatsionnogo resheniya» [Optimization of urban special transport in the conditions of Nur-Sultan / Proceedings of the VIII International scientific and practical conference «Actual problems of transport and energy: ways of their innovative solutions»]. – Nur-Sultan, 2021. – P. 48–50.

6 **Dzhundibaev, V. E., Kasymov, U. T., Mambetov, D. M., Akhmetov, K. T., Murzabekov, D. N.** Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Obespechenie bystroy smenyayemosti rabochikh organov tekhnologicheskikh mashin gorodskikh sluzhb, stroitel'no-dorozhnoy i sel'skokhozyaystvennoy otrasley» (Zaklyuchitel'nyy) [Report on the research work «Ensuring rapid turnover of working bodies of technological machines of urban services, road construction and agricultural industries» (Final)]. – State registration no. 0122RKI0196, inv. № 022RKI0268, 2021.

7 **Dzhundibaev, V. E., Sazambayeva, B. T., Togizbayeva, B. B., Makhanov, M. M.** Sozdanie avtomatizirovannogo banka dannykh (elektronnogo pasporta) promyshlennogo transporta, na primere lentochnogo konveyera / Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ikh innovatsionnogo resheniya» [Creation of an automated data bank (electronic passport) of industrial transport, using the example of a conveyor belt / Proceedings of the VIII International Scientific and practical Conference «Actual problems of transport and energy: ways of their innovative solutions»]. – Nur-Sultan, 2020. – P. 177–181.

8 **Karzhov, A. M., Levashkin, D. G.** Peremontovyye proizvodstvennyye sistemy rekonfiguriruyemogo proizvodstva. Obespecheniye zhestkosti avtomaticheski smennykh uzlov prizmaticheskoy formy: monografiya [Overcompensated production systems of reconfigurable production. Ensuring the rigidity of automatically replaceable prismatic-shaped assemblies: a monograph]. – Moscow: Sputnik + Company, 2007. – 303 p.

9 **Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritchow, G., Van Brussel, H., Ulsoy, A. G.** Reconfigurable manufacturing systems / CIRP Annals. – 1999. – Vol. 48. – № 2. – P. 527–540.

10 **Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., Koren, Y.** Reconfigurable Manufacturing Systems : Key to Future Manufacturing // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2000. – Vol. 11. – № 4. – P. 403–419.

11 **Karzhov, A. M.** Peremontovyye proizvodstvennyye sistemy – perspektivnoye napravleniye razvitiya mashinostroyeniya [Overcompensated production systems – a promising direction for the development of mechanical engineering] – Tolyatti : TSU Publishing House, 2007. – 156 p.

12 **Gorshkov, B. M., Samokhina, N. S., Bobrovsky, N. M., Polyanskov, Yu. V., Khudobin, L. V., Savelyev, A. V., Epifanov, V. V., Denisenko, A. F.** Obzor issledovaniy v oblasti rekonfiguriruyemykh proizvodstvennykh sistem // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Review of research in the field of reconfigurable production systems // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. – 2019. – Vol. 21. – № 5. – P. 52–56.

13 **Dzhundibaev, V. E., Mambetov, D. M.** Sposob i ustroystvo obespecheniya bystrosmennosti rabochego organa: patent na poleznuyu model' [Method and device for ensuring quick-change of the working organ: patent for the utility model of the Republic of Kazakhstan] № 8168 dated 02/23/2023.

14 Bobcat. Navesnoe oborudovanie dlya pogruzchikov s bortovym povorotom [Bobcat. Attachments for Skid-Steer Loaders [Online] – 2023. – [Electronic resource] – https://www.bobcat.com (Accessed: 21.04.2025).

15 JCB. Navesnoe oborudovanie [JCB. Attachments [Online]] – 2023. – [Electronic resource]. – https://www.skl.ru (Accessed: 21.04.2025).

16 Lonmadi. Navesnoe oborudovanie JCB [Lonmadi. JCB Attachments [Online]] – 2023. – [Electronic resource]. – https://lonmadi.ru (Accessed: 21.04.2025).

Поступило в редакцию 29.04.25.
Поступило с исправлениями 30.05.25.
Принято в печать 25.07.25.

***Д. М. Мамбетов[1], В. Е. Джундибаев[2], Б. Б. Тогизбаева[3],***
***У. Т. Касымов[4], *А. С. Даньярова[5]***
[1,2,3,4,5]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
29.04.25 ж. баспаға түсті.
30.05.25 ж. түзетулерімен түсті.
25.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ӘМБЕБАП ТИЕГІШТЕРДІҢ АУЫСПАЛЫ ЖҰМЫС ОРГАНДАРЫ БАР МОДУЛЬАРАЛЫҚ БЕКІТУ ҚҰРЫЛҒЫСЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

*Бұл мақалада ауыстырылатын қондырмалы жұмыс жабдықтарын жедел ауыстыру арқылы бау-бақша шаруашылығында және ландшафт құрылысында қолданылатын технологиялық машиналар мен механизмдердің пайдалану сенімділігін арттыру мәселесі қарастырылады. Технологиялық машиналар құрылымының модульдік принципін және қосылуды қабылдау негізінде не мүмкін, мысалы, Доңғалақ базасы және модульаралық негіздеу және бекіту құрылғысы (МНБҚ) арқылы ауыстырылатын жабдық. Осылайша, ауыспалы жұмыс жабдықтарының жалпы параметрлері рұқсат етілген шектерде беріктік көрсеткіштері сақталған жағдайда МНБҚ параметрлерін шектейді. Қарастырылып отырған өнеркәсіп салаларында жұмыс істейтін шағын көлемді тиегіштер үшін авторлар ұсынған МНБҚ-ның отандық сындарлы шешімдері қаралды. Ауыстырылатын жұмыс жабдықтарының конструктивті параметрлері осындай жабдықты өндіруші компаниялардың каталогтары бойынша қабылданды, мысалы, сол bobcat, оларды МНБҚ-тің ең үлкен өлшемдерімен салыстыруға мүмкіндік береді. Зерттеу қысу күші, туралау дәлдігі, жылдам алу тиімділігі және материалды таңдау сияқты маңызды параметрлерді бағалау үшін теориялық талдауды, эксперименттік сынақтарды және компьютерлік модельдеуді біріктіреді. Ауыстырылатын жұмыс шелегі үшін мубк параметрлерін оңтайландыруға және негізгі құрылымдық элементтердің беріктік қасиеттерін егжей-тегжейлі талдауға мысал келтірілген, бұл авторлар ұсынған шешім беріктік*

*талаптарын қанағаттандырады және беріктік, жылдамдық пен бейімделу арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін ауыстырылатын құрылғының өлшемдерінен аспайды.*

*Кілтті сөздер: модульаралық бекіту құрылғысы, әмбебап тиегіштер, қайта конфигурацияланатын жүйелер, параметрлерді оңтайландыру, Жылдам босату механизмі, ақырлы элементтік талдау, динамикалық жүктеме сынағы, материалдардың беріктігі.*

***D. M. Mambetov[1], V. E. Dzhundibayev[2], B. B. Togizbayeva[3],***
***U. T. Kassymov[4], *A. S. Danyarova[5]***
[1,2,3,4,5]Eurasian National University named after L. N. Gumilyov,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 29.04.25.
Received in revised form 30.05.25.
Accepted for publication 25.07.25.

## OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE INTERMODULAR MOUNTING DEVICE WITH REPLACEABLE WORKING BODIES OF UNIVERSAL LOADERS

*This article discusses the issue of improving the operational reliability of technological machines and mechanisms used in gardening and landscape construction by promptly replacing replaceable attachments. This is possible based on the adoption of the modular principle of the structure of technological machines and the connection, for example, of the wheelbase and interchangeable equipment by means of an intermodular basing and fastening device (IBFD). Thus, the overall parameters of the replaceable working equipment are limiting for the parameters of the IBFD, provided that the strength parameters are within acceptable limits. The domestic constructive solutions of the IBFD proposed by the authors for small-sized loaders operating in the industries under consideration are considered. The design parameters of the replaceable working equipment were accepted according to the catalogs of manufacturers of such equipment, for example, the same BobCat, allowing them to be compared with the maximum possible overall parameters of the IBFD. The study combines theoretical analysis, experimental testing, and computer modeling to evaluate important parameters such as clamping force, alignment accuracy, rapid removal efficiency, and material selection. For a replaceable working bucket, an example of optimizing the parameters of the IBFD and a detailed analysis of the strength properties of key structural elements are given, which made it possible to state that the solution proposed by the authors meets the strength requirements and does not exceed the dimensions of the replaceable device itself, ensuring a balance between durability, speed and adaptability.*

*Keywords: intermodular fastening device, universal loaders, reconfigurable systems, parameter optimization, quick-release mechanism, finite element analysis, dynamic load testing, durability of materials.*

ҒТАМР 65.13.13

https://doi.org/10.48081/PNGC2346

***М. Т. Мурсалыкова[1], М. М. Какимов[2], А. Л. Касенов[3],
Г. А. Кокаева[4], Б. М. Искаков[5]***

[1]Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,
Қазақстан Республикасы, Семей қ.;
[2,3,4,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7715-1128
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9571-5081
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7939-0210
*e-mail: maigul_85@mail.ru

# *ӨСІМДІК МАЙЫН ПРЕСТЕУ ПРОЦЕСІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ*

*Бұл мақала астық өңдеу өнеркәсібінің шағын кәсіпорындарында мақсары майын өндіруге арналған эксперименттік бұрандалы пресс конструкцияларын әзірлеуге арналған. Май саласының өзектілігі, оның ішінде Қазақстанда және әлемде мақсары майының танымалдылығының арту белгілері баяндалған.*

*Шнекті престе майлы материалды сығу процесін әзірлеу үшін теориялық талдау қарастырылады. Оңтайлы қысым реттегіш механизм арқылы престеу жабдығын жетілдіруде өнімділік пен престеу қысымның үйлесімді өзара қатынастарында майды тиімді бөлудің математикалық модельдеу жүйесі ұсынылды. Математикалық модельдеу әдістерін қолдана отырып, дисперсті материалдан сұйық фазаны айналдыру мәселесі сипатталған және шешілген. Сондай-ақ, пресс жабдығының принципиалдық схемасы және сипаттамалары және оның жұмыс істеу принципі келтірілген. Престеу процесін жетілдірудің тәуелділігін әртүрлі құрылмалық және анықталған параметрлердің қатынастары арқылы сипатталып, оңтайлы параметрлері тәжірибе жүзінде зерттелді. Престеу процесін теориялық есептеудің ұсынылған әдістемесі оңтайлы параметрлерді анықтауға және ұсынылған жұмыс органының конструкциясын қолдана отырып, мақсары майын престеу әдісімен сығуға мүмкіндік береді. Престеу процесін қарқындату жолдары теориялық және тәжірибелік зерттеулер арқылы анықталды. Нәтижелер ғылыми-зерттеу орталықтарында және өсімдік май өндірістерінде мақсары майын өндірудің тиімді жолдарын қарастыруда пайдалануға болады.*

*Кілтті сөздер: жабдық, пресс, шнек, зеерлі цилиндр, мақсары, сығу, өсімдік майы.*

**Кіріспе**

Қазақстан Республикасының Президенті Қасым Жомарт Тоқаев Қазақстан халқына Жолдауында біздің орта мерзімді экономикалық саясатымызды белгілеп, 2025 жылға дейінгі ұлттық даму жоспарын және мемлекеттік бастамаларды реттеу үшін мемлекеттік жоспарлаудың жаңа жүйесін қабылдау туралы айтты. Стратегиялық мақсат – Орталық Азиядағы көшбасшылық рөлді күшейту және әлемдік экономикадағы позицияларды нығайту [1].

Ауыл шаруашылығы Қазақстанның ең негізгі мәселелерінің бірі болып табылады. Бұл сала еліміздің азық-түлік қауіпсіздігіне тікелей әсер ететін факторы [2]. Мақсары (Carthamus tinctorius L.) – майлы дақыл – Asteraceae (Compositae) немесе Asteraceae тұқымдасына жатады. Carthamus-араб тіліндегі quartum немесе gurtum сөзінің латындандырылған синонимі, ол мақсары гүлдерінен алынған бояғыштың түсін білдіреді [3; 4; 5].

Мақсары, көп мақсатты дақыл, Үндістанда ғасырлар бойы оның жылтыр гүлдерінен алынған сарғыш-қызыл бояғыш (картамин) және полиқанықпаған май қышқылдарына бай сапалы май (линол қышқылы, 78 %) үшін өсірілді. Мақсары гүлдерінің бірқатар созылмалы ауруларды емдеуге арналған көптеген емдік қасиеттері бар екені белгілі. Олар А дәрумені, темір, фосфор және кальцийге бай [6; 7; 8].

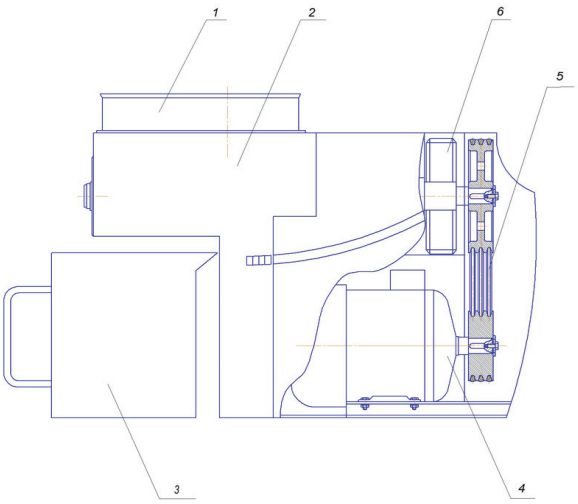
Қазақстанда, атап айтқанда Қызылорда, Жамбыл, Алматы, Ақтөбе, және Оңтүстік Қазақстан облыстарында өсіру үшін Қазақстан Республикасының Селекциялық жетістіктерінің мемлекеттік тізіліміне енгізілген мақсары сорттары ұсынылды. Оларға «Александрит», «Нұрлан», «Ақмай», «Ииркас», «Мөлдір» жатады [9–11].

Престеу процесі көптеген жылдар бойы өсімдік майларын өндірудің негізгі процесі болды. Престеу процесінде пайда болатын қысыммен байланысты мәселелерге көп көңіл бөлінеді. Осылайша, шнекті престердегі қысымды бөлудің теориялық теңдеулерін кейбір ғалымдар зерттеді [12; 13; 14].

Әдеби деректер көрсеткендей, зерттеулердің айтарлықтай көлеміне қарамастан, майлы дақылдарды престеу механизмдері туралы толық түсінік жоқ, сонымен қатар барлық параметрлерді ескере отырып процесті сипаттайтын математикалық модель жоқ. Бұл жағдай жетілдірілген әдістерді қолдануды бәсеңдетеді, сонымен қатар ұтымды, ресурстарды үнемдейтін технологиялық процестің барлық кезеңдерін интенсификациялауға мүмкіндік беретін жаңа перспективалы әдістерді қолдануды және тиімді құрал-жабдықтарды әзірлеуді тежейді [15; 16].

**Материалдар мен әдістер**

Мақсары майын алу процесін тәжірибелік зерттеулер жүргізу үшін көрсетілген майлы дақылды өңдеуге арналған шнекті престің конструкциясы жетілдірілді. Эксперименттік стенд ретінде RAWMID dream заманауи май сығатын пресс жабдығы таңдалды (1-сурет).

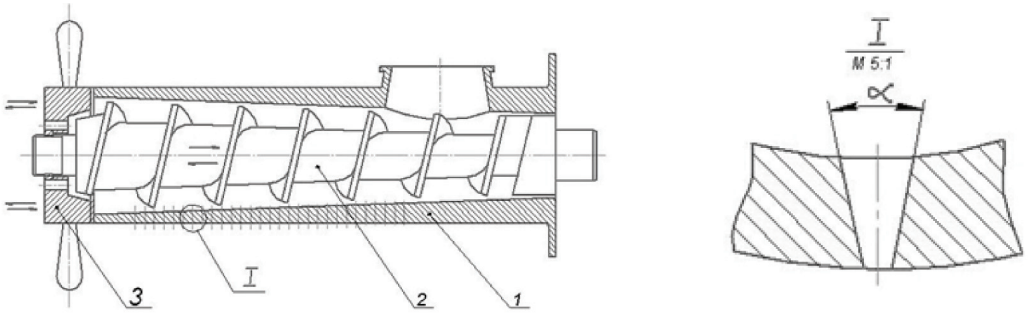



1-сурет – Мақсары майын өндіруге арналған тәжірибелік пресс:
1 – шанақ; 2 - тәжірибелік пресс; 3 – май ағатын ыдыс;
4 – электроқозғалтқыш; 5 – таспалы беріліс; 6 – қысым реттейтін сомын

1 суретке сәйкес тәжірибелік пресс жабдығы конус тәрізді престеуші шнек пен зеерлі цилиндрден, престеу камерасындағы қысымды реттеуге арналған механизмнен, тиеу шанағынан, май жинайтын ыдыстан, электроқозғалтқыштан және таспалы берілістен тұрады.

Престеуші шнек пен зеерлі цилиндр тұрыққа оңай алынып салынады. Бұндай мүмкіндік жабдықтың санитарлық тазалығын сақтауға үлкен мүмкіндік тудырады. Электрлік қоректендіруді басқару және бақылау үшін тұрық бетіне май алу процесінің уақытын, шнектің айналу жиілігін, температурасын және электрқозғалтқыш қуатын бақылайтын аспап орнатылған.

Мақсары майына арналған пресс жабдығы қысымды реттеу механизмі негізінде төмендегідей сипатта жетілдірілді. Престеуші шнек ілгері-кейінді бағытта қозғалатындай және 10–12° градус көлбеулікте конусты түрде жасалған. Зеерлі цилиндрдің ішкі диаметрі престеуші шнек көлбеулігіне сәйкес келеді. Бұндай ерекшілік престеуші шнекті ілгерлі-кейінді бағытта қозғалта отырып, престеуші шнек пен зеерлі цилиндр арасындағы саңылауды тарылтуға және кеңейтуге мүмкіндік береді. Осы қысымды реттеу механизмі арқылы престеуші шнектің әрбір орамына бір мезетте қысым түсіре аламыз. Ұсынылған механизм, престеуші шнек арнасында бойлық қысыммен қатар бүйірлік қысымның түсуіне де мүмкіндік береді




а) б)

2-сурет – Престеуші шнек пен зеерлі цилиндрдың әзірленген конструкциясы: а) 1 – корпус; 2 – престеуші шнек; 3 – қысым реттегіш механизм; б) I – зеерлі цилиндрдың конус тәрізді тесігі

Зеерлі цилиндрдің саңылаулары конустық болады, өйткені Бернулли теңдеуі бойынша конустық тесіктің көлденең қимасы үлкенірек жерде май көлденең қимасы кішірек аймақтарға қарағанда төмен жылдамдықпен ағады (2 б-сурет). Қысымды реттеу механизмін орнату және зеер цилиндріне конустық тесік жасау нәтижесінде құрамында майы бар шикізатты престеу дәрежесін жоғарылатамыз, сәйкесінше май шығымдылығын арттырамыз, дайын өнімнің сапасын жақсартамыз және энергия шығынын азайтамыз.

Престеуші шнек пен зеерлі цилиндр арасындағы саңылауды реттеу механизмі конструктивті түрде престеу шнегінің ілгері-кейінді қозғалуына негізделген. Бұл қозғалыс шнек білігінің бойымен бұрамалы-винтті беріліс жүйесі арқылы жүзеге асырылады, ол операторға престеу процесі кезінде саңылауды қашықтан немесе механикалық рычаг арқылы реттеуге мүмкіндік береді. Реттеу диапазоны $\delta = 3 \cdot 10^{-3} – 9 \cdot 10^{-3}$ м аралығында тәжірибелік жолмен анықталған және практикалық жағынан тиімді болып табылады.

Механизмнің сенімділігін қамтамасыз ету үшін реттеу блогы қатты бекітілген тіреуіш втулка мен винттік тетік арқылы қосылған. Қозғалыс шектеуіштері арқылы саңылау тұрақты мәнде ұсталады, бұл престеу процесінің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Мақсары майының реологиялық қасиеттері.

Мақсары майын престеу процесінің математикалық моделін нақтылау үшін оның реологиялық қасиеттері зерттелді. Лабораториялық зерттеулер нәтижесінде майдың тұтқырлығы әртүрлі температурада анықталды. Тәжірибе көрсеткендей, мақсары майы 25 °С температурада ньютондық сұйықтық ретінде сипатталады және оның тұтқырлығы орта есеппен $\eta = 0.045$ Па · с құрайды. Температураның жоғарылауымен тұтқырлық төмендейді: мысалы, 40 °С кезінде – 0.032 П · с, 60 °С кезінде – 0.021 Па · с.

Зерттеу барысында майдың құрылымдық-механикалық қасиеттері ескерілді. Белгілі бір жағдайларда, мысалы, жоғары қысым мен ығысу жылдамдығында, май ньютондық емес сипатқа ие болатыны анықталды. Мұндай жағдайда тиімді

тұтқырлықты сипаттайтын ψ коэффициенті 0.82–0.95 аралығында өзгереді. Бұл мәндер пресс арнасындағы өнімділікті есептеу кезінде (теңдік 13) және Пуазейль теңдеуі бойынша (теңдік 14, 16) қолданылды.

**Нәтижелер және талқылау**

Математикалық сипаттауды жұмыстың мақсатына байланысты престеу процесін теориялық зерттеу келесідей бағыттар негізінде жүргізіледі:

– математикалық сипаттама қойылымын, үш координат жүйесі жазықтықтары бойынша біртұтас ортаның механикалық теңдеулердің құраушылары арқылы негізгі қажетті заңдылық теңдіктерін анықтап аламыз;

– қысым беру механизміне байланысты престеуші арнадағы өнімділік пен қысымның диафрагма саңылауына тәуелді өзгерісін теңдіктер және номограмма көмегімен сипаттама беру;

– престеуші шнек арнасындағы өнімділік пен қысымның жылдамдыққа тәуелді өзгерісін теңдіктер және номограмма көмегімен сипаттама беру;

– зеерлі цилиндрдің құрылымдық ерекшелігіне байланысты бөлінетін майдың өнімділгі қысым беру механизміне тәуелді өзгерісін теңдіктер көмегімен сипаттау;

– қысым беру механизміне байланысты пресс жабдығының өнімділігі мен қысымның, диафрагмалық саңылау мен жылдамдықтарға тәуелді өзгерісін теңдіктер көмегімен сипаттау.

Престеуші шнекті, белгілі бір пішінді және өлшемі бар арналармен ауыстыру арқылы, сыртқы қозғалатын қабырғаның жылжуы кезінде, арналар қимасындағы қысымдар айырмасы мен пресс өнімділігі негізінде престеу процесін сипаттауды, жалпы біртұтас ортаның механикалық әдісі арқылы қарастырамыз [17–19].

Белгілі бір өлшем мен геометриядан тұратын қалыптаушы құрылғыдағы өңделетін материалдың қысымдар айырмасы негізінде жылжитыны белгілі. Ал престің белгілі бір өлшемнен және геометриядан тұратын престеуші құрылғысында өңделіп жатқан материал үстіңгі шеткі қабырғаның әсерінен қозғалады.

Престеуші және престеуші шнек арналарының өнімділігін $Q = Q(\Delta p, \upsilon)$ аламыз, мұнда Δр-қысымдар айырмасы, υ-қабырғаның қозғалу жылдамдығы.

Белгілі бір b, l және h өлшемдерімен шектелген, тұйық кеңістіктің ішінде орналасқан материал элементін қарастырайық.

Мұнда материалдың тығыздығы ρ, арна тереңдігі өсімен қозғалыс материалдың жылдамдығы υ, кернеулер $p_{ij}$ (тұтқыр күштердің әсерінің нәтижесінде болатын), кернеу әсерінен туындайтын қысым p, температура T, уақыт τ функциясы ретінде және кеңістік координаталары x, y, z қарастырылады.

Біртұтас ортаның механикасының теңдеуін шешудегі белгісіздер:

а) материал тығыздығы ρ=ρ(τ,x, y, z);

б) таңдалған координат жүйесі бойынша вектор жылдамдығының үш компоненті:

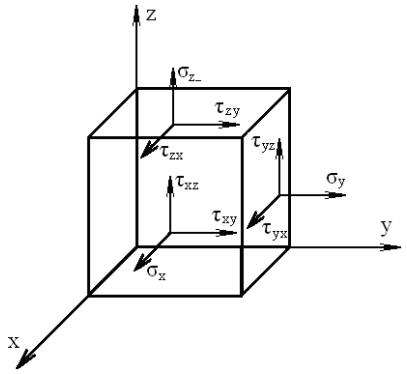
$$\begin{aligned} \upsilon_x &= \upsilon_x(T,x,y,z); \\ \upsilon_y &= \upsilon_y(T,x,y,z); \\ \upsilon_z &= \upsilon_z(T,x,y,z). \end{aligned} \tag{1}$$

в) тензор кернеуінің алты компоненті (тоғыздың ішінен тек алтауы тәуелсіз болып табылды, себебі pij=pij тензордың симметриясына байланысты болғандықтан):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x(\tau,x,y,z); \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx}(\tau,x,y,z); \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy}(\tau,x,y,z); \\ \tau_{zx} &= \tau_{zx}(\tau,x,y,z); \\ \sigma_y &= \sigma_y(\tau,x,y,z); \\ \sigma_z &= \sigma_z(\tau,x,y,z). \end{aligned} \tag{2}$$

Біздің белгілеуімізде 3-суретке сәйкес тік кернеулерді бір дәрежемен көрсетсек $\sigma_x$, ал жанама кернеу екі бөлек дәрежелермен белгіленеді $\tau_{zx}$.

г) қозғалыстағы материалдың температурасы T= T (τ, x, y, z).




3-сурет – Жазықтықтағы материалдардың
кернеу элементтерінің құраушылары

Осы он бір белгісіздерді анықтау үшін осынша теңдеуден тұратын жүйе құрып, оны шешу қажет. Мұндай теңдеулер:

а) үзіліссіздік теңдеуі:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \upsilon_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \upsilon_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \upsilon_z) = 0\,. \tag{3}$$

Бұл теңдеу әмбебап сипат береді, ол кез келген материалды ортаның қозғалысы кезінде орындалуы керек, оның түрі ортаның қасиеттеріне тәуелді

емес, яғни әртекті орта: су, ауа, металл тағы сол сияқтылар жүйе түрлерінің қозғалысын сипаттайды.

б) таңдалған тіктөртбұрышты координат жүйесіндегі қозғалыстың үш теңдеуі:

$$\rho\left(\frac{\partial \upsilon_x}{\partial \tau}+\upsilon_x\frac{\partial \upsilon_x}{\partial x}+\upsilon_y\frac{\partial \upsilon_x}{\partial y}+\upsilon_z\frac{\partial \upsilon_x}{\partial z}\right)=\rho F_x+\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z};$$
$$\rho\left(\frac{\partial \upsilon_y}{\partial \tau}+\upsilon_x\frac{\partial \upsilon_y}{\partial x}+\upsilon_y\frac{\partial \upsilon_y}{\partial y}+\upsilon_z\frac{\partial \upsilon_y}{\partial z}\right)=\rho F_y+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (4)$$
$$\rho\left(\frac{\partial \upsilon_z}{\partial \tau}+\upsilon_x\frac{\partial \upsilon_z}{\partial x}+\upsilon_y\frac{\partial \upsilon_z}{\partial y}+\upsilon_z\frac{\partial \upsilon_z}{\partial z}\right)=\rho F_z+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \sigma_z}{\partial z},$$

мұнда $F_x$,$F_y$,$F_z$ – координат өсіне массалық күштер проекциясы.

в) материал деформациясы жылдамдығының тензорлық компоненттері мен кернеу тензорының компоненттерін байланыстыратын алты реологиялық теңдеулер. Бұл байланыс өңделетін материалдың реологиялық құрамын анықтайды.

г) энергия теңдеулері.

Теңдеулер жүйесін шешу есебін жеңілдету үшін материалдың қозғалысына сәйкес төмендегідей мүмкін болатын қысқартуларды енгіземіз:

1. Энергия теңдеуінсіз өтуге мүмкіндік беретін изотермиялық есепті қарастырамыз.

2. Сығылатын материалды қарастыра отырып, ортаның тығыздығын айнымалы ретінде ($\rho\neq const$) қабылдаймыз, онда үзіліссіздік теңдеуін басқа түрге келтірейік

Теңдеуге кіретін дербес туындылар ρ тығыздықтың жылдамдықтың $\upsilon_x$, $\upsilon_y$, $\upsilon_z$ құраушыларының көбейтіндісінен алынып отыр. Ал бұл шамалар координата өстері мен уақытқа қатысты функциялар болғандықтан:

$$\frac{\partial(\rho\upsilon_x)}{\partial x}=\rho\frac{\partial \upsilon_x}{\partial x}+\upsilon_x\frac{\partial \rho}{\partial x};$$
$$\frac{\partial(\rho\upsilon_y)}{\partial y}=\rho\frac{\partial \upsilon_y}{\partial y}+\upsilon_y\frac{\partial \rho}{\partial y}; \quad (5)$$
$$\frac{\partial(\rho\upsilon_z)}{\partial z}=\rho\frac{\partial \upsilon_z}{\partial z}+\upsilon_z\frac{\partial \rho}{\partial z}.$$

3. Материалдың орныққан қозғалысын қарастырамыз, яғни пресс жабдығына қосу және тоқтау тәртіптерін талдамаймыз. Бұл қысқартудың арқасында шамалардың уақыт бойынша туындылары нөлге тең болады. Яғни, $\frac{\partial \upsilon_x}{\partial \tau}=0$, $\frac{\partial \upsilon_y}{\partial \tau}=0$, $\frac{\partial \upsilon_z}{\partial \tau}=0$, $\frac{\partial \rho}{\partial \tau}=0$.

Егер арнаның ұзындығы l бойынша р қысымның өзгерісі Δр-ға тең болса, біртұтас ортаның механикалық есебін шешу үшін енгізілген қысқартуларды пайдаланып, Пуассон теңдеуі түрінде алуға болады:

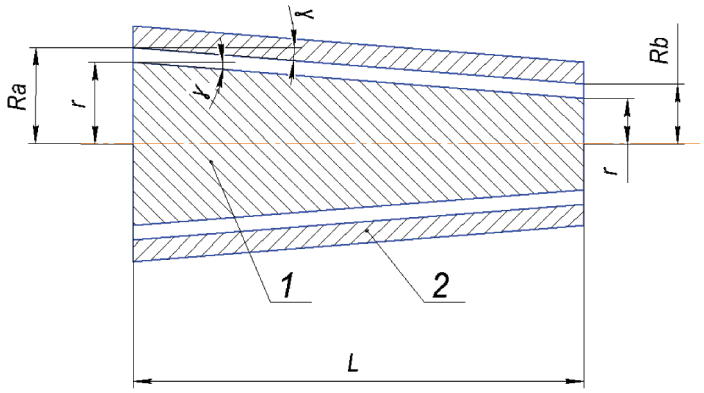
$$\frac{\partial^2 \upsilon_Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \upsilon_Z}{\partial y^2} = -\frac{\Delta p}{\eta_{эф} l}, \tag{6}$$

мұнда $\eta_{эф} = \eta_M + \frac{\theta_0}{\dot{\gamma}}$ тиімді тұтқырлық, Па·с; Δр – қысымдар айырмасы, Па; l – арнаның ұзындығы, м.

3.1 Қысым беру механизміне байланысты престеуші арнадағы өнімділік пен қысымның диафрагма саңылауына тәуелді өзгерісі.

Престеуші шенек пен зеерлі цилиндр арасындағы саңылауды тарылту арқылы қысымды реттеу жолын ұсынылады. Яғни біздің жағдайда престеуші арна ретінде престеуші шнек пен зеерлі цилиндр арасындағы саңылауды қарастырамыз.

Біздің жағдайда 4 суретке сәйкес қысым беруші механизм әсерінде қарастыратын престеуші арнаның пішіні сақиналы-конусты болып табылады.




1– престеуші шнек; 2 – зеерлі цилиндр
4-сурет – Сақиналы-конусты престеуші арна

Конусты жазықтық болып табылатын аймақта соңғы көлбеулік цилиндр болып келетіндіктен, өнімнің бастапқы және соңғы конустың диаметрлері арасынан орташа арифметикалық диаметрді аламыз, онда:

$$K_Ф = \frac{3\pi d_a^3 \, d_b^3 (d_a - d_b)\cos\gamma_Ф}{128 l_Ф \left(d_a^3 - d_b^3\right)}, \tag{7}$$

мұнда $d_a=R_a+r_a$, $d_b=R_b+r_b$ – орташа диаметрлер; $\frac{l_ф}{cos\gamma_ф}$ – арнаның ұзындығы.

Престеуші арнадағы өнімділік мына түрде анықталады, м³/с:

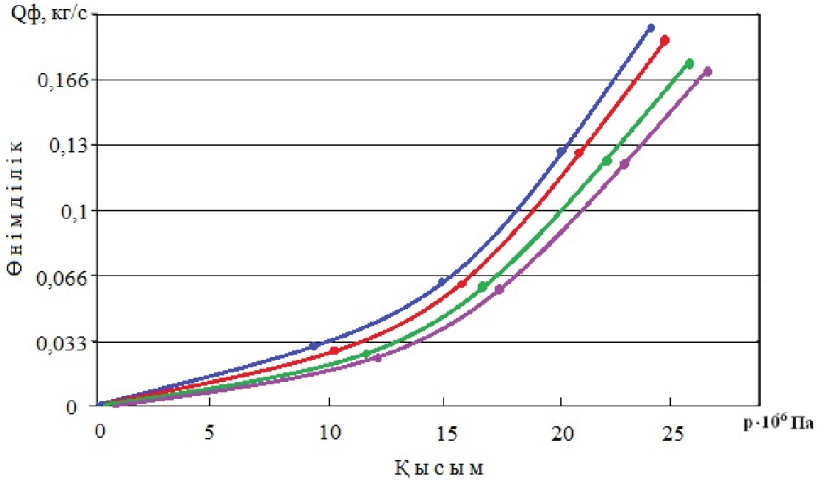
$$Q_{Ф.} = \frac{3\pi d_a^3 d_b^3 (d_a - d_b)\Delta p \cos\gamma_Ф}{128\eta_{эф} l_Ф \left(d_a^3 - d_b^3\right)}, \quad (8)$$

мұнда $\Delta p = K_{П.1} \cdot \eta_{эф.} \cdot n$ – сақиналы-конусты қалыптаушы механизмдегі қысымдар айырмасы, Па.

Орташа диаметрлерді $d_a$, $d_b$ шнектің ішкі диаметрі d, арнадағы өнімнің қабатының қалыңдығы δ, конустылық бұрышы $\gamma_Ф$ шамалары арқылы сипаттасақ:

$$d_a = d + \frac{\delta}{\cos\gamma_Ф}, \quad d_b = d + \frac{\delta}{\cos\gamma_Ф} + 2l_Ф \cdot tg\alpha = d + \frac{(\delta + 2l_Ф \sin\gamma_Ф)}{\cos\gamma_Ф} \quad (9)$$

Алынған da, db мәндерін (8) теңдікке қойып қысым беру механизміне байланысты престеуші арна өнімділігі QФ мен p қысымдардың диафрагма саңылауындағы δ өнім қабатының қалыңдығына тәуелділігін номограмма түрінде көрсетеміз. Тәуелділіктерді көрсететін көлбеулік сызық координат басынан басталады, яғни нөлдік қозғалыс кезінде. Бұл 5-суретке сәйкес номограммадан байқайтынымыз қалыптаушы қысымды реттеу механизмінің кедергісі артқан сайын өнімділігі кемитіндігі соған сәйкес қысымның артатындығын көруге болады. Номограмма көмегі негізінде математикалық моделдеудің сараптамалық жүйесі арқылы престеуші шенек пен зеерлі цилиндр арасындағы саңылаулардың өзгерісіне тәуелді, майдың тиімді бөлінуі қажетті үйлесімді өнімділік пен қысымды анықтап, таңдап алуымызға болады.




δ=3·10$^{-3}$ м; δ=5·10$^{-3}$ м; δ=7·10$^{-3}$ м; δ=9·10$^{-3}$ м

5-сурет – Қысым беру механизміне байланысты престеуші арнадағы өнімділік пен қысымның диафрагма саңылауына тәуелді өзгерісінің номограммасы

3.2 Престеуші шнек арнасындағы өнімділік пен қысымның жылдамдыққа тәуелді өзгерісі

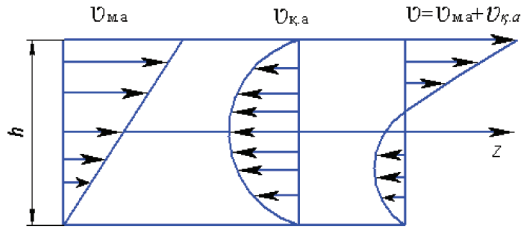
Өнімді престеуші шнекпен престеу кезінде құрылымдық-механикалық қасиеттері мен конструкциялық ерекшеліктерін ескере отырып негізгі параметрлердің теңдіктерін өрнектеп алсақ.

Престеуші шнекке ең алдымен қозғалыс жылдамдығын беретіндіктен сипатауды 6-суретке сүйене отырып төмендегідей екіге бөліп қарастырайық:

а) Шнектің айналысынан өнімнің арнадағы қозғалысы мәжбүрлік ағынның сипаттамасымен қарастырамыз;

б) Шнектің айналысынан мәжбүрлік ағынның әсерінен туындайтын қарсы ағынның сипаттамасы қарастырамыз.

Престеуші шнектің өнімділігін мәжбүрлі және қарсы ағындардың қозғалыс жылдамдықтарының негізінде анықтасақ, м$^3$/с:




$\upsilon_{м.а}$ – мәжбүрлі ағынның жылдамдығы;
$\upsilon_{қ.а.}$ – қарсы ағынның жылдамдығы; $V_z$ – жылдамдықтардың қосындысы.
6-сурет – Шнекті арнаның биіктігіне қатысты
жылдамдықтардың қосынды эпюрасы

$$Мәжбүрлік\ ағын - \frac{\pi D \cos\alpha_{op.}}{2} \cdot h \cdot \frac{(a+b)}{2} \cdot F_d \cdot \psi\ , \qquad (10)$$

$$Қарсы\ ағын - \frac{(a+b) \cdot h^3}{24 \cdot l_H} \cdot F_p , \qquad (11)$$

мұнда ψ – ньютондық емес массалардың ығысуын ескеретін коэффициент; $F_d$, $F_p$ – ішкі қатынастарды ескеретін формулалар коэффициенттері, сандық мәндері номограмма бойынша анықтаймыз.

$$Q_H = \frac{\pi D \cos\alpha \cdot h \cdot \frac{a+b}{2}}{2} \cdot F_\alpha \cdot \psi \cdot n - \frac{\frac{a+b}{2} \cdot h^3}{12 l_H} \cdot F_p \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{эф}} , \qquad (19)$$

Мұндағы $\eta_{эф.}$ – масса үшін тиімді тұтқырлық, Па·с

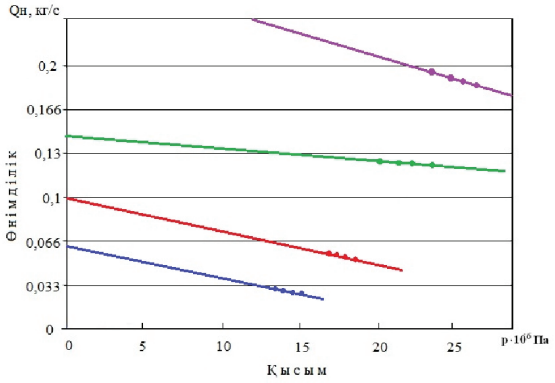
$$\eta_{эф} = \eta_M + \frac{\theta_0}{\dot{\gamma}}, \tag{12}$$

мұнда $\dot{\gamma} = \frac{\pi D n}{60(D-d)}$ – ығысу кезіндегі деформация жылдамдығы, 1/с;

d – шнектің ішкі диаметрі, м; $\theta_0$ – шектік ығысу кернеуі. Па.

Егер престеуші шнектің геометриясынан мәжбүрлі ағынның және қарсы ағынның коэффициенттерін $К_{н1}$, $К_{н2}$ белгілесек, онда престеуші шнек арнасындағы өнімділікті келесідей қысқартылған түрде жазуға болады:

$$Q_H = K_{H1} n - \frac{K_{H2}}{\eta_{эф.}} \Delta p \tag{13}$$




ω = 5,2 рад/с; ω = 6,2 рад/с; ω = 6,8 рад/с; ω = 7,3 рад/с.

7-сурет – Престеуші шнек арнасындағы өнімділік пен қысымның жылдамдыққа тәуелді өзгерісінің номограммасы

Бұл 7 суретен QH. престеуші шнектің арнасындағы өнімділіктің қысымдар айырмасына $\Delta p$ және шнектің айналыс жиілігіне n сызықты түрде тәуелділігін көреміз.

3.3 Зеерлі цилиндрдің құрылымдық ерекшелігіне байланысты бөлінетін майдың өнімділігінің қысым беру механизміне тәуелді өзгерісі

Біздің жағдайда зеерлі цилиндрдегі саңылаулар бойлық түрде салынған.

Пуазейль теңдеуіне сүйене отырып престеуші шнектін бірқалыпты қозғалысы кезінде зеерлі цилиндр тесіктерінен өтетін жалпы майдын көлемдік өнімділігін анықтаймыз, $м^3/с$.

$$Q_M = \frac{N_з a b^3}{24 l \eta_M} \cdot \xi \cdot \Delta p_{\max} = \frac{N_з a b^3 \cdot \xi}{24 l} \cdot \frac{\Delta p_{\max}}{\eta_M} = K_з \frac{\Delta p_{\max}}{\eta_M}. \tag{14}$$

Ал массалық шығыны, кг/с:

$$m_M = Q_M \cdot \rho_M = K_з \frac{\Delta p_{\max}}{\eta_M} \rho_M, \quad (15)$$

мұнда $К_з$ – зеерлі цилиндрдің геометриялық коэффициенті, м$^3$

$\rho_М$ – майдың тығыздығы.

Осы теңдіктен қажетті қысымды анықтаймыз, Па:

$$p_{\max} = \frac{Q_П}{K_3} \eta_{эф} \cdot q_0 \frac{\rho_П}{\rho_M}. \quad (16)$$

Сонымен, престеу барысында майды бөліп алу үшін шнектің бойлық өсі бойынша қысым мөлшері келесі өрнекпен табылады:

$$p_{\max} = q_\rho \frac{Q_П}{K_3} \eta_{эф} \quad (17)$$

мұнда $q_ρ$– майды белгілі мөлшерде бөліп алудағы сапалық көрсеткіш.

3.4 Қысым беру механизміне байланысты пресс жабдығының өнімділігі мен қысымның, диафрагмалық саңылау мен жылдамдықтарға тәуелді өзгерісі

$К_{Н1}$, $К_{Н.2}$ және $К_Ф$ мәндерін теңдіктерге қойып, прессті 1-ші және 2-ші геометриялық коэффициентерін анықтасақ:

$$K_{П1.} = \frac{K_{Н.1}}{K_{Н..2} + K_Ф}, \quad (18)$$

$$K_{П2.} = \frac{K_{Н.1} \cdot K_Ф}{K_{Н\ 2} + K_Ф}, \quad (19)$$

Матрицалы қалыптаушы құрылғыдағы қысымдар айырмасын анықтаймыз, Па:

$$\Delta p = K_{П.1} \cdot \eta_{эф.} \cdot n, \quad (20)$$

Осыдан пресс жабдығының жалпы өнімділігін анықтасақ, кг/с:

$$Q_П = K_{П.2} \cdot n \cdot \rho_П, \quad (21)$$

мұнда $\rho_п$ – престелген өнімнің тығыздығы, кг/м$^3$;

(21) теңдік престің соңындағы қысымды анықтауға көмектеседі:

$$p = \frac{K_{Н.1} \cdot K_Ф}{K_3 (K_{Н..2} + K_Ф)} q_\rho \cdot n \cdot \eta_{эф}, \quad (22)$$

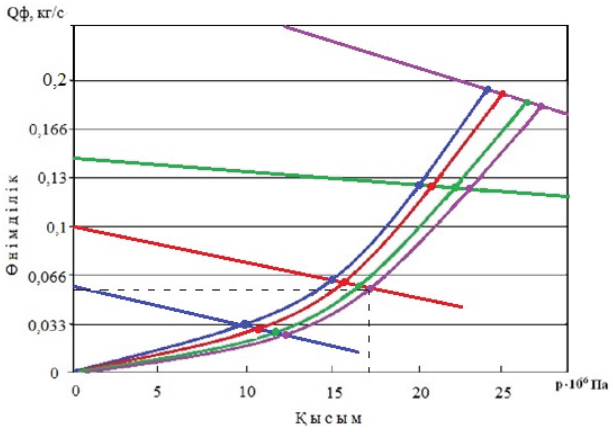
мұнда $q_\rho = q_0 \frac{\rho_П}{\rho_М}$ – майды тиімді мөлшерде бөліп алудағы сапалық көрсеткіш.

Осы (22) теңдіктегі $К_з$ зеерлі цилиндрдің геометриялық коэффициенті:

$$K_з = \frac{N_з L_з b_з^3 \xi}{24 l_з}, \quad (23)$$

$b_з$ – зеерлі саңылаулардың ені, м; $L_з$ – зеерлі саңылаулардың ұзындығы, м; $l_з$ – зеерлі цилиндрдің қабырғасының қалыңдығы, м; ξ – қысымның бүйірлік коэффициенті; $N_з$ – зеерлі саңылаулардың саны.

Пресс жабдығына 5, 7 суреттерге сәйкес қалыптаушы қысым беру механизмі мен жылдамдықтарды сипаттайтын номограммаларды біріктіріп, 8 суретке сәйкес көлбеулік өзгерістердің қиылыстарынан майдың тиімді бөлінуіне қажетті өнімділік пен қысымды таңдаймыз.




δ=3·10$^{-3}$ м; δ=5·10$^{-3}$ м; δ=7·10$^{-3}$ м; δ=9·10$^{-3}$ м
ω = 5,2 рад/с; ω = 6,2 рад/с; ω = 7,2 рад/с; ω = 8,2 рад/с.

8-сурет – Қысым беру механизміне байланысты пресс жабдығының өнімділігі мен қысымның, диафрагма саңылау мен жылдамдықтарға тәуелді өзгерісінің номограммасы

Қысым беру механизм және престеуші шнек құрылғыларына жасалған математикалық моделдеудің сараптама жүйесі, пресс жабдығының белгілі бір шеңбердегі жылдамдықтар мен қалыптаушы саңылау арасындағы байланысынан майдың тиімді бөлінуі кезіндегі өнімділік пен қысымның өзгерісін анықтауға көмектеседі.

Белгілі бір шеңбердегі жылдамдықтар мен диафрагмалық саңылау арасындағы байланысынан престеу процесінің талаптарын қанағаттандыратын, үйлесімді параметрлері ω=8,2 рад/с жылдамдық пен δ=5 ·10$^{-3}$ м шнек пен зеерлі цилиндрлер саңылауларының көлбеулік қиылыстарынан көрсетілген үзік сызық арқылы

майдың тиімді бөлінуі кезіндегі өнімділік пен қысымды анықтадық. Тәжірибелік алынған нәтижелер мен математикалық моделдеудің сараптама жүйесінің нәтижелері арасындағы сәйкестіктерінің ауытқу мөлшері 4,6 % аспайды.

Модельдің дұрыстығын тексеру үшін тәжірибелік зерттеулер бірнеше рет қайталанып жүргізілді. Жалпы алғанда, әртүрлі айналу жиілігі (ω = 5.2–8.2 рад/с) және шнек пен зеерлі цилиндр арасындағы саңылау мәндері ($\delta = 3 \cdot 10^{-3}$–$9 \cdot 10^{-3}$ м) бойынша 12 эксперименттік серия орындалды. Әрбір серияда кемінде 3 рет қайталау жүргізілді. Осылайша, модельдің шынайы өндірістік жағдайға сәйкестігін бағалау үшін жалпы 36 сынақ нәтижесі жинақталды.

Нәтижелерді математикалық модельмен салыстыру барысында орташа квадраттық ауытқу 4,6 % аспайтыны байқалды. Алынған деректердің шашырау аймағы орташа мәнге қатысты ±3–5% шегінде болды. Бұл модельдің өндірістік қолдану үшін жеткілікті дәлдікпен сипатталатынын көрсетеді. Барлық сынақтар бірдей температуралық жағдайда (25 ± 1 °C), бір типті мақсары шикізаты мен престеу ұзақтығы бірдей болған жағдайда жүргізілді.

Мақсары майын престеу процесін сипаттайтын математикалық модель келесі негізгі теңдеулер мен тәуелділіктерге негізделген:

Біртұтас ортаның механикасынан алынған Пуассон теңдеуі:

$$v_{\text{эф}} \cdot \frac{d^2p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{l}$$

Сақиналы-конусты арнадағы өнімділік:

$$Q_{\text{ф}} = \frac{\pi \cdot (d_a^2 - d_b^2 \cdot \Delta p)}{16 \cdot \mu \cdot l}$$

Престеуші шнек арнасындағы мәжбүрлі және қарсы ағындарға тәуелді өнімділік:

$$Q_H = (v_{\text{м а}} - v_{\text{к а}}) \cdot F$$

Зеерлі цилиндр арқылы бөлінетін майдың көлемдік өнімділігі (Пуазейль теңдеуі негізінде):

$$Q_{\text{м}} = \frac{K_{\text{з}} \cdot \Delta p}{\eta_{\text{эф}}}$$

Майды тиімді мөлшерде бөліп алу кезіндегі соңғы қысым

$$p = \frac{q_\rho \cdot \eta_{\text{эф}}}{K_{\text{з}}}$$

Зеерлі цилиндрдің геометриялық коэффициенті

$$K_{\text{з}} = \frac{b_{\text{з}} \cdot L_{\text{з}} \cdot N_{\text{з}}}{\xi \cdot l_{\text{з}}}$$

Реологиялық параметрлерді ескеру.

Жоғарыда келтірілген математикалық модельдеулерді нақтылау үшін, мақсары майының температураға тәуелді тұтқырлығы мен құрылымдық қасиеттері есепке алынды. Бұл модельдегі ηэф (тиімді тұтқырлық) параметрі ретінде әртүрлі температуралардағы нақты өлшенген тұтқырлық мәндері қолданылды. Сонымен

қатар, ньютондық емес ағын жағдайында ψ коэффициенті енгізіліп, ол шнек ішіндегі мәжбүрлі және қарсы ағынның өзара әрекетін сипаттауға мүмкіндік берді (теңдеулер 10–12).

Бұл тәсіл пресс жабдығының сенімді жұмысын қамтамасыз ету үшін нақты қысым мен өнімділікті болжауға мүмкіндік берді.

3.5 Математикалық модельдің параметрлерге сезімталдығын талдау

Математикалық модельдің айнымалы параметрлерге сезімталдығын бағалау мақсатында негізгі кіріс параметрлерінің аздаған өзгерістеріне модель реакциясы сарапталды. Бұл параметрлерге: шнек айналу жиілігі (ω), диафрагма саңылауының қалыңдығы (δ), тиімді тұтқырлық (ηэф), қысым айырмасы (Δp), зеерлі цилиндрдің геометриялық коэффициенті (Кз) жатады.

Әрбір параметр ±10% аралығында өзгертіліп, модельдің өнімділік (Q) және қысым (p) көрсеткіштеріне әсері бағаланды. Сезімталдық коэффициенті келесі формуламен есептелді:

$$S = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X}$$

мұндағы, Y – шығыс параметр (мысалы, өнімділік), X – кіріс параметр (мысалы, ω), Δ – өзгеріс.

Талдау нәтижесінде модельдің ең жоғары сезімталдығы диафрагма саңылауына (δ) және шнек айналу жиілігіне (ω) қатысты екені анықталды (S > 1). Бұл модель осы параметрлерге өте тәуелді екенін көрсетеді. Ал тұтқырлық пен қысым айырмасына қатысты сезімталдық орташа деңгейде болды (S ≈ 0.5–0.8).

**Қаржыландыру туралы ақпарат**

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігі қаржыландыратын 2024–2026 жылдарға арналған «Жас ғалым» жобасы AP22685422 «Мақсары майын өндіру тиімділігін жоғарылатуға арналған пресс жабдығын жетілдіру» тақырыбы бойынша жас ғалымдардың зерттеулерін гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалды.

**Қорытынды**

Пуассон теңдеуі арқылы үздіксіз ортаның механикасына негізделген престеу материалының үздіксіз қозғалыста екенін дәлелденді. Математикалық модельдің алынған тәуелділіктері (өрнектері) престеу процесін жетілдіру кезінде қажетті параметрлерді алдын ала ескере отырып, оңтайлы мәндерді анықтауға мүмкіндік береді. Шнекті пресс үлгісін жасау нәтижесінде оңтайлы параметрлері бар төмен өнімділікке арналған престерді жобалау мүмкіндігі туындады.

Модельде қолданылған реологиялық параметрлер – тұтқырлық, температураға тәуелділік және ньютондық емес қасиеттер – мақсары майының физикалық табиғатына сәйкес келеді және тәжірибе арқылы нақтыланды. Бұл параметрлерді ескеру математикалық моделдің инженерлік қолданыстағы сенімділігін арттырып, нақты престеу режимдерін болжауға және оңтайлы параметрлерді таңдауға мүмкіндік берді.

Модельдің дұрыстығы көп мәрте орындалған тәжірибелік зерттеулермен расталды. Орташа ауытқу 4,6 %-дан аспайды, ал өлшеу нәтижелерінің шашырауы

±3–5 % аралығында болды. Бұл математикалық модельді нақты инженерлік есептеулер мен өндірістік құрылғыларды жобалау үшін қолдануға болатынын дәлелдейді.

## ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Республика Казахстан. Послание Президента. Национальный план развития Республики Казахстан до 2025 года: Послание Президента: [дата 25.12.2023].

2 Республика Казахстан. Президент (2023; К.К.Токаев.) Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана: («Справедливое государство. Единая нация. Благополучное общество»). – Астана, 2023.

3 **Nazir, M., Arif, S., Ahmed, I., Khalid, N.** Safflower (Carthamus tinctorius) seed/ M. Nazir, S. Arif, I.Ahmed, N. Khalid// Oilseeds : Health Attributes and Food Applications. – 2021. – P. 427–453.

4 **Gomashe, Sunil S., Ingle, Krishnananda P., Sarap, Yukta A., Chand, D., Rajkumar, S.** Safflower (Carthamus tinctorius L.) : An underutilized crop with potential medicinal values / Sunil S. Gomashe, Krishnananda P. Ingle, Yukta A. Sarap, D. Chand, S. Rajkumar // Annals of Phytomedicine. – 2021. – Vol. 10. – №. 1. – P. 242–248.

5 **Hong, H., Lim, J., Kothari, D., Kwon, S., Kwon, H., Han, S., Kim, S.** Antioxidant properties and diet-related α-glucosidase and lipase inhibitory activities of yogurt supplemented with safflower (Carthamus tinctorius L.) petal extract / H. Hong, J.Lim, D.Kothari, S.Kwon, H. Kwon, S. Han, S.Kim // Food Science of Animal Resources. – 2021. – Vol. 41. – № 1. – P. 122.

6 **Khémiri, I., Essghaier, B., Sadfi-Zouaoui, N., Bitri, L.** Antioxidant and antimicrobial potentials of seed oil from Carthamus tinctorius L. in the management of skin injuries / I. Khémiri, B. Essghaier, N. Sadfi-Zouaoui, L. Bitri // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. – 2020. – Vol. 2020.

7 **Ergonul, P., Ozbek, Z.** Cold pressed safflower (Carthamus tinctorius L.) seed oil /P. Ergönül, Z.Özbek // Cold Pressed Oils. – 2020. – P. 323–333.

8 **Singh, R., Jauhar, P.** Genetic Resources, Chromosome Engineering, and Crop Improvement:Vegetable Crops/ R. Singh, P. Jauhar. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – Vol.3. – 456 c.

9 **Зайцева, Н. А., Ячменева, Е. В., Климова, И. И.** Селекционная ценность сафлора красильного в аридных условиях северного прикаспия //Вестник Российского университета дружбы народов. – Серия Агрономия и животноводство. – 2022. – Vol. 17. – № 4. – С. 466–472.

10 Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в Республике Казахстан. – Астана. – 2013. – С. 119–120.

11 **Kairbayeva, A., Vasilenko, V., Dzhinguilbayev, S., Baibolova, L., Frolova, L.** Development of the mathematical model for the process of oil raw materials pressing/ A.Kairbayeva, V.Vasilenko, S. Dzhinguilbayev, L.Baibolova, L.Frolova // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Vol. 7. – P. 145–149.

12 **Kumitskiy, B., Savrasova, N., Melkumov, V., Aralov, Ye.** Mathematical modeling of cold pressing the sheet composite. building materials and products/ B. Kumitskiy, N. Savrasova, V. Melkumov, Ye. Aralov //Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2020. – №. 3. – P. 55–64.

13 **Burago, N., Nikitin, I.** Mathematical Model and Algorithm for Calculating Pressing and Sintering / N.Burago, I. Nikitin, //Mathematical Models and Computer Simulations. – 2019. – Vol. 11. – P. 731–739.

14 **Sokolovskyy, J. Dendiuk, M., Bakalets, A.** Mathematical modeling of the two -dimentional moisture and viscoelasticity states of wood in the process of drying / J. Sokolovskyy, M. Dendiuk, A. Bakalets // Forest as renewable source of vital values for changing world : IAWS plenary meeting and conference. – 2009. – P. 34.

15 **Gurtas Seyhan F., Evranuz O.** Low temperature mushroom (A. bisporus) drying with desiccant dehumidifiers / F. Gurtas Seyhan, O. Evranuz //Drying technology. – 2000. – Vol. 18. – № 1–2. – P. 433–445.

16 **Mursalykova, M., Kakimov, M., Kassenov A., Iskakov, B. Sergibayeva, Zh., Kaspakov, E., Zhumadilova, G., Shulenova, A., Kokayeva, G., Suychinov, A.** Mathematical Modeling of Screw Press Configuration for Processing Safflower Oil / M. Mursalykova, M. Kakimov, A. Kassenov, B. Iskakov, Zh. Sergibayeva, E. Kaspakov, G. Zhumadilova, A. Shulenova, G. Kokayeva, A. Suychinov//Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 5. – P. 3057.

17 **Урьев, Н. Б., Талейсник, М. А.** Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс : монография. – М. : Издательство Пищевая промышленность, 1976. – 240 с.

18 **Добронравов, В. В., Никитин, Н. Н.** Курс теоретической механики : учебник / В. В. Добронравов. – Н. Н. Никитин. – М. : Высшая школа, 1983. – 575 с.

REFERENCES

1 Respublika Kazaxstan. Poslanie Prezidenta. Nacional`ny`j plan razvitiya Respubliki Kazaxstan do 2025 goda [National Development Plan of the Republic of Kazakhstan until 2025] : Poslanie Prezidenta: [data 25.12.2023]

2 Respublika Kazaxstan. Prezident (2023; K.K.Tokaev.) Poslanie Glavy` gosudarstva Kasy`m-Zhomarta Tokaeva narodu Kazaxstana [Address of the Head of State Kasym-Jomart Tokayev to the people of Kazakhstan] : («Spravedlivoe gosudarstvo. Edinaya naciya. Blagopoluchnoe obshhestvo»). – Astana, 2023.

3 **Nazir M., Arif S., Ahmed I., Khalid N.** Safflower (Carthamus tinctorius) seed / M. Nazir, S. Arif, I. Ahmed, N. Khalid // Oilseeds : Health Attributes and Food Applications. – 2021. – P. 427–453.

4 **Gomashe S. S., Ingle K. P., Sarap Y. A., Chand D., Rajkumar S.** Safflower (Carthamus tinctorius L.) : an underutilized crop with potential medicinal values / S. S. Gomashe, K. P. Ingle, Y. A. Sarap, D. Chand, S. Rajkumar // Annals of Phytomedicine. – 2021. – Vol. 10. – № 1. – P. 242–248.

5 **Hong H., Lim J., Kothari D., Kwon S., Kwon H., Han S., Kim S.** Antioxidant properties and diet-related α-glucosidase and lipase inhibitory activities of yogurt supplemented with safflower (Carthamus tinctorius L.) petal extract / H. Hong, J. Lim, D. Kothari, S. Kwon, H. Kwon, S. Han, S. Kim // Food Science of Animal Resources. – 2021. – Vol. 41. – № 1. – P. 122.

6 **Khémiri I., Essghaier B., Sadfi-Zouaoui N., Bitri L.** Antioxidant and antimicrobial potentials of seed oil from Carthamus tinctorius L. in the management of skin injuries / I. Khémiri, B. Essghaier, N. Sadfi-Zouaoui, L. Bitri // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. – 2020. – Vol. 2020.

7 **Ergonul P., Ozbek Z.** Cold pressed safflower (Carthamus tinctorius L.) seed oil / P. Ergonul, Z. Ozbek // Cold Pressed Oils. – 2020. – P. 323–333.

8 **Singh R., Jauhar P.** Genetic Resources, Chromosome Engineering, and Crop Improvement : Vegetable Crops / R. Singh, P. Jauhar. – Boca Raton : CRC Press, 2006. – Vol. 3. – 456 c.

9 **Zajceva N. A., Yachmeneva E. V., Klimova I. I.** Selekcionnaya cennost` saflora krasil`nogo v aridny`x usloviyax severnogo prikaspiya [Breeding value of safflower dye in arid conditions of the Northern Caspian region] //Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby` narodov. – Seriya Agronomiya i zhivotnovodstvo. – 2022. – Vol. 17. – № 4. – P. 466–472.

10 Gosudapstvenny`j peestp selekcionny`x dostizhenij, dopushhenny`x k ispol`zovaniyu v Pespublike Kazaxstan [State Register of Breeding Achievements Approved for Use in the Republic of Kazakhstan] Astana, 2013. – P. 119–120.

11 **Kairbayeva A., Vasilenko V., Dzhinguilbayev S., Baibolova L., Frolova L.** Development of the mathematical model for the process of oil raw materials pressing / A. Kairbayeva, V. Vasilenko, S. Dzhinguilbayev, L. Baibolova, L. Frolova // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Vol. 7. – P. 145–149.

12 **Kumitskiy B., Savrasova N., Melkumov V., Aralov Ye.** Mathematical modeling of cold pressing the sheet composite. Building materials and products / B. Kumitskiy, N. Savrasova, V. Melkumov, Ye. Aralov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2020. – № 3. – P. 55–64.

13 **Burago N., Nikitin I.** Mathematical model and algorithm for calculating pressing and sintering / N. Burago, I. Nikitin // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2019. – Vol. 11. – P. 731–739.

14 **Sokolovskyy J., Dendiuk M., Bakalets A.** Mathematical modeling of the two-dimensional moisture and viscoelasticity states of wood in the process of drying / J. Sokolovskyy, M. Dendiuk, A. Bakalets // Forest as Renewable Source of Vital Values for Changing World : IAWS Plenary Meeting and Conference. – 2009. – P. 34.

15 **Gurtas Seyhan F., Evranuz O.** Low temperature mushroom (A. bisporus) drying with desiccant dehumidifiers / F. Gurtas Seyhan, O. Evranuz // Drying Technology. – 2000. – Vol. 18. – № 1–2. – P. 433–445.

16 **Mursalykova M., Kakimov M., Kassenov A., Iskakov B., Sergibayeva Zh., Kaspakov E., Zhumadilova G., Shulenova A., Kokayeva G., Suychinov A.** Mathematical modeling of screw press configuration for processing safflower oil / M.

Mursalykova, M. Kakimov, A. Kassenov, B. Iskakov, Zh. Sergibayeva, E. Kaspakov, G. Zhumadilova, A. Shulenova, G. Kokayeva, A. Suychinov // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 5. – P. 3057.

17 **Ur`ev, N. B., Talejsnik, M. A.** Fiziko-ximicheskaya mexanika i intensifikaciya obrazovaniya pishhevy`x mass: monografiya [Physico-chemical mechanics and intensification of food masses formation: monograph]. – M. : Izdatel`stvo Pishhevaya promy`shlennost`, 1976. – 240 p.

18 **Dobronravov, V. V., Nikitin, N. N.** Kurs teoreticheskoj mexaniki:uchebnik [Course of theoretical mechanics: textbook] / V. V. Dobronravov., N. N. Nikitin.– Moscow : Vy`sshaya shkola, 1983. – 575 p.

04.02.25 ж. баспаға түсті.
14.02.25 ж. түзетулерімен түсті.
24.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***М. Т. Мурсалыкова[1], М. М. Какимов[2], А. Л. Касенов[3],***
***Г. А. Кокаева[4], Б. М. Искаков[5]***
[1]Семипалатинский государственный университет имени Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей;
[2,3,4,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 04.02.25.
Поступило с исправлениями 14.02.25.
Принято в печать 24.03.25.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА

*Данная статья посвящена разработке конструкций экспериментального шнекового пресса для производства сафлорового масла в малых предприятиях зерноперерабатывающей промышленности. Изложена актуальность масложировой отрасли, в том числе признаки возросшей популярности сафлорового масла в Казахстане и в мире.*

*Рассматривается теоретический анализ для разработки процесса отжима масличного материала в шнековом прессе. Предложена система математического моделирования эффективного распределения масла в соотношении производительности и давления прессования при совершенствовании пресса с помощью механизма регулирования давления. Применяя методы математического моделирования описана и решена задача для отжима жидкой фазы из дисперсного материала. А также приведена принципиальная схема и даны характеристики прессового оборудования и принцип его работы. Описана зависимость улучшения процесса прессования от соотношения различных структурных и определяемых параметров, экспериментально исследованы оптимальные параметры. Предлагаемая методика теоретического расчета процесса прессования позволяет*

*определить оптимальные параметры и проводить отжим сафлорового масла методом прессования с помощью предложенной конструкции рабочего органа. Результаты могут быть использованы в исследовательских центрах и на предприятиях по производству растительного масла для разработки более эффективных способов производства сафлорового масла.*

*Ключевые слова: оборудование, пресс, шнек, зеерный цилиндр, сафлор, отжим, растительное масло.*

***M. Mursalykova[1], M. Kakimov[2], A. Kassenov[3], G. Kokayeva[4], B. Iskakov[5]**
[1]Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan, Semey;
[2,3,4,5]Kazakh Agrotechnical Research University
named after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 04.02.25.
Received in revised form 14.02.25.
Accepted for publication 24.03.25.

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF VEGETABLE OIL PRESSING PROCESS

*This article is devoted to the development of designs of experimental screw press for safflower oil production in small enterprises of grain processing industry. The relevance of the oil and fat industry, including the signs of the increased popularity of safflower oil in Kazakhstan and in the world is outlined.*

*Theoretical analysis for the development of oilseed pressing process in a screw press is considered. The system of mathematical modeling of effective oil distribution in the ratio of pressing capacity and pressure is proposed when improving the press with the help of pressure control mechanism. Applying methods of mathematical modeling the problem for pressing of liquid phase from dispersed material is described and solved. The dependence of the improvement of the pressing process on the ratio of various structural and determinable parameters is described, and the optimum parameters are experimentally investigated. And also the basic scheme is given and characteristics of the press equipment and the principle of its work are given. The proposed methodology of theoretical calculation of the pressing process allows determining the optimal parameters and pressing safflower oil by pressing with the help of the proposed design of the working body. The results can be used in research centers and vegetable oil production enterprises to develop more efficient methods of safflower oil production.*

*Keywords: equipment, press, screw, zeer cylinder, safflower, pressing, vegetable oil.*

ҒТАМР 55.01.83

https://doi.org/10.48081/QGAN2347

***Л. Б. Сағатова[1], С. А. Бортебаев[2], А. Д. Кольга[3],***
***К. К. Елемесов[4], Д. Д. Басканбаева[5]***

[1,2,4,5]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Орал мемлекеттік аграрлық университеті, Ресей Федерациясы, Екатеринбург қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3918-288X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8761-3429
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3194-2274
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6168-2787
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1688-0666
*e-mail: l.sagatova@satbayev.university

# *ДІРІЛ ПАРАМЕТРЛЕРІ БОЙЫНША ОРТАДАН ТЕПКІШ СОРҒЫ АГРЕГАТТАРЫНЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ КҮЙІН БАҒАЛАУ*

*Мақалада ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының дірілдік параметрлерін талдау негізінде жабдықтың техникалық күйін бағалау нәтижелері қарастырылған. Осы зерттеу шеңберінде ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының діріл параметрлері бойынша диагностикалық ақпаратты іріктеу пайдаланылды. Өндірістік жағдайда ортадан тепкіш сорғыларға дірілдік диагностика жүргізу әдістемесі сипатталған. Сорғы агрегаттарының техникалық күйін зерттеу үшін электрқозғалтқышының мойынтіректері мен сорғы дөңгелегінің жетек біліктері таңдалған. Сонымен қатар диагностика жүргізуге арналған анализаторды пайдалану, діріл датчиктерін орналастыру реті баяндалған. Діріл анализаторының көмегімен айналмалы машиналар мен механикалық құрылымдардың діріл параметрлерін олардың техникалық күйін диагностикалау мақсатында талдау функцияларын орындайды. Жұмыс істеп тұрған ортадан тепкіш сорғылардың мойынтірек тораптарының діріл жылдамдығының спектрлері анализатордың көмегімен тіркеліп діріл сигналдарын өңдеу үшін сигналдың жиілік құрамын анықтауға мүмкіндік беретін тікелей спектр (автоспектр) және діріл сигналының конверттік спектрі әдістері қолданылды. Автоспектр графиктеріндегі діріл сигналының гармоникалық компоненттері ақаулардың болуын көрсетеді және сорғы жабдықтарын жүйелі бақылауды қажет етеді. Жүргізілген зерттеулер ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының техникалық күйін бағалау мен болжаудың бірыңғай диагностикалық критерийін құруды қамтамасыз ететін діріл параметрлері бойынша бағалаудың негізгі диагностикалық белгілерін қалыптастыруға мүмкіндік берді.*

*Кілтті сөздер: ортадан тепкіш сорғы, діріл диагностикасы, діріл анализаторы, сорғы қондырғыларын бақылау, деректерді визуализациялау, автоспектр, спектрлік талдау.*

**Кіріспе**

Өндірістік кәсіпорындардағы технологиялық жабдықты пайдалану оның техникалық күйін бағалаумен тығыз байланысты. Сорғы жабдықтарының дірілді диагностикасы олардың техникалық күйін анықтаудың ең тиімді және сенімді әдістерінің бірі болып табылады. Сонымен қатар, жабдыққа диагностика жасау жабдықтың жұмыс істеп тұрған кезінде үздіксіз жүргізілуі тиіс, бұл технологиялық процесті тоқтатпай жүргізуге мүмкіндік береді. Ортадан тепкіш сорғылар сумен жабдықтау және су бұру жүйелерінде, сондай-ақ тау-кен металлургиясы, мұнай өндіру, машина жасау және т. б. әртүрлі салаларда қолданылады.

Дірілді диагностика және жабдықтардың техникалық күйін бағалау мәселелерін зерттеуде П. П. Пархоменко, Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова, И. А. Биргер, М. Д. Генкин, В. Н. Костюков, В. В. Клюев, В. А. Щепетильников және басқа да ғалымдардың еңбектерін атап өтуге болады [1; 2; 3].

Техникалық диагностика бойынша ғылыми нәтижелерді жинақтайтын негізгі еңбектер арасында П. П. Пархоменко мен оның шәкірттерінің еңбектерін атап өткен жөн. Еңбектер дискретті объектілерді диагностикалау теориясының негізгі нәтижелерін қамтиды. В. Н. Костюковтың еңбектерінде объектілердің техникалық күйін бақылау олардың діріл сигналдарының диагностикалық деңгейін өлшеу және кейінгі талдау арқылы қамтамасыз етілетіні анықталған [1; 2; 3]. Ортадан тепкіш сорғы агрегатында техникалық күйді анықтайтын негізгі диагностикалық торап ретінде мойынтірек тораптары таңдалды, себебі олар барлық жұмыс жүктемелерін қабылдайды және агрегаттың басқа тораптарымен салыстырғанда ең төменгі пайдалану ресурсына ие.

Машиналар мен механизмдердің дірілі — математикалық тұрғыдан оңай сипатталмайтын күрделі процесс. Машиналардың дірілі олардың сенімділігі мен ұзақ мерзімділігінің төмендеуіне, жоспардан тыс жөндеуге, апаттық жағдайлардың пайда болуына, технологиялық режимнің бұзылуына және т.б. әсер етеді. Қандай да бір технологиялық жабдықтың, оның ішінде сорғы жабдығының жалпы діріл сенімділігі — оның ең маңызды пайдалану сипаттамаларының бірі болып табылады. Төмен және тұрақты діріл деңгейі, сорғы жабдығының барлық жұмыс режимдерінде резонанстық және автоқозғалыс құбылыстарының болмауы қажетті сенімділікті қамтамасыз етеді. Статистикалық деректерге сәйкес, артқан діріл себебінен өндірістік кәсіпорындарда ортадан тепкіш сорғылардың 60 %-дан астамы істен шығады.

Ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының техникалық күйін бағалау барысында негізінен жоспарлы-сақтандырушылық жөндеу жүйесі қолданылады. Мұнда тек екі фактор ескеріледі: температура мен қысым, бұл жабдықтың техникалық күйі туралы сенімді ақпарат алуға мүмкіндік бермейді. Сондықтан мұндай жағдайда жабдықтың техникалық күйінің деградациялық процестерін болжауға арналған бірегей диагностикалық критерийлерді әзірлеу өзекті болып табылады [4; 5]. Механикалық жабдықтағы ақаулардың әр тобы үшін (мысалы, туралау ақаулары немесе мойынтіректердің зақымдануы) жеке диагностикалық белгілер мен ережелердің үлкен тобын пайдалану қажеттілігін алмастыра алатын бірегей

бірыңғай критерий жасалуы керек. Бірыңғай критерийді қолдану бақылау нәтижелерінің сенімділігін арттыра отырып, диагностикалық сипаттамаларды талдауға кететін уақытты азайтуға мүмкіндік береді. Жұмыстың негізгі мақсаты – сорғы жабдықтарының нақты техникалық күйін тиімді бағалауға және олардың тораптары мен элементтерінің деградациялық процестерінің дамуын болжауға мүмкіндік беретін ақауларды анықтау үшін діріл параметрлері негізінде кешенді диагностикалық тәсіл қалыптастыру болып табылады.

Зерттеу жаңалығы ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының техникалық күйін бағалау үшін діріл параметрлеріне негізделген кешенді диагностикалық тәсіл болып табылады, ол:

– кеңейтілген жиілік диапазонындағы (2–3000 Гц) діріл жылдамдығы мен дірілді үдеудің автоспектрлік және конверттік спектрлік талдауын біріктіреді;

– әртүрлі ақауларға тән гармоникалық компоненттерді сәйкестендіру арқылы бірыңғай диагностикалық критерийді қалыптастырады;

– нақты өндірістік жағдайда алынған вибрациялық трендтер негізінде қалдық ресурсты бағалау әдістемесін ұсынады;

– BALTECH VP-3470 анализаторы арқылы алынған нақты деректерді ISO 10816 стандартымен салыстыра отырып дефектоскопияны цифрлық платформада жүргізуге мүмкіндік береді.

Зерттеу құндылығына келесілерді жатқызуға болады:

– зерттеу нәтижесінде алынған бірыңғай диагностикалық критерий ортадан тепкіш сорғылардың техникалық күйін нақты әрі жедел бағалауға мүмкіндік береді, бұл жөндеу аралық интервалдарды оңтайландыруға жағдай жасайды;

– ұсынылған діріл диагностикасына кешенді тәсіл (автоспектр мен конверт спектрін біріктіріп қолдану) өндірістік жағдайда күрделі ақауларды ерте анықтауға мүмкіндік береді, бұл жабдықтың күтпеген апаттық тоқтап қалуын азайтады;

– BALTECH VP-3470 анализаторы мен ISO 10816 стандартының үйлесімді қолданылуы жабдықтың күйін сандық түрде бақылау жүйесін ендіруге негіз болады;

– жинақталған әдістеме инженерлік тәжірибеде, яғни техникалық қызмет көрсету, жоспарлау және шешім қабылдау процестерінде тәжірибелік құрал ретінде қолдануға бейімделген;

– қалдық ресурсты трендтер арқылы бағалау тәсілі жабдықтың қалпына келтіру ресурсын сандық бағалауға жол ашады, бұл сервистік шығындарды төмендетуге мүмкіндік береді.

**Материалдар мен әдістер**

Дірілді диагностика жабдықтың техникалық күйін бақылаудың негізгі әдістерінің бірі болып табылады. Бұл әдіс дірілдің сипаты мен дәрежесін, содан кейін осы көріністердің себептерін сенімді анықтауға мүмкіндік беретін құрылғылардың көмегімен жүзеге асырылады. Дірілді диагностика сорғы қондырғыларының жұмысы кезінде пайда болатын діріл сигналдарын талдауға негізделген. Бұл сигналдар механикалық компоненттердің, мысалы,

мойынтіректер, біліктер мен тығыздағыштар сияқты элементтердің күйі туралы ақпаратты қамтуы мүмкін [6].

Талдау үшін негізгі параметрлерге мыналар жатады:

– діріл амплитудасы;

– тербеліс жиілігі;

– фазалық ығысу.

Спектрлік талдауды қолдану нақты ақау түрлерімен байланысты сипаттамалық жиіліктерді айқындауға мүмкіндік берді. Мониторинг жүйесі келесі компоненттерден тұрады:

– діріл датчиктері – сорғылардың күйі туралы деректерді жинау үшін;

– контроллер – ақпаратты өңдеу және сақтау үшін;

– бағдарламалық қамтамасыз ету – деректерді визуализациялау және қондырғылардың жай-күйін талдау үшін.

Пайдаланушы интерфейсі операторларға сорғы қондырғыларының күйін нақты уақыт режимінде бақылауға және ықтимал ақаулар туралы ескерту хабарламаларын алуға мүмкіндік берді. Өлшеу нәтижелері туралы есептерді беру BALTECH VP-3470 діріл анализаторының USB порты арқылы жүзеге асырылды.

Сорғы агрегаттарының діріл күйін толық сипаттайтын шама ретінде діріл қарқындылығының мәнін қолдану әдеттегідей. Бұл шама 10 Гц-тен 1000 Гц-ке дейінгі жиілік диапазонындағы діріл жылдамдығының орташа квадраттық мәні ретінде анықталады. Ортадан тепкіш сорғыларда дірілді бақылау білік осіне қатысты екі өзара перпендикуляр көлденең бағытта мойынтірек тіректерінің корпустарында жүргізіледі.

Айналмалы машиналардың дірілін арналған нормалар стандарттармен немесе олар болмаған кезде басқа да регламенттеуші құжаттармен айқындалады. ISO 10816 стандартына сәйкес барлық машиналар діріл деңгейіне қарай 4 аймақтың біріне жатады – A, B, C, D (1-сурет):

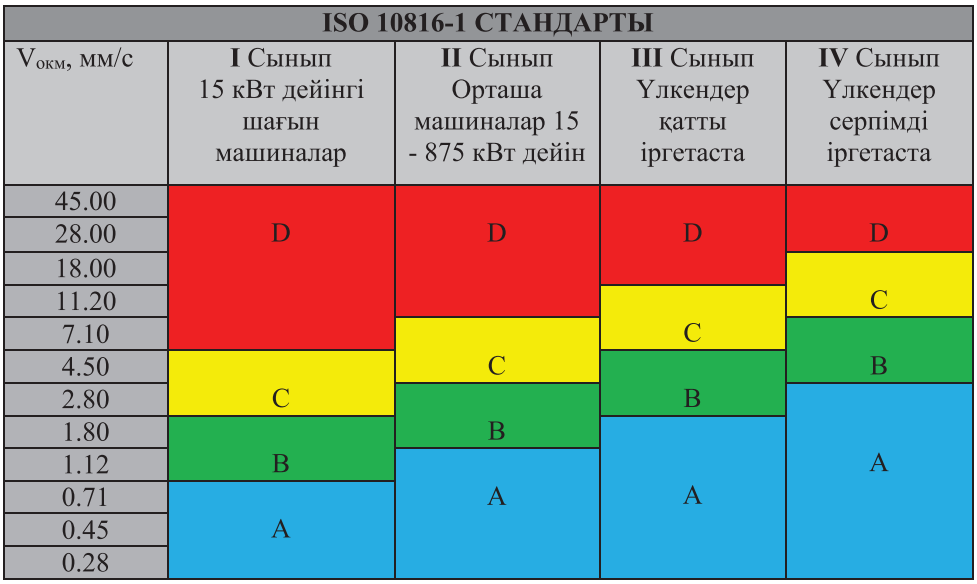
– A аймағы – жаңа пайдалануға берілген машиналар;

– B аймағы – пайдалану мерзімін шектемей қолдануға жарамды машиналар;

– C аймағы – ұзақ әрі үздіксіз пайдалануға жарамсыз машиналар;

Әдетте, мұндай машиналар жөндеу жұмыстары жүргізілгенге дейін шектеулі уақыт жұмыс істей алады;

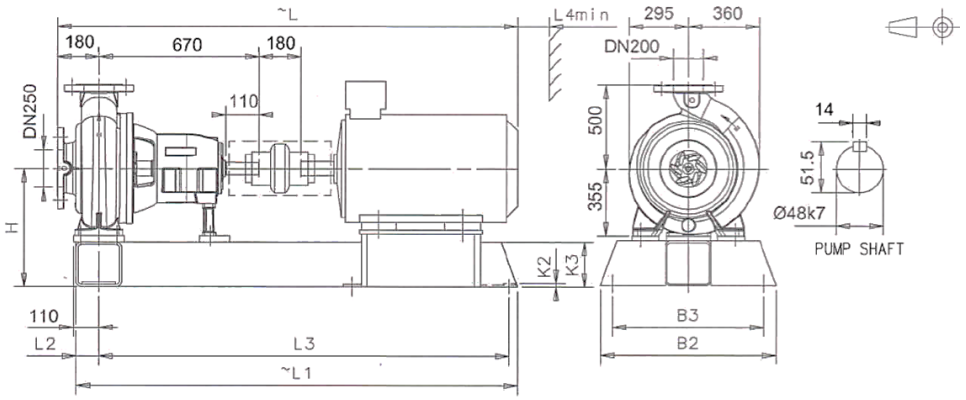
– D аймағы – бұл аймақтағы діріл деңгейлері машинаның зақымдануына әкелуі мүмкін елеулі көрсеткіштер ретінде қарастырылады.




1-сурет – ISO 10816 стандарты бойынша ортадан тепкіш сорғылардың діріл нормалары

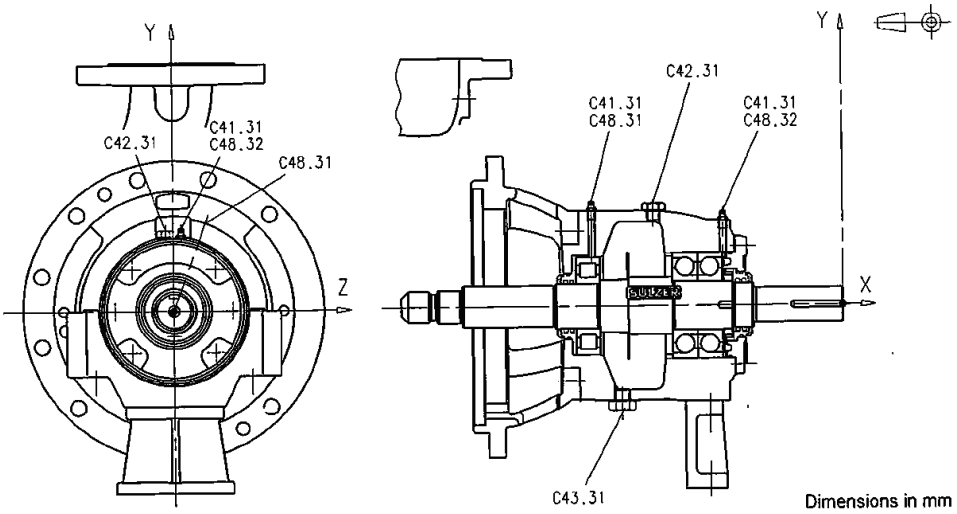
Діріл сигналы осы өзара әрекеттесудің ерекшеліктері туралы көптеген диагностикалық ақпарат береді және діріл сигналын өңдеу және талдау арқылы дамыған ақауларды ғана емес, сонымен қатар олардың пайда болу кезеңіндегі ақауларды анықтауға болады, бұл олардың уақыт өте келе дамуын болжауға мүмкіндік береді. Осылайша, жабдықтың діріл диагностикасы жоспарлы-алдын алу жөндеу жүйесінен нақты жағдай бойынша (немесе белсенді) жөндеуге көшуге мүмкіндік береді, бұл жабдыққа техникалық қызмет көрсету шығындарын 40–50 %-ға азайтады.

SULZER маркалы ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының техникалық жағдайын анықтау үшін дірілдік диагностика әдісін қолдану тәжірибесінде қарастырылады. Сорғы агрегаттары «ХОРАСАН-U» ЖШС, «Қазатомөнеркәсібі ҰАК» АҚ жағдайында уран өндірісінің өнімді ерітінділерін айдауға арналған. Сорғы агрегаттары үш станцияда (ТНС-1, ТНС-2, ТНС-3) орналасқан, әр станцияда 4 агрегат жұмыс жасап тұр. Агрегат әр түрлі модификациялы АРР типті бір секциялы центрифугалық сорғыдан, айналым саны 1500 айн/мин және қуаты 400 кВт болатын М3ВР типті жетекті электрқозғалтқышынан тұрады. 2 және 3-суреттерде сорғы агрегатының жалпы көрінісі және сорғының мойынтірек тораптарының орналасуы көрсетілген.




2-сурет – Сорғы агрегатының жалпы көрінісі

Сорғы жұмыс дөңгелегі жағында бір цилиндрлік роликті мойынтірекпен және муфта жағында екі қатарлы радиалды-тірек шарикті мойынтіректермен жабдықталған.




3-сурет – Мойынтірек торабы

Ортадан тепкіш сорғы агрегатын пайдалану процесінде оның тораптары мен бөлшектеріне статикалық, динамикалық (өзгермелі, соққылы) және циклдік жүктемелер әсер етеді. Тұрақты статикалық жүктемелер бөлшектердің пішінінің өзгеруіне, кинематикалық жұптардағы бос орындарға және бөлшектерде жарықтардың пайда болуына әкеледі. Циклдік жүктемелер металлдың циклдік шаршауына және тораптар мен бөлшектерде ақаулардың дамуына себеп болады. Динамикалық жүктемелер динамикалық кернеулердің пайда болуына және бөлшектердің шаршау зақымдануларын жинақтауға әкеледі.

Сорғы агрегаттарының техникалық күйін зерттеу үшін электрқозғалтқышының мойынтіректері мен сорғы дөңгелегінің жетек біліктері таңдалды. 4-суретте

SULZER сорғы агрегатының жалпы көрінісі және діріл параметрлерін өлшеу нүктелері көрсетілген.

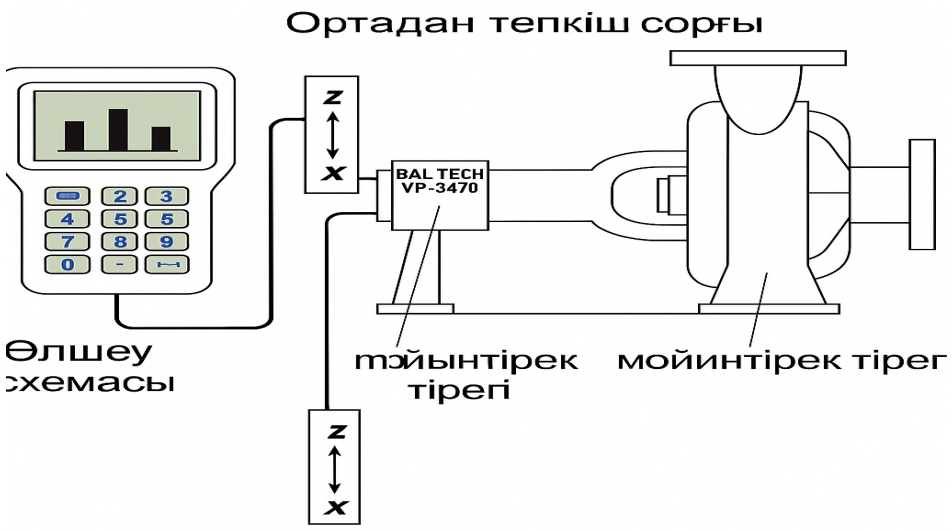
4-сурет – Ортадан тепкіш сорғы агрегатының жалпы көрінісі

5-сурет – BALTECH VP-3470 діріл анализаторы

Діріл параметрлерін зерттеу BALTECH діріл анализаторының көмегімен жүзеге асырылды. Діріл анализаторы жүйесіне есептеу блогы, магниттік бекіткіші

бар діріл датчигі, USB интерфейсі кабелі, магниттік штатив, діріл датчигі кабелі, сигнал кабелі және таходатчик кіреді (5-сурет). Діріл датчиктерінің магниттік қондырғысы өлшеудің сенімділігін қамтамасыз етеді және діріл параметрлерін өлшеу үшін ең аз уақытты қажет етеді. Анализатор сонымен қатар BALTECH Expert бағдарламалық жасақтамасы бар, ол машиналар мен механизмдердің техникалық күйін анықтауға, сондай-ақ роторлардың динамикалық теңгеруді орындауға арналған.

Діріл датчиктері магниттік штатив көмегімен сорғы агрегатының мойынтірек тораптарының сыртқы беттеріне орнатылды (6-сурет). Орнату кезінде білік осіне перпендикуляр екі көлденең бағытта (осьтік және тангенциалды) және бір тігінен бағытталған үш өлшеу бағыты қолданылды. Өлшеу ISO 10816 стандартының талаптарына сәйкес жүргізілді.




6-сурет – Сорғы мойынтіректер корпусына діріл датчиктерін орнату сұлбасы

Зерттеу барысында әрбір сорғы агрегатына қатысты діріл параметрлері кемінде үш рет өлшенді. Өлшеулер әртүрлі уақыт аралықтарында, бірдей жұмыс режимінде жүргізілді. Бұл тәсіл трендтерді қалыптастыруға, деректердің тұрақтылығын бағалауға және өлшеу нәтижелерінің сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында BALTECH VP-3470 діріл анализаторының стандартты конфигурациясындағы жиілік сүзгілері (frequency filters) қолданылды. Атап айтқанда:

– жиілік диапазоны - 10 Гц – 1000 Гц;

– сүзгі түрі - IEC стандарттарына сай жоғары жиілікті сүзгі (HPF) және төмен жиілікті сүзгі (LPF);

– сүзгілер артық шуды басып, ақпараттық пайдалы сигналды (діріл энергиясын) бөліп көрсетуге мүмкіндік берді.

Бұл сүзгілер ISO 10816 стандартына сәйкес діріл жылдамдығының (v, мм/с) нақты өлшемін алуға бағытталған. Сонымен қатар автоспектр мен конверт спектрді талдау кезінде жоғары жиілікті құрамдастарды бөліп көрсету үшін конверттік сүзгі қолданылды, бұл сүзгілер зақымдану белгілерін ерте кезеңде сенімді анықтауға жағдай жасады.

Барлық өлшенген діріл параметрлерін маршрут бойынша қажетті механизмді жабдық ағашынан таңдау арқылы көруге болады. Бағдарламада деректерді график түрінде қарау мүмкіндігі қарастырылған, сонымен қатар спектрлер мен спектрлер архивін қарау үшін қосымша тармақтар бар. Барлық графиктер толықтай бапталатын (түстер, қаріптер, сызық түрлері және т.б.) және интерактивті болып табылады, яғни масштабты оңай өзгертуге, қызықтыратын учаскелерді үлкейтуге, принтерге басып шығаруға немесе көшірме буферіне сақтап, кейін есептерге қоюға болады.

Трендтерді талдау механизмнің қалдық ресурсын шамалап бағалауға мүмкіндік береді. Бағалау жеке механизм нүктелеріндегі өлшеу нәтижелерін аппроксимациялау және трендтің регрессия сызығын құру арқылы жасалады. Трендтерді талдау режимін ашу үшін қажетті механизмді жабдық ағашында таңдап, жабдық ағашының контексттік мәзірінде «Трендтерді талдау» тармағын таңдау қажет. Графикте өлшеу нәтижелері көрсетіледі, сары және қызыл сызықтар тиісті ескерту және апаттық шекті мәндерге сәйкес келеді. Тренд құру үшін кемінде үш өлшеу қажет. Өлшенген діріл жылдамдығының деңгейлері ISO 108163 стандартына сәйкес нормативтік мәндермен салыстырылады [7].

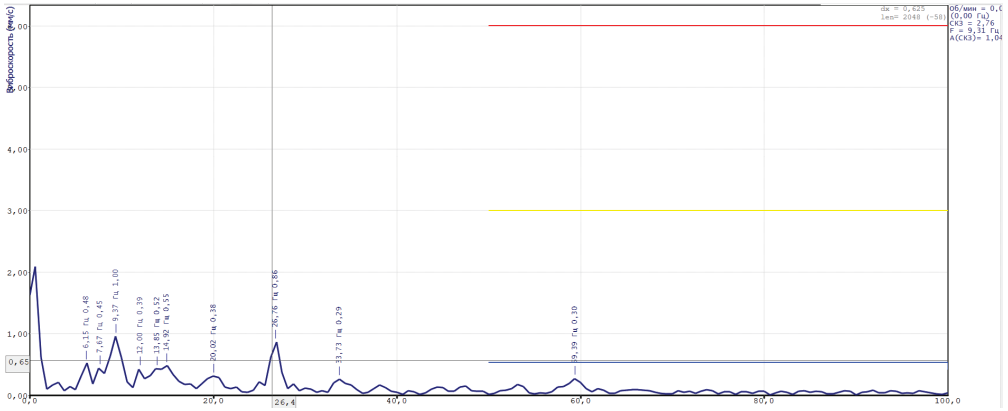
Діріл сигналын өңдеудің әртүрлі әдістері бар: корреляция, автокорреляция, спектрлік талдау, кепстральды сипаттамалар, шектен шығуды есептеу, конверт. Бұл жұмыста сигналдың жиілік құрамын анықтауға мүмкіндік беретін тікелей спектр (автоспектр) және діріл сигналының конверттік спектрі әдістері қолданылды. Спектрлік талдау зақымдануды бір мәнді анықтау және болып жатқан процестер мен діріл спектрлері арасындағы түсінікті кинематикалық тәуелділіктердің арқасында ақпаратты ұсынудың ең кең тараған әдісіне айналды [8; 9].

Спектрограмма түріндегі діріл сигналының графикалық көрінісі спектрдің құрамы туралы көрнекі түсінік береді. Дірілді құрайтын амплитудалардың сипатын анықтау жабдықтың ақауларын анықтауға мүмкіндік береді. Дірілді жеделдету спектрограммаларын талдау зақымдануды ерте анықтауға мүмкіндік береді. Діріл жылдамдығының спектрограммалары дамыған зақымдануды бақылау үшін қолданылады. Зақымдануды анықтау ықтимал зақымданудың алдын ала анықталған жиілігімен жүзеге асырылады.

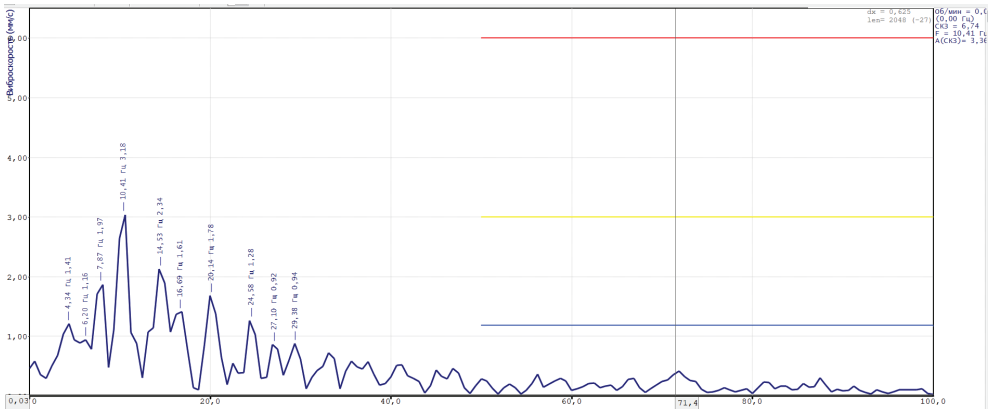
**Нәтижелер және талқылаулар**

Ортадан тепкіш сорғы агрегаттарының техникалық күйіне жүргізілген зерттеулер бойынша сорғы мен электрқозғалтқышының мойынтіректер тораптарының діріл жылдамдығы параметрлерінің нәтижелері алынды. Зерттеу барысында үш станциядағы барлық SULZER маркалы APP типті ортадан тепкіш сорғы агрегаттары зерттелді. BALTECH Expert бағдарламалық жасақтамасының көмегімен діріл параметрлері өңделіп, спектрлер түрінде кескіндер алынды. Өлшеу

барысында алынған нәтижелерді бір-бірімен діріл жылдамдықтары бойынша салыстыра отырып, мәндері жоғарырақ сорғылар таңдалып алынды. Мысалы, 7 және 8-суреттерде діріл сигналы жоғарырақ сорғы қондырғыларының діріл жылдамдығының автоспектрлері көрсетілген.



7-сурет –№ 3 ТНС-1 сорғы электр қозғалтқышының мойынтіректерінің діріл жылдамдығының автоспектрі



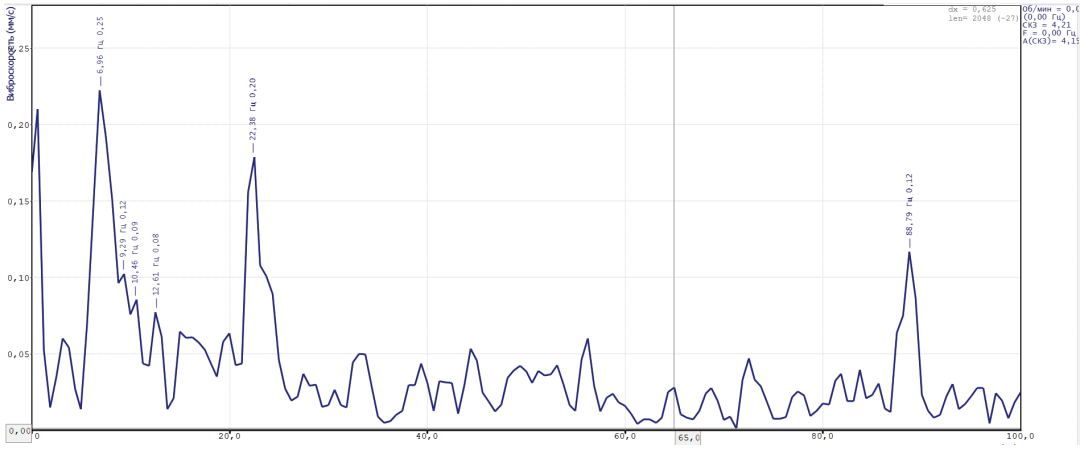
8-сурет – № 1 ТНС-1 сорғының жұмыс дөңгелегі жағынан мойынтіректің діріл жылдамдығының автоспектрі

№1 ТНС-1 сорғысында автоспектрлік талдау кезінде тіркелген негізгі гармоника (1×) амплитудасы 2,4 мм/с деңгейінде, бұл көрсеткіш ISO 10816 стандарты бойынша B/C аймағының шекарасында орналасады, яғни ұзақ мерзімді сенімді жұмысқа сәйкес келмейді және түзетуді қажет етеді. Есептеулерге сәйкес, бұл діріл деңгейі ротор массасының 6–8 г теңгерілмегенін білдіреді (жұмыс дөңгелегінің массасына қатысты 0,05–0,07 %).

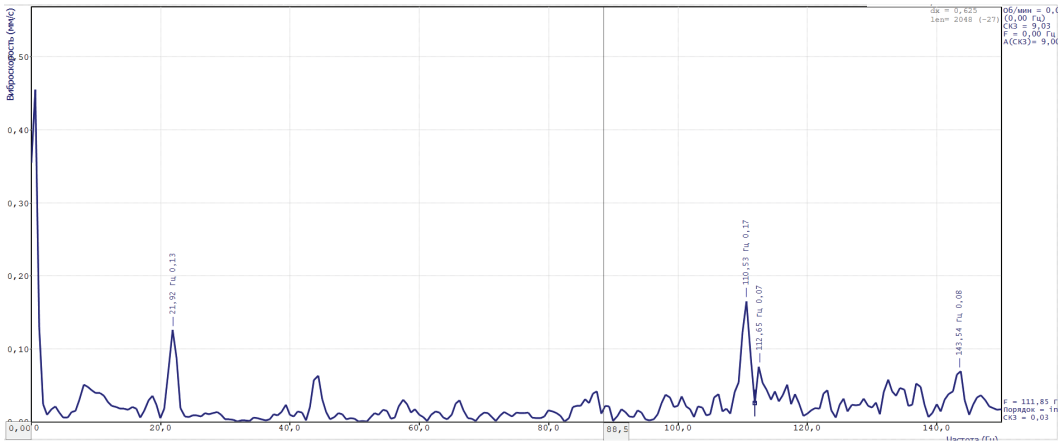
Мойынтірек жинағының діріл жылдамдығының автоспектрлерінде байқалатын амплитудалық аномалиялар сорғы қондырғысының техникалық күйі туралы маңызды диагностикалық ақпарат береді, өйткені олар жабдықтағы ақаулардың салдарынан пайда болады. Сонымен қатар, ақаудың әр түрі өзінің гармоникасына сәйкес келеді, олар кинематикаға және сорғының жұмыс дөңгелегінің айналу

жылдамдығына байланысты біржақты есептеледі. Тиісті ақаудың пайда болуы спектрде белгілі бір гармоникалардың болуымен анықталады, ал ақаудың даму дәрежесі гармоника амплитудасымен анықталады [10; 11; 12].

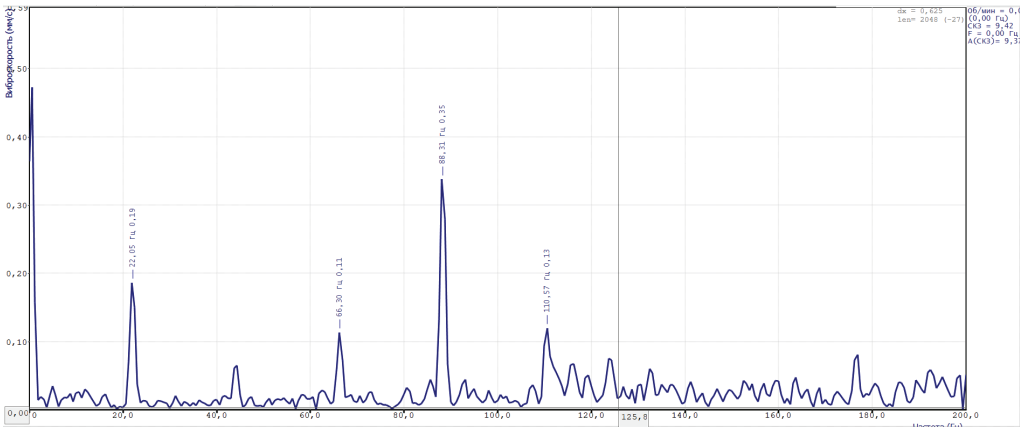
Графиктерден көріп отырғаныңыздай, бұл мойынтіректердегі діріл деңгейлері сары сызықтан аспайды, яғни нормадан аспайды, бұл ақауды жою үшін ешқандай әрекет қажет емес, бірақ түйіннің күйіне нақты бақылау жүргізу қажет. Басқа сорғы қондырғыларында діріл сигналдарының деңгейі одан да төмен, амплитудалық жарылыстар байқалмайды, яғни бұл қондырғылардағы мойынтіректердің діріл жылдамдығының гармоникалық компоненттері 1,2 мм/с мәнінен аспайды. SULZER центрифугалық сорғы қондырғыларының діріл жылдамдығының автоспектрлері мен конверттік жиынтық спектрлерінің мысалдары 9 және 10 суреттерде көрсетілген.




*а)*



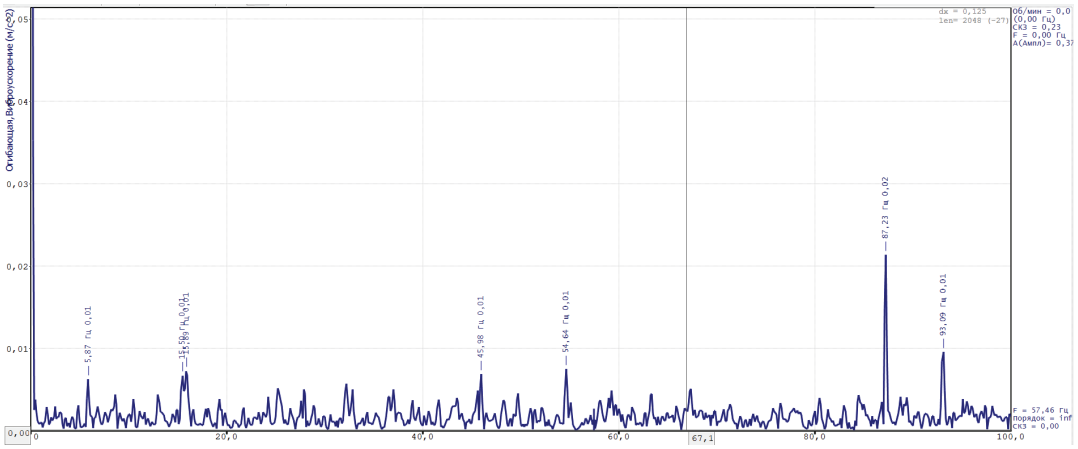

*б)*



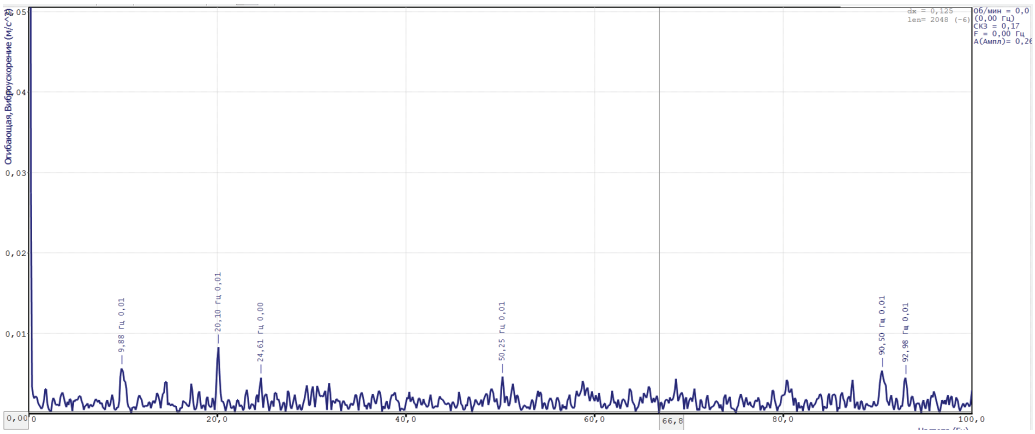

*в)*

а-Электр қозғалтқышының артқы мойынтірегі; б-муфта жағындағы сорғы мойынтірегі; в-доңғалақ жағындағы сорғы мойынтірегі

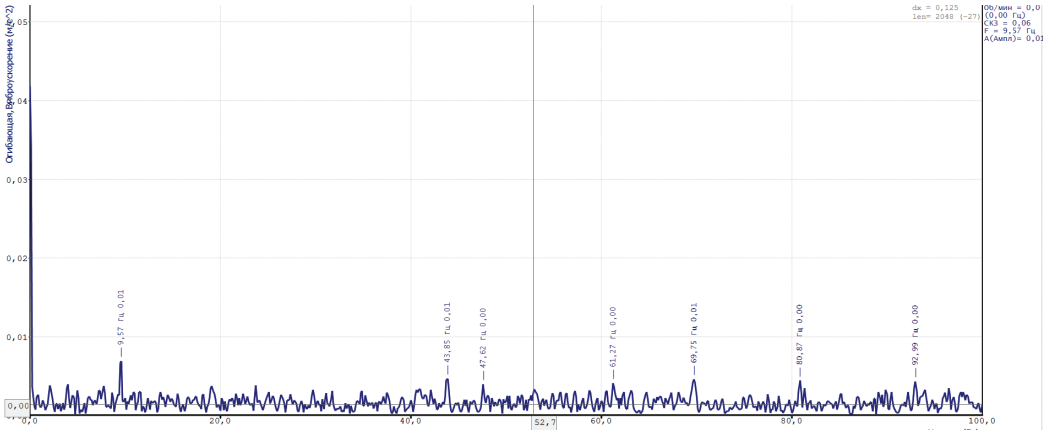
9-сурет – Сорғы қондырғысының мойынтіректерінің автоспектрлері




*а)*




*б)*




в)

а-Электр қозғалтқышының артқы мойынтірегі; б-муфта жағындағы сорғы мойынтірегі; в-доңғалақ жағындағы сорғы мойынтірегі
10-сурет – Сорғы қондырғысының мойынтіректерінің спектрлері

Барлық сорғылар бойынша алынған өлшеу нәтижелері 1-суретте көрсетілген ISO 10816 стандарты бойынша діріл деңгейлерінің кестесінде берілген мәндермен салыстырылып тиісті ISO аймағына жатқызылды. Мысалы: № 3 ТНС-1 сорғысында тіркелген діріл жылдамдығы 2,3 мм/с болып, В аймағына сәйкес келеді – бұл қалыпты жұмыс жағдайы деп саналады. Сонымен қатар, диаграммаларда ISO шекаралары (мысалы, сары – ескерту шегі, қызыл – апаттық шек) түсімен немесе сызықтармен визуалды түрде белгіленді.

Қалдық ресурсты бағалау үшін діріл параметрлерінің трендтері қолданылды. Бұл бағалау BALTECH Expert бағдарламалық жасақтамасының көмегімен келесі әдістеме бойынша жүзеге асырылды:

– әрбір өлшеу нүктесінде 3 және одан да көп рет өлшеу жүргізіліп, діріл жылдамдығының мәндері уақыт бойынша тренд түрінде бейнеленді;

– регрессиялық аппроксимация әдісі арқылы діріл деңгейінің өзгеру бағыты мен үдеу тенденциясы анықталды;

– тренд графиктерінде қалыпты жұмыс аймағы (жасыл), ескерту шегі (сары) және апаттық шек (қызыл) түстермен белгіленді;

– қалдық ресурс (Тқ) келесі формуламен бағаланады:

$$T_к = \frac{V_{шек} - V_{ағым}}{k} \quad (1)$$

мұндағы:

– $V_{шек}$ – ISO 10816 стандарты бойынша апаттық шекті діріл деңгейі;

– $V_{ағым}$ – ағымдағы өлшеудегі діріл деңгейі;

– k – уақыт бірлігіндегі дірілдің арту жылдамдығы (мм/с тәулік немесе ай бойынша).

Бұл әдіс жабдықтың нақты техникалық күйіне негізделген болжамды қалдық ресурсты есептеуге мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижесінде алынған автоспектр (тікелей спектр) және конверт спектр арқылы ақауларды анықтау процесі келесі кезеңдерден тұрады:

1) автоспектр арқылы ақауларды анықтау:

– автоспектрлік графиктер діріл сигналының жалпы жиілік құрамын көрсетеді;

– гармоникалық сызықтар (мысалы, 1×, 2×, 3× айналу жиілігі) теңгерімсіздік, десинхронизация, механикалық бостық сияқты типтік ақаулармен сәйкестендіріледі. Мысалы, 1× гармоника деңгейінің артуы - жұмыс дөңгелегінің теңгерімсіздігін көрсетеді (№3 ТНС-1 сорғысында байқалды).

2) конверт спектр арқылы ақауларды анықтау:

– конверт спектрі жоғары жиілікті тербелістердегі мойынтірек ақауларын анықтауға мүмкіндік береді;

– мұнда BPFI, BPFO, BSF, FTF сияқты сипаттамалық жиіліктермен салыстыру жүргізілді (мысалы, сыртқы немесе ішкі сақина зақымдануы);

– тиісті гармоникалық компоненттердің пайда болуы және олардың амплитудасы мен модуляция тереңдігі арқылы ақау түрі мен даму сатысы анықталды.

3) гармоникалардың нақты сәйкестендірілуі:

– гармоникалар сорғы дөңгелегінің айналу жиілігі (1480 айн/мин ≈ 24,7 Гц) бойынша есептелген теориялық жиіліктермен салыстырылды;

– конверт спектріндегі шыңдар нақты мойынтірек типі мен өндіруші каталогындағы сипаттамалық жиіліктермен салыстырылды;

– нәтижесінде, белгілі бір жиіліктегі гармониканың артуы қай компоненттің және қандай ақаудың белгісі екенін көрсетті (мысалы, сыртқы сақинаның зақымдалуы BPFO жиілігі бойынша).

Жүргізілген зерттеулердің нәтижелерін жалпылау ортадан тепкіш сорғы қондырғыларын бағалау мен болжаудың бірыңғай диагностикалық критерийін құруды қамтамасыз ететін діріл параметрлері бойынша техникалық күйін бағалаудың келесі негізгі диагностикалық белгілерін қалыптастыруға мүмкіндік берді [13; 14; 15]:

– діріл жылдамдығы параметрі (2÷3000 Гц) бойынша сигналдың жалпы деңгейі және мойынтіректердің құрамдас жиіліктерінің деңгейі;

– жүйенің қаттылығының бұзылу белгілерін, ортадан тепкіш сорғы агрегаты элементтерінің теңгерімсіздігін қамтитын төмен жиілікті диапазондағы (2÷15 Гц) діріл жылдамдығы параметрі бойынша сигналдың жалпы деңгейі;

– мойынтірек жиіліктері, сондай-ақ сәйкес гармоника амплитудасы саласындағы діріл сигналының конверттік спектрінің модуляция тереңдігі;

– ортадан тепкіш сорғылардың ағынды бөлігіндегі сұйықтық ағынының біркелкіностьстігі, қалақша жиіліктерінде, олардың субгармоникаларында, сондай-ақ өлшеу жүргізудің көлденең жазықтығында айқын көрінетін және жұмыс дөңгелегі мен қалақтардың пайдалану тозуының салдары болып табылатын бүйірлік және модуляциялық жиіліктерде көрінеді;

– сорғы тығыздағыштарының тез тозуына әкелетін сұйықтық ағынының пульсациясына байланысты 1–4 Гц диапазонындағы инфрақызыл тербелістер.

Зерттеу нәтижелері бойынша діріл сигналдарының гармоникалық компоненттерінің пайда болуының негізгі себептерінің бірі біркелкі емес тозу нәтижесінде пайда болатын жұмыс дөңгелегінің теңгерімсіздігі екендігі анықталды.

**Қаржыландыру туралы ақпарат**

Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің AP22684928 – «Іске асыратын аппаратураның әдістемесін әзірлеу арқылы сорғы агрегаттарының техникалық жай-күйін диагностикалау тиімділігін арттыру» гранттық қаржыландыру жобасына сәйкес орындалды.

**Қорытынды**

Ортадан тепкіш сорғы қондырғысының жұмысы кезінде пайда болатын діріл параметрлерін зерттеу нәтижелері оның нақты техникалық жағдайын бағалау және болжау үшін кешенді диагностикалық тәсілді қолданудың орындылығы туралы қорытынды жасауға мүмкіндік берді. Атап айтқанда, осы жұмыс шеңберінде іске асырылған механикалық діріл параметрлерін диагностикалауға кешенді тәсілдің нәтижелері сорғы жабдықтарының тораптары мен элементтеріндегі ақаулардың даму динамикасын анықтауға және діріл сигналдарының спектрлік талдауының нәтижелерін растауға мүмкіндік берді.

Сорғы жабдықтарының диагностикалық параметрлерін талдау нәтижелері діріл параметрлері бойынша техникалық күйді бағалауда кешенді тәсіл қажет екенін көрсетті. Мұндай тәсіл кеңейтілген жиілік диапазонында діріл жылдамдығы мен діріл үдеуі параметрлерінің спектрлік талдауына, сондай-ақ діріл сигналдарының конвертін талдауға негізделуі тиіс.

Осы жұмысты орындау шеңберінде алынған сорғы жабдығын диагностикалау нәтижелерін талдау зерттелетін жабдықта ағымдағы жағдайды тиімді бағалауды және деградациялық процестердің дамуын болжауды жүзеге асыруға жарамды бірыңғай диагностикалық критерийді жасау үшін дірілді талдауға кешенді тәсілдің нәтижелеріне шұғыл қажеттіліктің бар екендігін айғақтайды.

Сорғы қондырғыларының жұмысының цифрлық мониторингін әзірлеу жабдықтың тиімділігі мен сенімділігін арттырудағы маңызды қадам болып табылады. Заманауи технологияларды мониторинг және басқару процестеріне интеграциялау пайдалану шығындарын едәуір төмендетуге және жалпы өнімділікті жақсартуға мүмкіндік береді. Болашақта мұндай жүйелер көптеген салалар үшін стандартқа айналуы мүмкін, бұл өз кезегінде өндірістік процестерді оңтайландыруға және ресурстарды тиімді басқаруға жаңа мүмкіндіктер ашады.

Дірілді диагностиканы пайдалана отырып, сорғы қондырғыларының мониторингі жүйесін әзірлеу жабдықтың сенімділігі мен тиімділігін арттырудың тиімді тәсілін білдіреді. Алынған нәтижелер өнеркәсіптегі процестерді оңтайландыру үшін заманауи талдау әдістерін қолданудың орындылығын растайды.

Сорғы қондырғыларында цифрлық шешімдерді қолдану жабдықтың рұқсат етілмеген техникалық күйінен туындаған өндірістегі жазатайым оқиғалардың

санын азайтуға, сондай-ақ сорғы жабдықтарының апаттық тоқтап қалу санын азайтуға, қосалқы бөлшектермен жабдықтауды тиімдірек етуге және кәсіпорындарда қолданыстағы жөндеу жүйесін оңтайландыруға, қалдық ресурсты трендтер арқылы бағалау тәсілі жабдықтың қалпына келтіру ресурсын сандық бағалауға жол ашады, бұл сервистік шығындарды 30–50 %-ға дейін төмендетуге мүмкіндік береді.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Костюков, В. Н., Бойченко, С. Н., Костюков, А. В.** Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств // (АСУ БЭР - КОМПАКСÒ). – М. : Машиностроение. – 1999. – С. 163.

2 **Костюков, А. В.** Контроль и мониторинг технического состояния центробежного насосного агрегата по трендам вибропараметров // Дисс. канд. техн. наук. ОмГТУ. – Омск, 2006. – 203 с.

3 **Костюков, А. В., Бойченко, С. Н., Костюков, В. Н.** Диагностика насосно-компрессорных агрегатов путем мониторинга трендов вибропараметров // Диагностика оборудования и трубопроводов: Труды XVII междунар. тематического семинара. – Одесса: РАО «Газпром», 1997. – С. 187–194.

4 **Костюков, В. Н.** Мониторинг безопасности производства. – М. : Машиностроение, 2002. – С. 224.

5 **Клюев, В. В., Пархоменко, П. П., Абрамчук, В. Е.** Технические средства диагностирования // Справочник – М. : Машиностроение, 1989. – С. 672.

6 **Бойченко, С. Н.** Контроль и мониторинг технического состояния центробежного насосного агрегата по спектральным параметрам вибрации // Дисс. канд. техн. наук. ОмГТУ. – Омск 2006. – С. 164.

7 **Генкин, М. Д., Кобринский, А. А.** О спектре колебаний параметрической системы, возбуждаемой внешними силами// Вибротехника: Сб. статей (Каунас). – 1974. – № 1 (22). – С. 145–148.

8 **Клюев, В. В.** Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара // Справочник; В 2 кн. – М. : Машиностроение, 1978. – Кн.1 – 448 с.; Кн. 2 – С. 387.

9 **Костюков, В. Н., Науменко, А. П.** Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин // 2-е изд., с уточн. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. – С. 378.

10 **Науменко, А. П.** Развитие элементов теории, технологии и оборудования мониторинга технического состояния поршневых машин методами виброакустической диагностики // Дисс. докт. техн. наук. – ОмГТУ, Омск 2011. – С. 421.

11 **Балицкий, Ф. Я., Барков, А. В., Баркова, Н. А.** Неразрушающий контроль // Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 2: Вибродиагностика – М. : Машиностроение, 2005. – С. 829.: ил.

12 **Колобов, А. Б.** Вибродиагностика: теория и практика учебное пособие // 2019. – С. 252.

13 **Бранцевич, П. Ю.** Цифровая обработка вибрационных сигналов. – Минск: Бестпринт, 2022. – С. 297.

14 **Пархоменко, П. П., Карибский, В. В., Согомонян, Е. С., Халчев, В. Ф.** Основы технической диагностики / В 2 кн. – М. : Энергия, 1981. – С. 464.

15 Sulzer Pumps Finland Oy Karhula Pump Factory // Equipment Specification, 2017. – P. 107–110.

REFERENCES

1 **Kostyukov, V. N., Bojchenko, S. N., Kostyukov, A. V.** Avtomatizirovanny`e sistemy` upravleniya bezopasnoj resursosberegayushhej e`kspluataciej oborudovaniya neftepererabaty`vayushhix i neftexymicheskix proizvodstv // (ASU BE`R - KOMPAKSÒ) – M. : Mashinostroenie, 1999. – P. 163.

2 **Kostyukov, A. V.** Kontrol` i monitoring texnicheskogo sostoyaniya centrobezhnogo nasosnogo agregata po trendam vibroparametrov // Diss. kand. texn. nauk. OmGTU. Omsk, 2006. – P. 203.

3 **Kostyukov, A. V., Bojchenko, S. N., Kostyukov, V. N.** Diagnostika nasosno-kompressorny`x agregatov putem monitoringa trendov vibroparametrov // Diagnostika oborudovaniya i truboprovodov: Trudy` XVII mezhdunar. tematicheskogo seminara. – Odessa: RAO «Gazprom», 1997. – P. 187–194.

4 **Kostyukov, V. N.** Monitoring bezopasnosti proizvodstva. – M. : Mashinostroenie, 2002. – P. 224.

5 **Klyuev, V. V., Parxomenko, P. P., Abramchuk, V. E.** Texnicheskie sredstva diagnostirovaniya // Spravochnik. – M. : Mashinostroenie, 1989. – P. 672.

6 **Bojchenko, S. N.** Kontrol` i monitoring texnicheskogo sostoyaniya centrobezhnogo nasosnogo agregata po spektral`ny`m parametram vibracii // Diss. kand. texn. nauk. OmGTU. – Omsk, 2006. – P. 164.

7 **Genkin, M. D., Kobrinskij, A. A.** O spektre kolebanij parametricheskoj sistemy`, vozbuzhdaemoj vneshnimi silami // Vibrotexnika: Sb. statej (Kaunas). – 1974. – № 1 (22). – P. 145–148.

8 **Klyuev, V. V.** Pribory` i sistemy` dlya izmereniya vibracii, shuma i udara // Spravochnik; V 2 kn. – M.: Mashinostroenie, 1978. – Kn. 1 – 448 p.; Kn. 2 – P. 387.

9 **Kostyukov, V. N., Naumenko, A. P.** Osnovy` vibroakusticheskoj diagnostiki i monitoringa mashin. – 2-e izd., s utochn. – Novosibirsk: Izdatel`stvo SO RAN, 2014. – P. 378.

10 **Naumenko, A. P.** Razvitie e`lementov teorii, texnologii i oborudovaniya monitoringa texnicheskogo sostoyaniya porshnevy`x mashin metodami vibroakusticheskoj diagnostiki // Diss. dokt. texn. nauk. OmGTU. – Omsk 2011. – P. 421.

11 **Baliczkij, F. Ya., Barkov, A. V., Barkova, N. A.** Nerazrushayushhij kontrol` // Spravochnik: V 7 t. Pod obshh. red. V.V. Klyueva. T. 7: V 2 kn. Kn. 2: Vibrodiagnostika – M. : Mashinostroenie, 2005. – P. 829. : il.

12 **Kolobov, A. B.** Vibrodiagnostika: teoriya i praktika uchebnoe posobie. – 2019. – P. 252.

13 **Brancevich, P. Yu.** Cifrovaya obrabotka vibracionny`x signalov. – Minsk: Bestprint, 2022. – P. 297.

14 **Parxomenko, P. P., Karibskij, V. V., Sogomonyan E. S., Xalchev V. F.** Osnovy` texnicheskoj diagnostiki // V 2 kn. – M. : E`nergiya, 1981. – P. 464.

15 Sulzer Pumps Finland Oy Karhula Pump Factory // Equipment Specification, 2017. – P. 107–110.

29.05.25 ж. баспаға түсті.
27.06.25 ж. түзетулерімен түсті.
25.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Л. Б. Сагатова[1], С. А. Бортебаев[2], А. Д. Кольга[3],***
***К. К. Елемесов[4], Д. Д. Басканбаева[5]***
[1,2,4,5]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Уральский государственный аграрный университет,
Российская Федерация, г. Екатеринбург;
Поступило в редакцию 29.05.25.
Поступило с исправлениями 27.06.25.
Принято в печать 25.08.25.

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ

*В статье рассмотрены результаты оценки технического состояния оборудования на основе анализа вибрационных параметров центробежных насосных агрегатов. В рамках данного исследования использовался отбор диагностической информации по параметрам вибрации центробежных насосных агрегатов. Описана методика проведения вибрационной диагностики центробежных насосов в производственных условиях. Для исследования технического состояния насосных агрегатов выбраны подшипники электродвигателя и приводные валы колеса насоса. Также изложена последовательность использования анализатора для проведения диагностики, размещения датчиков вибрации. Выполняет функции анализа вибрационных параметров вращающихся машин и механических конструкций с целью диагностики их технического состояния с помощью вибрационного анализатора. Спектры вибрационных скоростей подшипниковых узлов действующих центробежных насосов регистрируются с помощью анализатора для обработки вибрационных сигналов применены методы прямого спектра (автоспектр) и конверт-спектра вибрационного сигнала, позволяющие определить частотный состав сигнала. Гармонические компоненты вибрационного сигнала на графиках автоспектра указывают на наличие дефектов и требуют систематического контроля насосного оборудования. Проведенные исследования позволили сформировать основные*

*диагностические признаки оценки по параметрам вибрации, обеспечивающие создание единого диагностического критерия оценки и прогнозирования технического состояния центробежных насосных агрегатов.*

*Ключевые слова: центробежный насос, вибродиагностика, виброанализатор, контроль насосных установок, визуализация данных, автоспектр, спектральный анализ.*

***L. B. Sagatova[1], S. A. Bortebayev[2], A. D. Kolga[3],***
***K. K. Yelemessov[4], D. D. Baskanbayeva[5]***
[1,2,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
[3]Ural State Agrarian University, Russia, Yekaterinburg.
Received 29.05.25.
Received in revised form 27.06.25.
Accepted for publication 25.08.25.

## ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF CENTRIFUGAL PUMP UNITS BY VIBRATION PARAMETERS

*The article considers the results of assessing the technical condition of equipment based on the analysis of vibration parameters of centrifugal pump units. As part of this study, a selection of diagnostic information on the vibration parameters of centrifugal pump units was used. The methodology for conducting vibration diagnostics of centrifugal pumps in production conditions is described. To study the technical condition of the pumping units, the bearings of the electric motor and the drive shafts of the pump wheel are selected. It also describes the use of an analyzer for diagnostics, the order of placement of vibration sensors. With the help of a vibration analyzer, it performs the functions of analyzing the vibration parameters of rotating machines and mechanical structures in order to diagnose their technical condition. The spectra of the vibration rate of the bearing units of the operating centrifugal pumps were recorded using an analyzer for processing vibration signals, using the methods of direct spectrum (autospectrum) and envelope spectrum of the vibration signal, which allows you to determine the frequency composition of the signal. The harmonic components of the vibration signal on the graphs of the Autopilot indicate the presence of defects and require systematic monitoring of pumping equipment. The conducted research made it possible to form the main diagnostic features of the assessment by vibration parameters, which ensures the creation of a single diagnostic criterion for assessing and predicting the technical condition of centrifugal pump units.*

*Keywords: centrifugal pump, vibration diagnostics, vibration analyzer, monitoring of pumping units, data visualization, autospectrum, spectral analysis.*

ҒТАМР 55.01.11

https://doi.org/10.48081/HXSG6721

***Г. Б. Таттимбетова[1], Г. С. Жетесова[2], А. К. Матешов[3]***

[1,2,3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4476-5933

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6504-3405

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6301-546X

*e-mail: tattimbetova@mail.ru

## *3D БАСЫП ШЫҒАРУ КЕЗІНДЕ ТОЛТЫРУ ТЫҒЫЗДЫҒЫНЫҢ УАҚЫТ ПЕН МАТЕРИАЛДЫҚ ШЫҒЫНДАРҒА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ*

*Мақалада Fused Deposition Modelling (FDM) технологиясын қолдана отырып, полилактикалық қышқылдан (PLA) күрделі геометрия үлгілерін жасау кезінде қабаттың биіктігі мен толтыру тығыздығы сияқты 3D басып шығарудың негізгі параметрлерінің уақыт пен материалдық шығындарға әсері зерттеледі. Әр түрлі пішіндегі нысандар, соның ішінде параллелепипед, цилиндр және қалақ тәрізді құрылым зерттелді, олар әр түрлі қабат биіктігімен (0,10, 0,15, 0,20 мм) және толтыру тығыздығымен басылды (15 %, 20 %, 30 %) температураның, басып шығару жылдамдығының және саптаманың диаметрінің өзгермейтін параметрлерінде. Эксперименттер барысында басып шығару уақыты, материалды тұтыну және басып шығарылған өнімнің көлемі сияқты көрсеткіштер өлшенді, бұл басылған үлгілердің экономикалық тиімділігі мен сапасын жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері қабаттың биіктігін арттыру басып шығару уақытын айтарлықтай қысқартатынын және толтыру тығыздығын арттыру басып шығарылған өнімдердің механикалық өнімділігін жақсарта отырып, материалды тұтынуды арттыруға көмектесетінін көрсетеді. Зерттеу өнімділік, сапа, үнемділік және беріктік өнімділігі арасындағы ең жақсы тепе-теңдікке қол жеткізу үшін 3D басып шығару параметрлерін оңтайландыру бойынша ұсыныстарды ұсынады, бұл әсіресе инженерлік және өнеркәсіптік салаларда аддитивті технологияларды қолдану үшін маңызды.*

*Кілтті сөздер: қабат биіктігі, толтыру тығыздығы, басып шығару жылдамдығы, 3D басып шығару, беріктік.*

**Кіріспе**

Соңғы онжылдықтарда аддитивті өндіріс механикалық компоненттерді құрудың бірегей шешімдерін ұсына отырып және айтарлықтай артықшылықтар бере отырып, өндіріс саласында жаңа балама ретінде қалыптасты. Зерттеулер металдар, керамика, полимерлер және композиттер сияқты әртүрлі материалдарда басып шығару әдістерін үздіксіз жетілдіруде [1]. Аддитивті өндірістің негізгі артықшылықтарының бірі – оның күрделі пішінді бөлшектерді оңтайландырылған тығыздықта шығару қабілеті, бұл компоненттердің беріктігі мен тұтастығына

нұқсан келтірместен материалдарды тиімді жұмсауға мүмкіндік береді [2]. Атап айтқанда, полимерлі бөлшектер жеңілдік пен қажетті беріктікті біріктіреді, бұл оларды күрделі салаларда қолдануға мүмкіндік береді [3].

Полимерлі компоненттерді сенімді өндіру үшін әдетте балқытылған жіпті балқыту (FFF), селективті лазерлік агломерация (SLS) және стереолитография (SLA) сияқты әдістер қолданылады [4]. Басып шығару процесінде бөлшектердің ішкі құрылымы механикалық өнімділікті сақтауда, салмақты азайтуда және басып шығару уақытын оңтайландыруда маңызды рөл атқарады [5]. Толық толтыру көп материалды қажет етсе де және өзіндік құнын арттырса да, жоғары механикалық беріктікті қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, әртүрлі толтыру құрылымдарын пайдалану құрылымның жеңілдігін сақтай отырып, қажетті механикалық қасиеттерді қайталауға көмектеседі [6].

**Материалдар мен әдістері**

K. Mayandi және т.б. [7] жүргізген зерттеу толтыру тығыздығын таңдау 3D басып шығарылған композиттердің механикалық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететінін және инженерлік және өнеркәсіптік қолданбалар үшін пайдалы болуы мүмкін өнімнің беріктігі мен беріктігін жақсартудың оңтайлы параметрлерін анықтауға көмектесетінін растайды.

Sally Cahyati, Reky Amanda Putra зерттеуі [8] PLA-дан 3D басып шығарылған бұйымдардың созылу беріктігіне толтыру параметрлерінің әсерін талдайды. Ең үлкен беріктік тығыздығы 60 % болатын тригексогональды толтыру схемасы үшін бекітілді, бұл қабаттар арасындағы мықты байланысқа байланысты. Тығыздығы 20 % болатын торлы толтыру үшін аз күш байқалды, бұл қабаттардың әлсіз адгезиясын және материалдың төмен тығыздығын көрсетеді.

Muhammad Farhan Muzli және т.б. [9] FDM басып шығарылған PLA өнімдерінің беріктік сипаттамаларына толтыру тығыздығы мен басып шығару жылдамдығы параметрлерінің әсерін талдауға бағытталған. Юнг модулін және толтыру тығыздығының әртүрлі мәндеріндегі созылу беріктігін зерттеуге баса назар аударылады (40 %, 60 %, 80 %) және басып шығару жылдамдығы (30, 60 және 90 мм/с). Зерттеу нәтижелері толтыру тығыздығының жоғарылауы беріктік өнімділігінің жоғарылауына ықпал ететінін көрсетті, ал басып шығару жылдамдығының жоғарылауы кері әсер етеді, қабат аралық адгезияның нашарлауына байланысты беріктікті төмендетеді.

Әдебиеттерге шолу толтыру тығыздығы FDM басып шығару әдісімен жасалған бұйымдардың механикалық, экономикалық және эстетикалық сипаттамаларына жан-жақты әсер ететінін көрсетеді. Беріктік, басып шығару уақыты мен материалды тұтыну арасындағы оңтайлы тепе-теңдікке қол жеткізу үшін параметрлерді мұқият реттеу қажет, сонымен қатар осы параметрлерді күрделі геометрияларға біріктіру үшін қосымша зерттеулер қажет.

Бұл зерттеуде үлгілер әртүрлі басып шығару параметрлері бар 3D форматында жасалған. Үлгілерді басып шығару үшін Picaso Designer Classic 3D принтері пайдаланылды, ал Picaso 3D Polygon X™ бағдарламалық құралы қабаттың биіктігі мен толтыру тығыздығы сияқты басып шығару параметрлерін реттеу

үшін пайдаланылды. Диаметрі 1,75 мм полилактикалық қышқыл (PLA) материалы қолданылды (5-сурет). Полилактикалық қышқыл (PLA) аддитивті технологияда кеңінен қолданылуына және бірқатар негізгі артықшылықтарына байланысты осы зерттеу үшін негізгі материал ретінде таңдалды. PLA-биоүйлесімді және биологиялық ыдырайтын полимер, бұл оны 3D басып шығарудың экологиялық таза нұсқасына айналдырады. Сонымен қатар, PLA төмен балқу температурасымен ерекшеленеді, бұл басып шығаруды жеңілдетеді және деформация қаупін азайтады. Бөлшектерді көбейтудің жоғары дәлдігі және жақсы механикалық қасиеттері оны прототиптер мен функционалды бұйымдар жасау үшін оңтайлы материал етеді. Оның көптеген жұмыс үстелі 3D принтерлерімен үйлесімділігі материалдың инженерлік және өнеркәсіптік қосымшаларда танымал болуына ықпал етеді. PLA таңдауы әртүрлі геометриялық бұйымдарды өндіру кезінде қабат биіктігі мен толтыру тығыздығы сияқты басып шығару параметрлерінің уақыт пен материалдық шығындарға әсерін зерттеуге назар аударды. 3D принтердің жалпы көрінісі 1-суретте көрсетілген. Принтердің техникалық сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

1- сурет – PICASO Designer Classic 3D принтерінің жалпы көрінісі

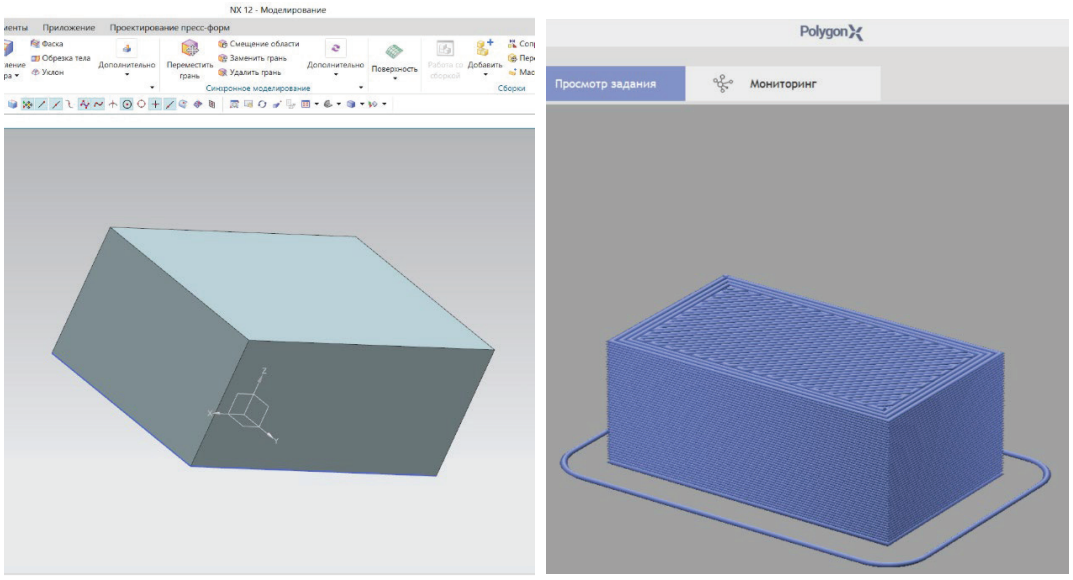
1-кесте – PICASO Designer Classic 3D принтерінің техникалық сипаттамалары

| **Көрсеткіштің атауы** | **Көрсеткіштің мәні** |
|---|---|
| Принтер моделі | PICASO Designer Classic |
| Басып шығару технологиясы | Fused Filament Fabrication (FFF) |
| Басып шығару аймағы, мм | 201x201x210 |
| Басып шығару жылдамдығы, $см^3$/сағ | 100-ге дейін |
| Қабаттың минималды қалыңдығы | 10 мкм (0,01 мм) |
| Пластикалық жіптің диаметрі, мм | 1,75±0,1 |
| Саптаманың диаметрі | 0,5 мм (0,2 – 0,8 мм) |
| Материалдың орналасуы | Принтер корпусының ішінде |

| | |
|---|---|
| Басып шығару температурасы | 250 ºС дейін (қосымшы 410 ºС дейін) |
| Платформаның температурасы | 150 ºС |
| Баспа материалдары | PLA, PVA, ABS, PETG, TPE, SEBS |
| Бағдарламалық қамтамасыз ету | PICASO 3D Polygon X™ |
| Қолданылатын файл түрлері | *.stl, *.amf, *.obj, *.3ds, *.plgx |

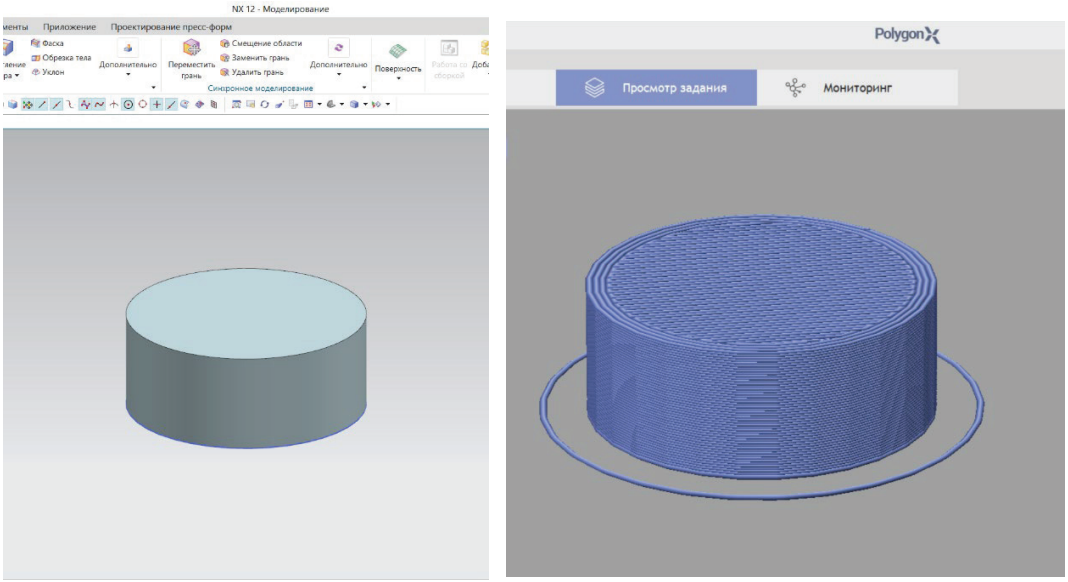
Осы зерттеу аясында әртүрлі формалардың үлгілері жасалды – параллелепипед – 25x15x10 мм (бұдан әрі – 1-объект), цилиндр – 25x25x10 мм (бұдан әрі – 2-объект) және қалақ тәрізді пішін – 38x10x20 мм (бұдан әрі – 3-объект). Олардың ішінде қалақ тәрізді пішін күрделі геометрияның объектісі болып табылады, өйткені оның айнымалы қимасы бар және цилиндр мен параллелепипед сияқты қарапайым геометриялық денелерден ерекшеленеді. Бұл конфигурация материалдың біркелкі бөлінбеуіне және беттің жеткілікті беріктігі мен сапасын қамтамасыз ету үшін басып шығару параметрлерін дәлірек таңдау қажеттілігіне байланысты 3D басып шығару процесін қиындатады.

Үлгілердің CAD файлы Siemens NX бағдарламалық жасақтамасымен модельденген және 3D басып шығару үшін STL форматында экспортталған (2, 3, 4-суреттер).



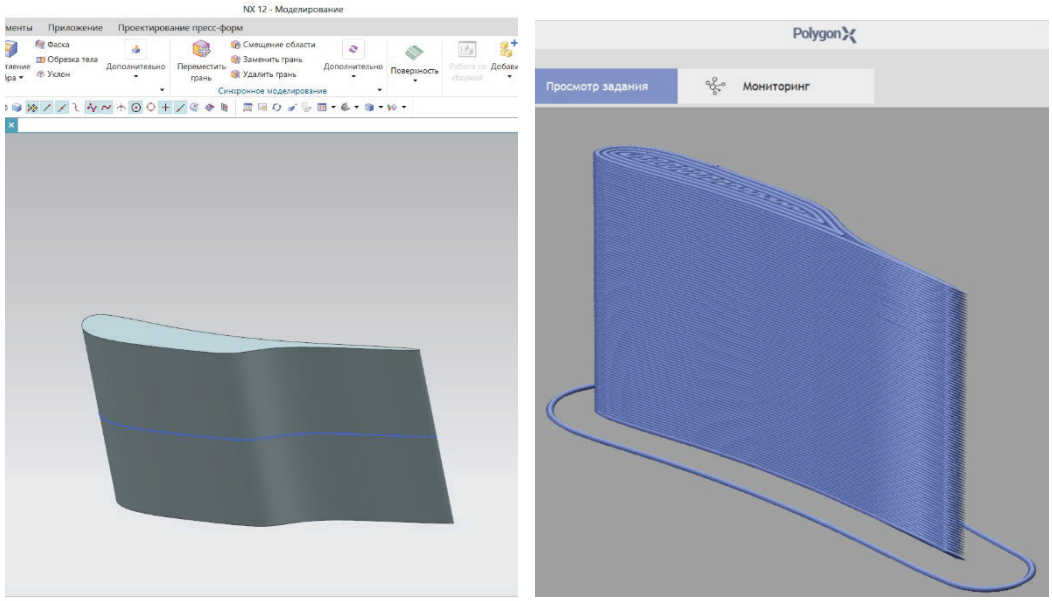

2-сурет – параллелепипедтің 3D моделі: а) Siemens NX бағдарламасындағы 3D моделі; ә) 3D моделінің STL файлы

а) ә)



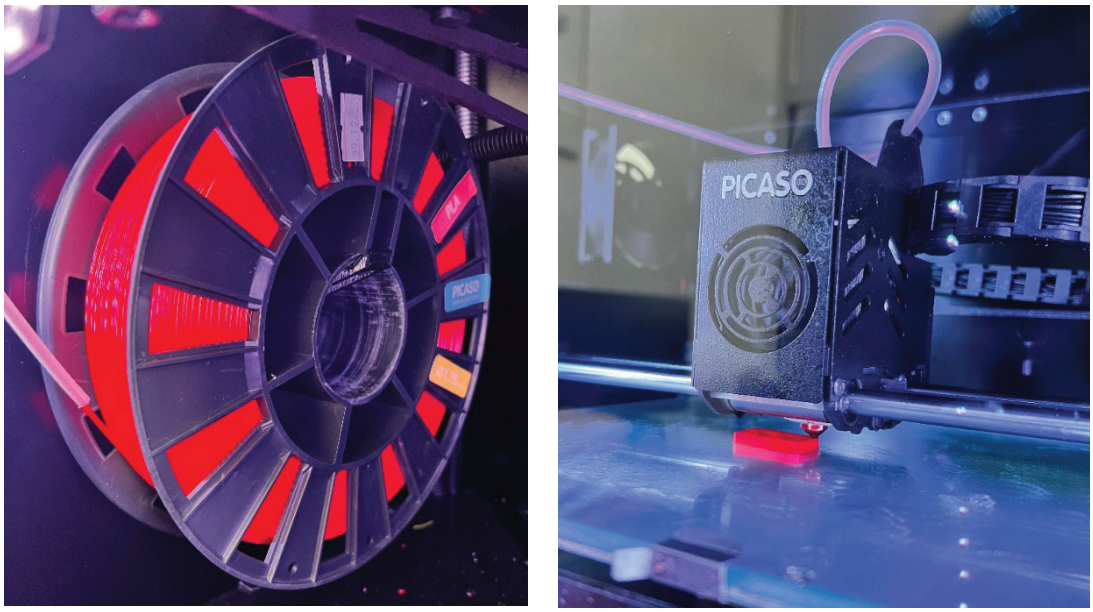

*а)* *ә)*

3-сурет – цилиндрдің 3D моделі: а) Siemens NX бағдарламасындағы 3D моделі; ә) 3D моделінің STL файлы




*а)* *ә)*

4-сурет – қалақ тәрізді 3D моделі: а) Siemens NX бағдарламасындағы 3D моделі; ә) 3D моделінің STL файлы




*а)* *ә)*

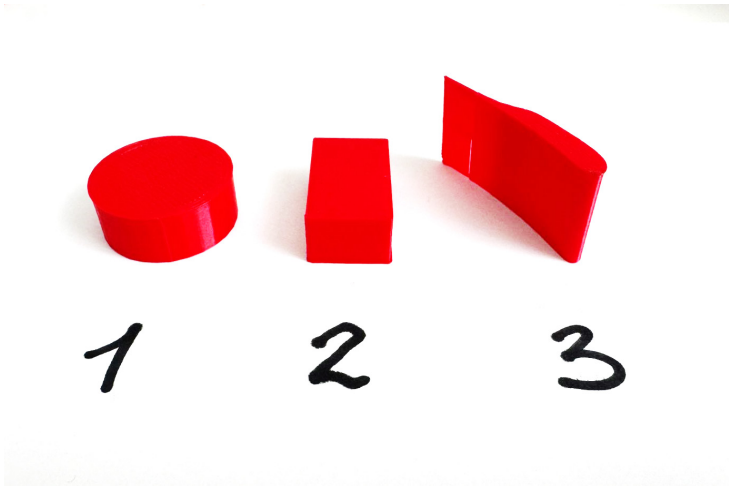
5- сурет – 3D басып шығаруға арналған материал
(а) және FDM басып шығару процесі (ә)

Үлгілерді дайындауда қолданылатын басып шығару параметрлері 2-кестеде келтірілген. Басып шығару процесінде қабаттың биіктігі (0,10 мм, 0,15 мм, 0,20 мм), толтыру тығыздығы (15%, 20%, 30%) өзгерді, ал қалған параметрлер тұрақты болып қалды.

2-кесте – Басып шығару параметрлері

| **Көрсеткіштер** | **Мәні** |
|---|---|
| Материал түрі | PLA |
| Саптаманың диаметрі, мм | 0,4 |
| Саптама температурасы, °C | 210 |
| Үстел температурасы, °C | 50 |
| Басып шығару жылдамдығы, мм/с | 20 |
| Толтыру тығыздығы, % | 15, 20, 30 |
| Қабаттың биіктігі, мм | 0,10, 0,15, 0,20 |
| Толтыру суреті | Ұяшықтар (2D) |
| Принтер корпусы | Жабық |

Үлгілерді басып шығару аяқталғаннан кейін жұмсалған уақыт пен пайдаланылған материалдың көлемі сияқты негізгі көрсеткіштер тіркелді. Бұл деректер қабат биіктігі мен толтыру тығыздығының әрбір вариациясы үшін процестің тиімділігін бағалауға, сондай-ақ оларды басып шығарудың ең оңтайлы параметрлерін анықтай отырып, алынған үлгілердің сапасына сәйкестендіруге мүмкіндік берді.



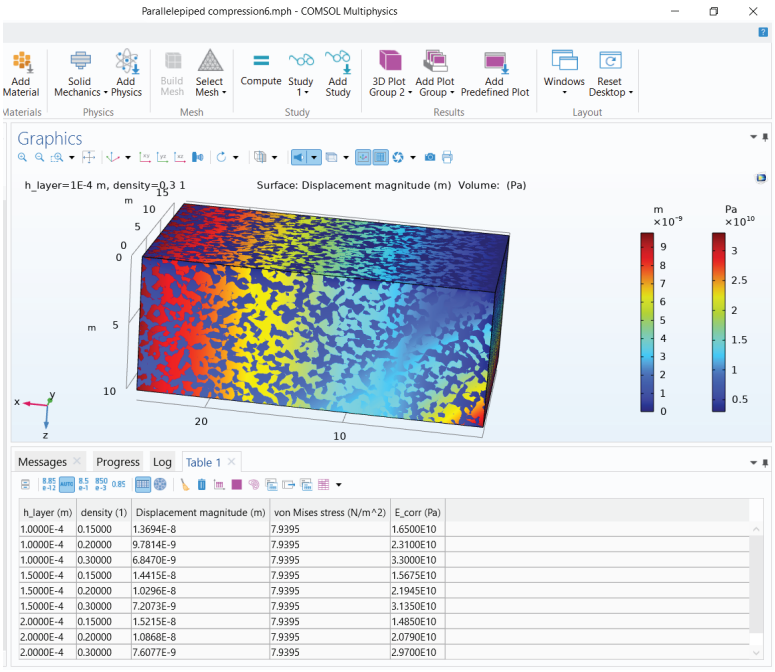

6-сурет – Әр түрлі геометриялардың 3D басып шығарылған үлгілері: цилиндр (1-объект), параллелепипед (2-объект) және қалақ тәрізді пішін (3-объект)

Әрбір нысан (6-сурет) тоғыз нұсқада басып шығару параметрлерінің әртүрлі комбинацияларымен, соның ішінде қабат биіктігінің үш деңгейімен және толтыру тығыздығының үш деңгейімен жасалған.

COMSOL Multiphysics бағдарламалық ортасындағы ақырлы элементтерді сандық модельдеу кезінде FDM басып шығару әдісімен жасалған әртүрлі геометрия үлгілерінің механикалық сипаттамалары – параллелепипед, цилиндр және қалақ пішіні талданды. Негізгі өзгермелі параметрлер қабаттың қалыңдығы (h_layer = 0.1-0.2 мм) және толтыру тығыздығы (density = 0.15-0.3) болды.

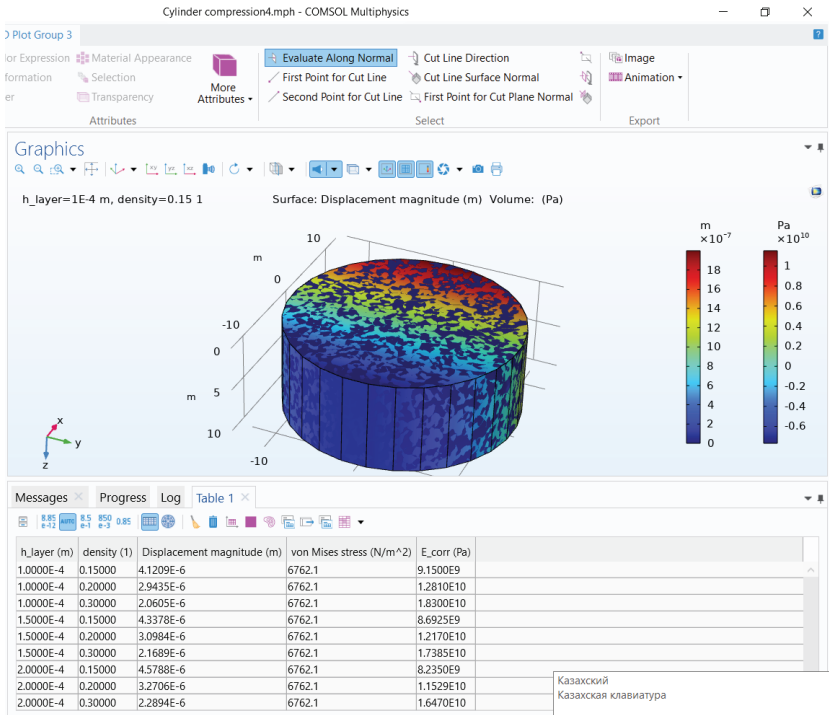
Модельдеудің әр кезеңінде негізгі сипаттамалар анықталды: толық қозғалыс, Мизес кернеуі, түзетілген Юнг модулі.

Есептеу нәтижелері 7-9 суреттерде келтірілген.



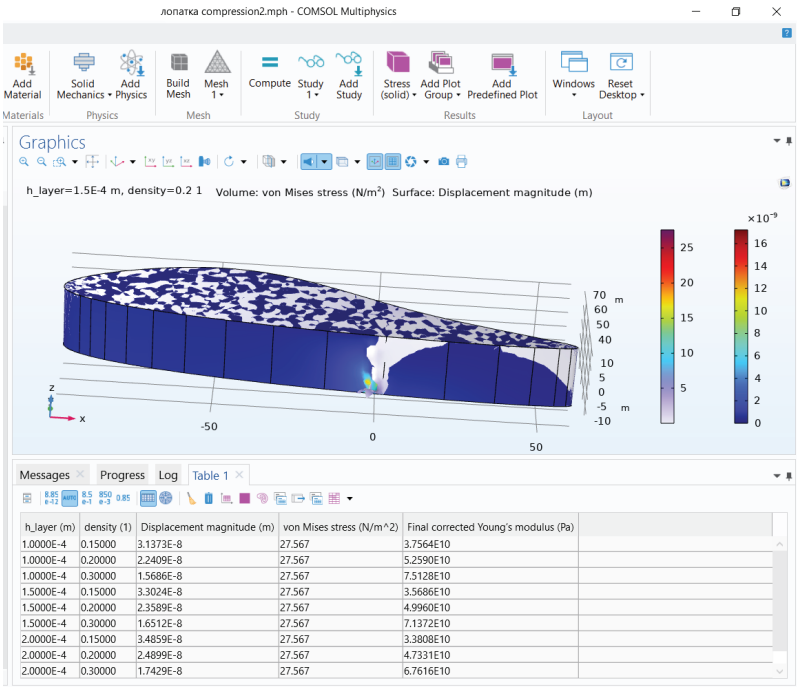

| h_layer (m) | density (1) | Displacement magnitude (m) | von Mises stress (N/m^2) | E_corr (Pa) |
|---|---|---|---|---|
| 1.0000E-4 | 0.15000 | 1.3694E-8 | 7.9395 | 1.6500E10 |
| 1.0000E-4 | 0.20000 | 9.7814E-9 | 7.9395 | 2.3100E10 |
| 1.0000E-4 | 0.30000 | 6.8470E-9 | 7.9395 | 3.3000E10 |
| 1.5000E-4 | 0.15000 | 1.4415E-8 | 7.9395 | 1.5675E10 |
| 1.5000E-4 | 0.20000 | 1.0296E-8 | 7.9395 | 2.1945E10 |
| 1.5000E-4 | 0.30000 | 7.2073E-9 | 7.9395 | 3.1350E10 |
| 2.0000E-4 | 0.15000 | 1.5215E-8 | 7.9395 | 1.4850E10 |
| 2.0000E-4 | 0.20000 | 1.0868E-8 | 7.9395 | 2.0790E10 |
| 2.0000E-4 | 0.30000 | 7.6077E-9 | 7.9395 | 2.9700E10 |

7-сурет – Қысу кезінде параллелепипедтегі қозғалыстар мен кернеулердің таралуы




| h_layer (m) | density (1) | Displacement magnitude (m) | von Mises stress (N/m^2) | E_corr (Pa) |
|---|---|---|---|---|
| 1.0000E-4 | 0.15000 | 4.1209E-6 | 6762.1 | 9.1500E9 |
| 1.0000E-4 | 0.20000 | 2.9435E-6 | 6762.1 | 1.2810E10 |
| 1.0000E-4 | 0.30000 | 2.0605E-6 | 6762.1 | 1.8300E10 |
| 1.5000E-4 | 0.15000 | 4.3378E-6 | 6762.1 | 8.6925E9 |
| 1.5000E-4 | 0.20000 | 3.0984E-6 | 6762.1 | 1.2170E10 |
| 1.5000E-4 | 0.30000 | 2.1689E-6 | 6762.1 | 1.7385E10 |
| 2.0000E-4 | 0.15000 | 4.5788E-6 | 6762.1 | 8.2350E9 |
| 2.0000E-4 | 0.20000 | 3.2706E-6 | 6762.1 | 1.1529E10 |
| 2.0000E-4 | 0.30000 | 2.2894E-6 | 6762.1 | 1.6470E10 |

8-сурет – h_layer = 0.1 мм және density = 0.15 параметрлерінде цилиндрлік модельдегі қозғалыстардың таралуы




| h_layer (m) | density (1) | Displacement magnitude (m) | von Mises stress (N/m^2) | Final corrected Young's modulus (Pa) |
|---|---|---|---|---|
| 1.0000E-4 | 0.15000 | 3.1373E-8 | 27.567 | 3.7564E10 |
| 1.0000E-4 | 0.20000 | 2.2409E-8 | 27.567 | 5.2590E10 |
| 1.0000E-4 | 0.30000 | 1.5686E-8 | 27.567 | 7.5128E10 |
| 1.5000E-4 | 0.15000 | 3.3024E-8 | 27.567 | 3.5686E10 |
| 1.5000E-4 | 0.20000 | 2.3589E-8 | 27.567 | 4.9960E10 |
| 1.5000E-4 | 0.30000 | 1.6512E-8 | 27.567 | 7.1372E10 |
| 2.0000E-4 | 0.15000 | 3.4859E-8 | 27.567 | 3.3808E10 |
| 2.0000E-4 | 0.20000 | 2.4899E-8 | 27.567 | 4.7331E10 |
| 2.0000E-4 | 0.30000 | 1.7429E-8 | 27.567 | 6.7616E10 |

9-сурет – h_layer = 0.15 мм және density = 0.2 параметрлерінде қалақ тәрізді геометриядағы қозғалыстардың таралуы

Параллелепипедте минималды қозғалыс мәндері (~6.8×10$^{-9}$ м) максималды тығыздықта және қабаттың минималды қалыңдығында байқалатыны анықталды. Бұл ретте түзетілген серпімділік модулі ~3.3×1010 Па жетеді. Кернеудің таралуы дененің шеттерінде шоғырлануды көрсетеді, бұл шекаралық жағдайлар мен геометрияға байланысты.

Цилиндрлік пішін үш пішіннің ішінде ең үлкен қозғалыстарға ие (~2.3×10⁻9 м), бұл қаттылықтың төмендігін көрсетеді. Тиісінше, *E*corr мәндері ~ 1.6×1010 Па. Модель деформациялардың биіктік бойымен біркелкі таралуын көрсетеді.

Лоб тәрізді пішін жоғары тығыздықта және жұқа қабатта орташа қозғалыс мәндерін (~1.7×10⁻8м) көрсетеді. Алайда, бұл барлық формалар арасында максималды серпімділік модуліне қол жеткізеді -7.5×1010 Па дейін, бұл берілген жағдайларда берілген геометрияның жоғары беріктігін көрсетеді.

**Нәтижелер және талқылау**

Бұл зерттеуде материал ретінде полилактид (PLA) қолданылды, ол жақсы қаттылыққа, төмен температураға төзімділікке және салыстырмалы түрде нәзік құрылымға ие. Дегенмен, PLA басып шығару кезінде алынған нәтижелерді қосымша эксперименттер жасамай-ақ ABS немесе PETG сияқты басқа термопластикалық материалдарға тікелей экстраполяциялау мүмкін емес. Мысалы, ABS ыстыққа төзімділігі мен қаттылығымен ерекшеленеді, бұл бірдей басып шығару параметрлерінде қабаттардың пайда болуына және олардың арасындағы адгезияға әсер етуі мүмкін [4]. PETG өз кезегінде үлкен икемділікпен сипатталады, ол толтыру тығыздығы өзгерген кезде өнімнің механикалық қасиеттерін өзгерте

алады [6]. Басып шығару параметрлерінің әртүрлі полимерлерден жасалған бұйымдардың механикалық және пайдалану сипаттамаларына әсерін кешенді талдау үшін [7; 9] беріктігін, термиялық тұрақтылығын және беріктігін сынауды қамтитын қосымша зерттеу қажет.

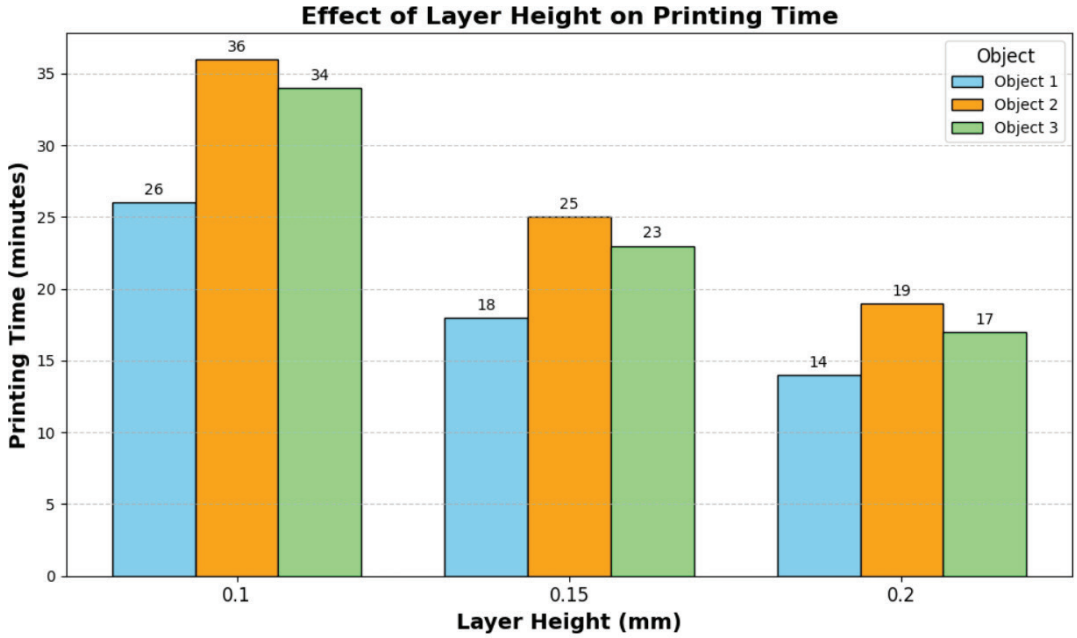
Алынған барлық деректер, соның ішінде басып шығару уақыты мен әр үлгі үшін материалдарды тұтыну жүйеленген және 3-кестеге енгізілген. Бұл үлгілер арасындағы айырмашылықтарды анық көрсетуге және басып шығару процесінің сапасы мен тиімділігіне әсер ететін параметрлерді талдауды жеңілдетуге мүмкіндік берді.

3-кесте – Әртүрлі нысандар үшін 3D басып шығару параметрлері мен нәтижелері

| Объект | Нысан өлшемдері (мм) | Қабаттың биіктігі (мм) | Толтыру тығыздығы (%) | Басып шығару уақыты (мин) | Материал-дың ұзындығы (мм) | Материалдың көлемі (см³) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.1 | 15 | 26 | 779 | 1.87 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.1 | 20 | 27 | 844 | 2.03 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.1 | 30 | 32 | 964 | 2.32 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.1 | 15 | 28 | 949 | 2.28 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.1 | 20 | 31 | 1051 | 2.53 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.1 | 30 | 36 | 1222 | 2.94 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.1 | 15 | 34 | 685 | 1.65 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.1 | 20 | 34 | 699 | 1.68 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.1 | 30 | 36 | 722 | 1.74 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.15 | 15 | 18 | 820 | 1.97 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.15 | 20 | 19 | 883 | 2.12 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.15 | 30 | 21 | 996 | 2.4 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.15 | 15 | 20 | 1011 | 2.43 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.15 | 20 | 21 | 1107 | 2.66 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.15 | 30 | 25 | 1270 | 3.05 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.15 | 15 | 23 | 685 | 1.65 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.15 | 20 | 23 | 698 | 1.68 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.15 | 30 | 24 | 721 | 1.73 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.2 | 15 | 14 | 862 | 2.07 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.2 | 20 | 15 | 921 | 2.22 |
| Объект 1 | 25x15x10 | 0.2 | 30 | 17 | 1028 | 2.47 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.2 | 15 | 16 | 1072 | 2.58 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.2 | 20 | 17 | 1163 | 2.8 |
| Объект 2 | 25x25x10 | 0.2 | 30 | 19 | 1317 | 3.17 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.2 | 15 | 17 | 691 | 1.66 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.2 | 20 | 17 | 705 | 1.7 |
| Объект 3 | 38x10x20 | 0.2 | 30 | 18 | 727 | 1.75 |

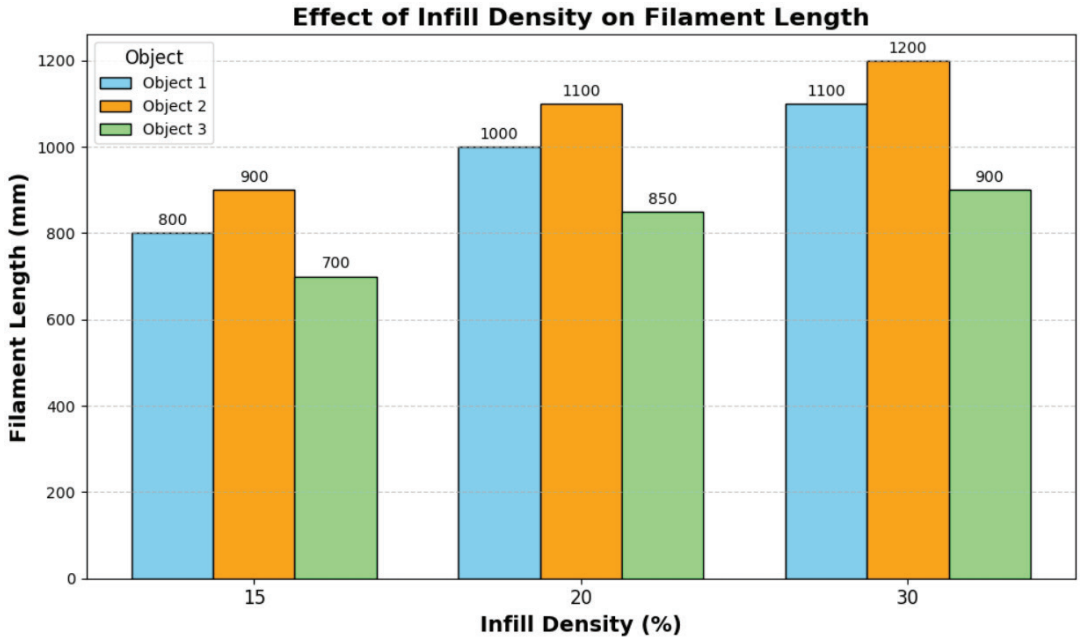
Қабаттың биіктігінің басып шығару уақытына әсері (10-сурет) айқын тенденцияны көрсетеді: қабаттың биіктігі неғұрлым көп болса, әр нысанды басып шығаруға аз уақыт кетеді. Себебі қабаттың биіктігін арттыру басып шығаруды

аяқтау үшін қажетті қабаттардың жалпы санын азайтады [10]. Алайда, объектінің әр түрі үшін кейбір ауытқулар байқалады: «қалақ» сияқты күрделі геометриясы бар объектілер үшін басып шығару уақытының төмендеуі біркелкі болмайды. Бұл құрылымның күрделілігінің қабат биіктігінің параметрлеріне тәуелділігін көрсетуі мүмкін, өйткені әртүрлі қалыңдықтағы қабаттар күрделі пішіндерді басып шығару кезінде дұрыс тұндыру үшін ұзағырақ уақыт алуы мүмкін. Практикалық тұрғыдан алғанда, бұл нақты бөлшектер мен беттің тегістігі маңызды объектілер үшін төменгі қабат биіктігіне артықшылық беріледі, бірақ бұл басып шығару уақытын арттырады.



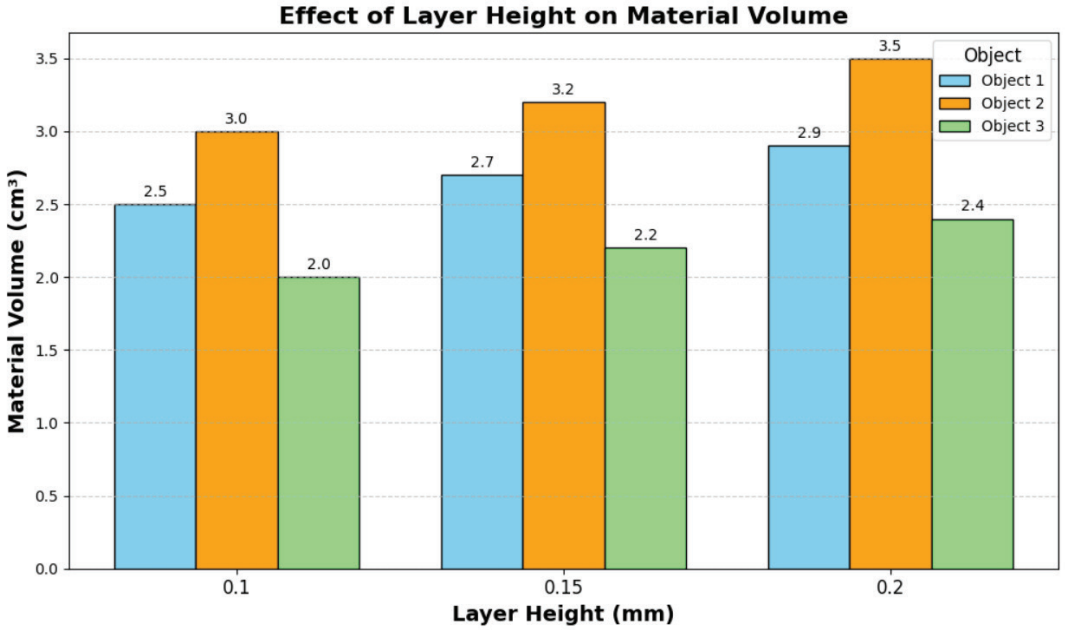

10-сурет – Қабат биіктігінің басып шығару уақытына әсері

Толтыру тығыздығының жоғарылауымен пайдаланылған материалдың ұзындығы барлық нысандар үшін өседі, бұл ішкі толтыру ұлғайған кезде материалды тұтынудың жоғарылауын көрсетеді (11-сурет). Бұл әсер әсіресе цилиндрлік нысандар үшін айқын көрінеді, мұнда тығыздықтың 15 %-дан 30 %-ға дейін өзгеруі параллелепипед сияқты басқа формаларға қарағанда материал ұзындығының едәуір өсуіне әкеледі. Себебі цилиндрлік пішіннің ішкі көлемі үлкен, оны толтыру тығыздығы жоғары болған кезде материал қарқынды түрде толтырады. Минималды беріктік талаптары бар нысандар үшін материалды үнемдеу үшін аз толтыру тығыздығын таңдауға болады, ал беріктік өнімділігін арттыру қажет бөлшектер үшін толтыру тығыздығының жоғарылауы ақталады.




11-сурет – Толтыру тығыздығының материалдың ұзындығына әсері

Қабат биіктігінің төмендеуі басып шығаруда қолданылатын материалдың жалпы көлемінің ұлғаюына әкеледі (12-сурет). Себебі қабаттың биіктігі төмен нысанды аяқтау үшін көбірек қабаттар қажет, бұл тұтынылатын материалдың жиынтық көлемін арттырады. Бұл әсіресе цилиндрлік және қалақ тәрізді формаларда айқын көрінеді, мұнда қабаттың биіктігі төмен болған кезде материалдың қосымша көлемі пішінді дәл көбейту үшін егжей-тегжейлі қабаттасу қажеттілігін көрсетуі мүмкін. Материалдың жоғары көлемі, сонымен қатар тығыздық пен беріктік сияқты механикалық қасиеттердің жоғарылауын білдіруі мүмкін, әсіресе соққыға төзімділік пен жүктемеге төзімділік маңызды құрылымдық элементтер үшін. Алайда, жоғары дәлдік пен ұсақ бөлшектер онша маңызды емес прототиптер немесе бұйымдар өндірісінде материалдың көлемін және басып шығару уақытын азайту үшін жоғары қабат биіктігін пайдалануға болады [10].




12-сурет – Қабат биіктігінің материал көлеміне әсері

**Қорытынды**

Бұл зерттеу Fused Deposition Modelling (FDM) технологиясын пайдалана отырып, PLA материалынан әртүрлі пішіндердің үлгілерін жасау кезінде қабат биіктігі және толтыру тығыздығы сияқты 3D басып шығару параметрлерінің уақыт пен материалдық шығындарға әсерін кешенді бағалауды жүргізді. Эксперименттер барысында мыналар анықталды:

1 Қабаттың биіктігі басып шығару уақытына айтарлықтай әсер етеді, қабаттың биіктігін арттыру жалпы өндіріс уақытын азайтады. Бұл басып шығаруды аяқтау үшін қажет қабаттар санының азаюына байланысты. Алайда, қабат биіктігінің төмендеуімен беттің дәлдігіне қол жеткізуге болады, бұл әсіресе күрделі геометриялар үшін өте маңызды.

2 Толтыру тығыздығы материалды тұтынуға және объектінің беріктік сипаттамаларына тікелей әсер етеді. Толтыру тығыздығының жоғарылауы материалды тұтынудың өсуіне әкеледі, бұл өз кезегінде өнімнің механикалық беріктігін арттырады. Атап айтқанда, жоғары беріктікті қажет ететін объектілер үшін материал шығындарының өсуіне қарамастан толтыру тығыздығының жоғары мәндерін қолданған жөн.

3 Нысан пішіндері басып шығару кезіндегі уақыт пен материалдық шығындарға да әсер етеді. Қалақ тәрізді нысандар сияқты күрделі нысандар басып шығаруды оңтайландыру үшін қосымша параметрлерді қажет етеді, өйткені олардың құрылымы таңдалған опциялар үшін қосымша шектеулер жасай алады.

4 Сандық модельдеу нәтижелері объектінің геометриясы да, басып шығару параметрлері де басып шығарылған модельдердің механикалық мінез-құлқына айтарлықтай әсер ететіндігін көрсетті. Лоб тәрізді пішін қаттылықтың ең

жақсы көрсеткіштерін көрсетеді, ал цилиндрлік пішін деформацияға бейім. Параллелепипедте ең аз кернеулер мен қозғалыстар байқалады, бұл оны тұрақты құю модельдері үшін тиімді етеді.

Осы мақалада жүргізілген эксперименттер қабаттың биіктігі мен толтыру тығыздығы сияқты басып шығару параметрлерінің уақыт пен материалдық шығындарға тәуелділігін зерттеуге бағытталған. Экономикалық тиімділік пен өнімділікті арттыру мақсатында 3D басып шығару процесін оңтайландыруға баса назар аударылды.

Болашақ зерттеулерде өнімнің беріктік сипаттамаларына, соның ішінде жүктемелерге төзімділікке арналған сынақтар ұсынылады. Бұл жұмыс механикалық қасиеттерді одан әрі талдауға және беріктікке ерекше талаптары бар функционалды бөлшектерді шығаруды қоса алғанда, күрделі тапсырмалар үшін нәтижелерді қолдану аясын кеңейтуге негіз болады.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Nadagouda, M. N., Ginn, M, Rastogi, V.** A review of 3D printing techniques for environmental applications// Current Opinion in Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28. – P. 173–178. – https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.08.002.

2 **Hmeidat, N. S., Kemp, J. W., Compton, B. G.** High-strength epoxy nanocomposites for 3D printing // Composite Science and Technology. – 2018. – Vol. 160. – P. 9–20. – https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.03.008.

3 **Xu, C., Dai, G., Hong, Y.** Recent advances in high-strength and elastic hydrogels for 3D printing in biomedical applications // Acta Biomaterialia. – 2019. – Vol. 95. – P. 50–59. – https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.05.032.

4 **Karakurt, I., Lin, L.** 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing // Current Opinion in Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28. – P. 134–143. – https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001.

5 **Pernet, B., Nagel, J. K., Zhang, H.** Compressive strength assessment of 3D printing infill patterns // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 105. – P. 682–687. – https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.114. ISSN 2212-8271

6 **Bonada, J., Pastor, M. M., Buj-Corral, I.** Influence of infill pattern on the elastic mechanical properties of fused filament fabrication (FFF) parts through experimental tests and numerical analyses // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 18. – Article ID: 5459. – https://doi.org/10.3390/ma14185459

7 **Mayandi, K., Rigesh, K., Rajini Nagarajan, Sikiru O. Ismail, Kumar Krishnan, Faruq Mohammad, Hamad A. Al-Lohedan.** Effects of infill density on mechanical properties of additively manufactured chopped carbon fiber reinforced PLA composites // Materials Science-Poland. – 2024. – Vol. 42. – № 1. – P. 42–51. – https://doi.org/10.2478/msp-2024-0003

8 **Sally Cahyati, Reky Amanda Putra.** The effect of infill pattern and density parameters on tensile strength of polymer materials in 3D printing // Jurnal Rekayasa Mesin. – 2023. – Vol. 14, № 3. – P. 753–761. – https://doi.org/10.21776/jrm.v14i3.1005

9 **Muhammad Farhan Muzli, Khairul Izwan Ismail and Tze Chuen Yap.** Effects of infill density and printing speed on the tensile behaviour of Fused Deposition Modelling 3D Printed PLA specimens // Journal of Engineering Technology and Applied Physics. – 2024. – Vol. 6. – № 2. – P. 1–8. – https://doi.org/10.33093/jetap.2024.6.2.1

10 **Tattimbetova, G., Zhetessova, G., Škamat, J., & Mateshov, A.** Impact of layer height on dimensional accuracy in FDM 3D printing // In: Proceedings of the LINDI 2024 Conference. – IEEE, 2024. – P. 183–188. – Part Number: CFP2485C-USB. – ISBN 979-8-3315-1619-2.

03.11.24 ж. баспаға түсті.
14.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
11.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Г. Б. Таттимбетова[1], Г. С. Жетесова[2], А. К. Матешов[3]***
Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 03.11.24.
Поступило с исправлениями 14.11.24.
Принято в печать 11.07.25.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ НА ВРЕМЕННЫЕ И МАТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ

*В статье исследуется влияние ключевых параметров 3D-печати, таких как высота слоя и плотность заполнения, на временные и материальные затраты при изготовлении образцов сложной геометрии из полимолочной кислоты (PLA) с использованием технологии Fused Deposition Modelling (FDM). Были исследованы объекты различных форм, включая параллелепипед, цилиндр и лопастевидную структуру, напечатанные с различной высотой слоя (0,10, 0,15, 0,20 мм) и плотностью заполнения (15 %, 20 %, 30 %) при неизменных параметрах температуры, скорости печати и диаметра сопла. В процессе экспериментов измерялись такие показатели, как время печати, расход материала и объем напечатанного изделия, что позволило провести комплексную оценку экономической эффективности и качества напечатанных образцов. Результаты исследования показывают, что увеличение высоты слоя существенно сокращает время печати, а повышение плотности заполнения способствует увеличению расхода материала, улучшая при этом механические характеристики напечатанных изделий. Исследование предлагает рекомендации по оптимизации параметров 3D-печати для достижения наилучшего баланса между производительностью, качеством, экономичностью и прочностными характеристиками, что особенно важно для применения аддитивных технологий в инженерных и промышленных сферах.*

*Ключевые слова: высота слоя, плотность заполнения, 3D-печать, материальные затраты, временные затраты.*

***G. B. Tattimbetova[1], G. S. Zhetessova[2], A. K. Mateshov[3]***
Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 03.11.24.
Received in revised form 14.11.24.
Accepted for publication 11.07.25.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INFILL DENSITY ON TIME AND MATERIAL COSTS IN 3D PRINTING

*The article examines the influence of key 3D printing parameters, such as layer height and filling density, on time and material costs in the manufacture of samples of complex geometry from polylactic acid (PLA) using Fused Deposition Modeling (FDM) technology. Objects of various shapes were studied, including a parallelepiped, a cylinder and a blade-shaped structure, printed with different layer heights (0.10, 0.15, 0.20 mm) and filling density (15 %, 20 %, 30 %) with constant parameters of temperature, printing speed and nozzle diameter. During the experiments, such indicators as printing time, material consumption and volume of the printed product were measured, which allowed for a comprehensive assessment of the economic efficiency and quality of the printed samples. The results of the study show that increasing the height of the layer significantly reduces the printing time, and increasing the filling density increases material consumption, while improving the mechanical characteristics of printed products. The study offers recommendations for optimizing 3D printing parameters to achieve the best balance between performance, quality, cost-effectiveness and strength characteristics, which is especially important for the application of additive technologies in engineering and industrial fields.*

*Keywords: layer height, infill density, 3D printing, material costs, time costs.*

ҒТАМР 55.19.13

https://doi.org/10.48081/SSHV6727

***С. О. Тусупова[1], Н. Ю. Кузьминова[2], А. С. Янюшкин[3],***
***З. Р. Исабек[4], А. Д. Сулейменов[5]***

[1,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2]Қарағанды индустриялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.;
[3]Чуваш мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы, Чебоксары қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8920-4901
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1705-0405
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5744-8987
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8895-050X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9319-0285
*e-mail: suleeva.s@inbox.ru

# *ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚТЫ ФРЕЗЕРЛЕУ КЕЗІНДЕ ҚИЫН ӨҢДЕЛЕТІН МАТЕРИАЛДАРДЫҢ БЕТКІ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ*

*Қазіргі заманғы өңдеуші өнеркәсіп жағдайында беріктігі, ыстыққа төзімділігі және коррозияға төзімділігі жоғары өңделуі қиын материалдар белсенді түрде қолданылуда. Бірақ оларды механикалық өңдеу құралдың тозуының жоғарылауымен, өнімділіктің төмендеуімен және беттің қажетті сапасын қамтамасыз етудегі қиындықтармен қатар жүреді [1, 71–73-бб.]. Осыған байланысты қазіргі заманғы өңдеу әдістері, атап айтқанда, жоғары жылдамдықты фрезерлеу қызығушылықты арттыруда.*

*Бұл мақалада әлемдік тәжірибеде қолданылатын қиын өңделетін материалдарды өңдеудің өзекті әдістеріне шолу жасалып, қиын өңделетін материалдарды өңдеу ерекшеліктері анықталған. Жүргізілген эксперименттік зерттеулерде негізгі назар қиын өңделетін материалдарды жоғары жылдамдықпен фрезерлеу кезінде беткі қабатының қасиеттеріне әсері қарастырылды. Зерттеу нысаны ретінде қиын өңделетін материалдардың үш түрі пайдаланылды: титан ВТ-1, ыстыққа төзімді болат 20Х23Н18 және аустениттік коррозияға төзімді болат 10Х17Н13М2Т.*

*Өңделген беттің қаттылығы мен кедір-бұдырлық параметрлеріне жүргізілген талдау жоғары жылдамдықпен өңдеудің тұрақты сипаттамаларды қамтамасыз етудегі артықшылықтарын көрсетті. Эксперимент нәтижелері жоғары жылдамдықты өңдеудің тиімділігін растады. Ұсынылған деректер машина жасауда және басқа да салаларда өңдеу режимдерін оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін.*

*Осылайша, бұл зерттеу қиын өңделетін материалдармен жұмыс істеу кезінде өңдеу тиімділігі мен өнім сапасын арттыруға бағытталған қазіргі заманғы машина жасау салаларының дамуы жағдайында өзекті және сұранысқа ие.*

*Кілтті сөздер: жоғары жылдамдықты фрезерлеу, кесу режимдерін оңтайландыру, титан, ыстыққа төзімді болат, беткі қабат, қаттылық, кедір-бұдырлық.*

**Кіріспе**

Қиын өңделетін материалдарды кесу арқылы өңдеу көптеген отандық машина жасау өнеркәсіптері үшін материалдық шығындар және төмен өнімділікке алып келетін өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Қиын өңделетін материалдарға дәстүрлі түрде титан қорытпалары, ыстыққа төзімді және жоғары легирленген болаттар, никель және хром қорытпалары, сондай-ақ қаттылығы жоғары шыңдалған материалдар жатады. Аталған материалдарды біріктіретін ортақ белгі – кесу процессіне кері әсер ететін қолайсыз қасиеттер жиынтығы:

– төмен жылу өткізгіштік, ол кесу аймағының қызып кетуіне және құралдың жылдам тозуына ықпал етеді;

– жоғары беріктік пен қаттылық, әсіресе жоғары температурада, мамандандырылған құралдар мен кесу режимдерін қолдануды талап етеді;

– кесу жиегінде жабысу, қажама және өсінділер пайда болуға бейімділік, бұл беттің сапасын төмендетеді және тозуды тездетеді;

– жоғары жүктемелер кезінде тұрақты пластикалық деформация, бұл кесу режимдерін басқаруды қиындатады;

– жоғары діріл белсенділігі және өздігінен туындайтын тербелістерге бейімділік [2].

Қазіргі заманғы механикалық өңдеу технологиялары жоғарыда аталған мәселелерді шешуге бағытталған түрлі тәсілдерді ұсынады, олардың ішінде өндіріс өнімділігін арттыруға және өңделген беттің сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік беретін перспективалы әдіс ретінде жоғары жылдамдықты фрезерлеу ерекшеленеді [3]. Бірқатар ғылыми еңбектерде [4; 5; 6] қиын өңделетін материалдарды жоғары жылдамдықпен фрезерлеу үрдісіне жүргізілген эксперименттік зерттеулердің нәтижелері баяндаған, бұл әдістің тиімділігін дәлелдей түседі. [7, 150–154-бб.] зерттеу жұмысында никельді суперқорытпа FGH96 өңдеуде сиалон керамикалық кескіштерді қолданудың тиімділігін зерттеді, мұнда кесу күштері, температура жағдайлары және құралдың тозуы талданды. Авторалар [8] жұмыста супердуплексті тот баспайтын болатты өңдеу кезінде кесу жылдамдығының беттің кедір-бұдырлығына әсері зерттелді, ал [9, 554–556-бб.] легирленген шойын Cr15Mo өңдеу кезінде тегістеумен салыстырылатын бет сапасына қол жеткізумен режимдерді көп критериалды оңтайландыру жүргізілді. Зерттеулер арасында ерекше назар титан қорытпасын өңдеуге арналған. Авторалар [10, 46–47-бб.] жұмыста материалдың жылу өткізгіштігінің төмендігі және кесу күштерінің жоғары мәндері кесу құралдарының жылдам тозуына әкелетіндігін тұжырымдады, сонымен қатар [11, 33–37-бб.] зерттеуде титан қорытпаларына арналған фрезерлеудің оңтайлы режимдері ұсынылды. Дегенмен, жүргізілген шолу нәтижесінде қиын өңделетін материалдарды механикалық өңдеу үрдістерінде бірқатар технологиялық

қиындықтардың бар екені анықталды. Ең елеулі мәселелердің қатарына төмен өнімділік, кесу үрдісінің тұрақсыздығы және кескіш құралдың қарқынды тозуы жатады, бұл өңдеу тиімділігі мен үнемділігін айтарлықтай шектеді. Бұл зерттеудің негізгі мақсаты – жоғары жылдамдықпен фрезерлеу үрдісінің түрлі қиын өңделетін материалдардың беткі қабатының қасиеттеріне тигізетін әсерін зерттеу және бағалау.

**Материалдар мен әдістер**

Эксперимент жүргізу үшін үш түрлі қиын өңделетін материал дайындалды: титан (ВТ-1), ыстыққа төзімді болат (20Х23Н18) және аустениттік коррозионды болат (10Х17Н13М2Т) (1-сурет).

*а* *б* *в*

а – титан (ВТ-1); б – ыстыққа төзімді болат (20Х23Н18);
в – аустениттік коррозионды болат (10Х17Н13М2Т)
1-сурет –Қиын өңделетін металдар
мен қорытпалардан дайындалған дайындамалар

Алынған материалдар – қазіргі өндірісте кеңінен қолданылатын және өңдеу тұрғысынан қиын өңделетін материалдар қатарына жататын, сонымен қатар химиялық құрамы мен құрылымдық ерекшіліктері бойынша бір-бірінен айырмашылықтар бар болғандықтан, олардың беттік қабатына жоғары жылдамдықты фрезерлеудің әсерін салыстырмалы түрде бағалауға және әр материалға тән технологиялық параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді. Материалдардың химиялық құрамы, механикалық және жылулық қасиеттері 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте – Химиялық құрамы, механикалық және жылулық қасиеттері

| Химиялық құрамы ВТ-1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Элемент | Ti | Fe | O | C | N | H |
| Массалық үлесі, % | 99,2 | 0,3 | 0.25 | 0.08 | 0.03 | 0.015 |

| Механикалық және жылулық қасиеттері ВТ-1 | | | |
|---|---|---|---|
| Аққыштық шегі (МПа) | Қаттылық (НВ) | Салыстырмалы ұзару (%) | Жылу өткізгіштік (Вт/м·К) |
| 300-400 | 200-260 | 18-25 | 15-20 |

| Химиялық құрамы 20Х23Н18 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Элемент | C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr |
| Массалық үлесі, % | до 0,2 | 0,9 | 2 | 17-20 | 0,02 | 0,035 | 22-25 |

| Механикалық және жылулық қасиеттері 20Х23Н18 | | | |
|---|---|---|---|
| Аққыштық шегі (МПа) | Қаттылық (НВ) | Салыстырмалы ұзару (%) | Жылу өткізгіштік (Вт/м·К) |
| 210-320 | 170-200 | 30-35 | 24 |

| Химиялық құрамы 10Х17Н13М2Т | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Элемент | C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Mo | Cu |
| Массалық үлесі, % | 0,1 | 0,8 | 2 | 12-14 | 0,02 | 0,035 | 16-18 | 2-3 | 0,3 |

| Механикалық және жылулық қасиеттері 10Х17Н13М2Т | | | |
|---|---|---|---|
| Аққыштық шегі (МПа) | Қаттылық (НВ) | Салыстырмалы ұзару (%) | Жылу өткізгіштік (Вт/м·К) |
| 300-350 | 200 | 35-40 | 15 |

Өңдеу жұмыстары Siemens SINUMERIK басқару жүйесімен жабдықталған жоғары дәлдіктегі тік типтегі өңдеу орталығы – V-Center P76 сандық бағдарламалық басқару (СББ) білдегінде жүргізілді (2-сурет). Аталған жабдық жоғары дәлдік пен тұрақтылықты қамтамасыз ете отырып, жоғары жылдамдықты фрезерлеу технологиясын жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Тәжірибелерді жүргізу барысында дайындалған үш үлгі, әрбір үлгіні өңдеу бес өтімменде екі рет орындалды. Жалпы саны 30 өтім орындалды. Өңдеу кезінде технологиялық процестің екі айнымалысы өзгерді:

– шпиндельдің айналу жиілігі (n) – 6000-нан 12000 айн/мин аралығында;

– беріліс (S) – 700-ден 4500 мм/мин аралығында.

Аталған параметрлерді өзгерту өңделген беттің сипаттамаларына әсерін анықтау мақсатында алдын ала белгіленген деңгейлер бойынша жүргізілді. Эксперименттің тазалығын қамтамасыз ету үшін барлық басқа параметрлер (құрал түрі, кесу тереңдігі, салқындату) тұрақты болды.

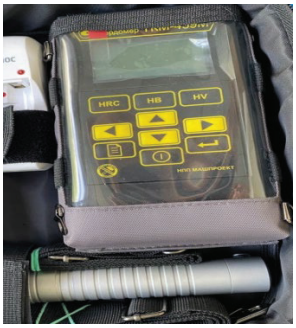
*а*

*б*

*в*

а –V-Center P76 білдегін баптау; б, в – жоғары жылдамдықты фрезерлеу үрдісі
2-сурет –Эксперименттік тәжірибелерді жүргізу үдерісі

Параметрлерді өзгертудің бұл тәсілі жоғары жылдамдықты фрезерлеу режимдерінің беткі қабаттың қалыптасуына әсерін (кедір-бұдыр дәрежесі, қаттылық) зерттеуге мүмкіндік берді. Өңделген беттің қаттылығын бақылау ТКМ-439 ультрадыбыстық қаттылық өлшегішімен және беттің сапасын бағалау TR110 беттік кедір-бұдырды өлшеу құрылғысымен құрылғысымен қалай жүзеге асырылды (3-сурет).

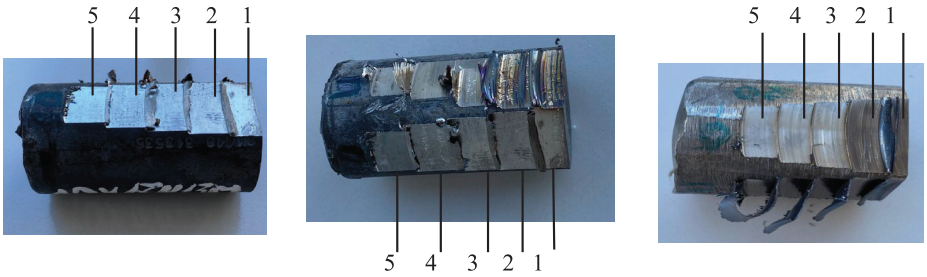



*а*

*б*

а – ультрадыбыстық қаттылық өлшегіш ТКМ-439;
б – TR110 беттік кедір-бұдырлықты өлшеу құрылғысы
3-сурет – Өңделген материалдың беткі қабатын
бағалауға арналған бақылау құрылғылары

Өлшеу үлгінің оң жақ шетінен сол жаққа қарай бес бақылау нүктесінде жүргізілді (1 → 5 позиция). Бұл құрылымдық өзгерістердің біркелкілігін, сондай-ақ алынған беткі қабаттың сапасын бағалауға мүмкіндік берді. Қаттылықты өлшеу Бринелл шкаласы (НВ) бойынша жүргізілді, ал беттің кедір-бұдырын бақылау Ra параметрі бойынша жүргізілді. Бұл біріктірілген өлшеу материалдың механикалық және физикалық қасиеттеріне жоғары жылдамдықтағы фрезерлеудің әсерін жан-жақты бағалауды қамтамасыз етеді. 4-суретте фрезерлеуден кейінгі беткі қабаттың өзгерістерін визуалды түрде бағалауға болатын өңделген үлгілер көрсетілген.



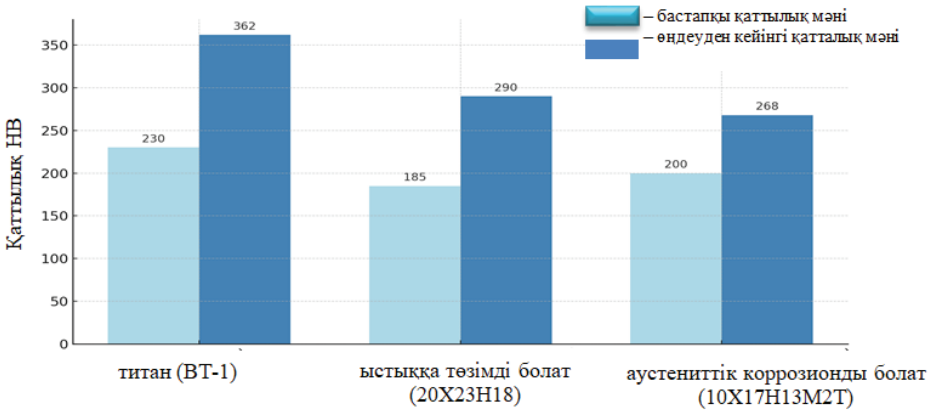

*а* *б* *в*

а – аустениттік коррозионды болат (10Х17Н13М2Т);
б – титан (ВТ-1); в – ыстыққа төзімді болат (20Х23Н18)
4-сурет – Өңдеуден кейінгі үлгілер

Эксперимент нәтижелері әртүрлі материалдар мен өңдеу режимдері арасындағы салыстырмалы талдауға негіз болды.

**Нәтижелер және талқылау**

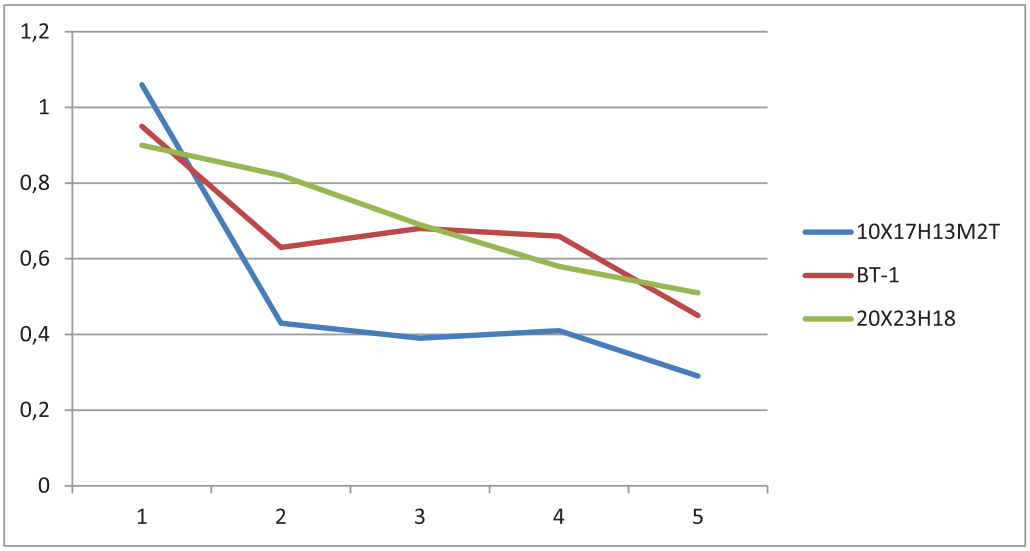
Жүргізілген эксперименттердің нәтижелері бойынша әр материал бойынша қаттылықтың (5-сурет) және кедір-бұдырлықтың (6-сурет) өзгеру графиктері салынды.




5-сурет – Тәжірибе жүргізілгенге дейінгі және
одан кейінгі қаттылық көрсеткіштерінің өзгерісі

Жүргізілген тәжірибе шеңберінде жоғары жылдамдықпен фрезерлеуден кейін ұсынылған материалдардың қаттылық өзгерісінің динамикасы талданды. Қаттылықтың ең айқын артуы ВТ-1 титан қорытпасында байқалды, бұл оның кесу аймағындағы жоғары сезімталдығы мен қарқынды термиялық қатаюына байланысты. Ыстыққа төзімді болат 20Х23Н18 сондай-ақ қаттылықтың айтарлықтай жоғарылауын көрсетті, бұл мұндай болаттардың беттік қасиеттерін жақсартуда жоғары жылдамдықпен өңдеудің тиімділігін растайды. 10Х17Н13М2Т аустениттік коррозияға төзімді болат өңдеуден кейінгі барлық кезеңдерде қаттылықтың тұрақты жоғарылауын көрсетті, бұл оның термомеханикалық әсерлерге төзімділігін көрсетеді. Бұл құбылыс жылудың біркелкі таралуымен, шыңдалуға төмен бейімділікпен және материал құрылымының тұрақтылығымен түсіндірілуі мүмкін.

Нәтижелер жоғары жылдамдықты фрезерлеу материалдардың механикалық қасиеттеріне, әсіресе өңделген беттің қаттылық параметрлеріне әсер ететіндігін растайды. Бұл өзгеріс тетіктердің тозуға төзімділігіне, беріктігіне және қызмет ету мерзіміне оң әсер етеді. Алайда, шамадан тыс қатайтудың қалдық кернеулердің пайда болуына әкелуі мүмкін екенін ескеру қажет, бұл болса пайдалану барысында микро жарықшалардың түзілуіне ықпал етеді.




6-сурет – Өңдеуден кейінгі кедір-бұдырлық көрсеткіштері

Тәжірибе барысында жоғары жылдамдықтағы фрезерлеудің әртүрлі режимдерінде өңделген беттердің кедір-бұдырлық параметрлері әртүрлі де зерттелді. Әсіресе, беріліс және шпиндель жылдамдығының әсеріне ерекше назар аударылды.

Берілістің ауыспалы мәндерінде пен шпиндельдің тұрақты жылдамдығында тұрақсыз кедір-бұдырлық мәндері байқалды. Мәндердің ауытқуы 1,3 Ra бірлікке дейінгі диапазонда өзгерді, бұл беттің біркелкі еместігін және тербелістердің

ықтимал әсерін, үзілмелі кесу немесе контакт аймағындағы термиялық тұрақсыздықты көрсетеді.

Екінші жағдайда, яғни, беріліс жылдамдығы тұрақты болып, шпиндельдің айналу жиілігі шамасы 8000-9000 айн/мин болған жағдайда ең төменгі кедір-бұдырлықпен жақсы нәтиже алынды (6-сурет). Бұл жоғары жылдамдықтағы тұрақты кесу жағдайлары біркелкі және тегіс беткі микрорельефті қалыптастыра отырып, сапалы өңдеуді қамтамасыз ететінін дәлелдейді.

**Қаржыландыру туралы ақпарат**

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті – № AP 19174917 гранты «Кесу режимдерін оңтайландыру және процесті модельдеу арқылы қиын өңделетін материалдарды жоғары жылдамдықты фрезерлеудің сапасын зерттеу және жақсарту» қаржыландырады.

**Қорытындылар**

Жүргізілген зерттеу қиын өңделетін материалдарды жоғары жылдамдықты фрезерлеу технологиясын қолданып, жоғары өнімділікке қол жеткізуге және бетінің сапасын жақсартуға бағытталған. Бұл мақалада кесу режимдерінің өңделген беттің сапасына әсері қарастырылады. Жүргізілген талдау негізінде оңтайлы кедір-бұдырлық параметрлеріне шпиндельдің жоғары айналу жиілігінде (8000-9000 айн/мин) және тұрақты беріліс кезінде қол жеткізіледі, бұл беттің қажетті сапасын қамтамасыз ету үшін жоғары жылдамдықты өңдеу режимдерін таңдау кезінде ескерілуі керек деп қорытынды жасауға болады. Өңдеу нәтижесінде алынған беттердің қаттылығы өзгермелі параметрлерге қарамастан, қатайған беткі қабаттың тұрақты түзілуі сипатына ие екенін көрсетті.

Осылайша, жоғары жылдамдықты фрезерлеу өнімділікті арттырып қана қоймайды, сонымен қатар өңделетін беттің сапа сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік береді.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Тусупова, С. О., Махмудов, Л. Н.** Состояние проблемы обработки труднообрабатываемых материалов [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2023. – № 3. – С. 71–82.

2 **Маслов, А. Р., Схиртладзе, А. Г.** Обработка труднообрабатываемых материалов резанием: учебное пособие [Текст]. – М. : Инновационное машиностроение, 2017. – 208 с.

3 **Мокрицкий, Б. Я.** Проблемы эффективной обработки труднообрабатываемых материалов : монография [Текст] – Комсомольск-на-Амуре : КнАГУ, 2021. – 162 с.

4 **Трусов, В. Н., Скуратов, Д. Л., Законов, О. И., Шикин, В. В.** Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов [Текст] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 3–1. – С. 57–62.

5 **He, Q., Saciotto, V., DePaiva, J.M., Guimaraes, M.C., Kohlscheen, J., Veldhuis, S. C.** Enhancing Tool Performance in High-Speed End Milling of Ti6Al-4V Alloy : The Role of AlCrN PVD Coatings and Resistance to Chipping Wear [Text] // J. Manuf. Mater. Process. – 2024. – № 8(2). – 68. – https://doi.org/10.3390/jmmp8020068.

6 **Hojati, F., Azarhoushang, B., Daneshi, A., Hajyaghaee Khiabani, R.** Prediction of Machining Condition Using Time Series Imaging and Deep Learning in Slot Milling of Titanium Alloy [Text] // J. Manuf. Mater. Process. – 2022. – 6. – 145. – https://doi.org/10.3390/ jmmp6060145.

7 **Weiwei, M., Xianghuiю H., Min, J., Jinyang, X., Fan, Z., Ming, Ch.** Analysis of cutting responses of Sialon ceramic tools in high-speed milling of FGH96 superalloys [Text] // Ceramics International. – 2021. – Vol.47. – P. 149–156.

8 **Janardhan, L., Chandrappa, K., Suresh, R.** An Experimental Study on High-Speed Milling of Super Duplex Stainless Steel and to Investigate the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness [Text] // J. Inst. Eng. India Ser. – 2024. – Vol.105. – P.127–132.

9 **Du, M., Wang, J., Zhang, J.** Reliable analysis of design optimization of experimental results of high-speed milling of alloyed cast iron [Text] // China Mechanical Engineering. – 2019. – Vol.30 (5). – P. 554–559.

10 **Егоров, Ю. А., Сидоров, П. Н.** Особенности фрезерования титановых сплавов [Текст] // Вестник машиностроения. – 2020. – № 7. – С. 45–49.

11 **Козлов, С. В., Ширшов, О. Е.** Повышение эффективности режимов высокоскоростного фрезерования деталей из титановых сплавов [Текст] // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований. – Новосибирск : Изд. ООО «СибАК». – 2021. – № 1. – С. 31–44.

REFERENCES

1 **Tussupova, S. O., Maxmudov, L. N.** Costoyanie problemy` obrabotki trudnoobrabaty`vaemy`x materialov [State of the problem of processing difficult-to-process materials] [Text]. – Science and Technology of Kazakhstan. – 2023. – № 3. – P. 71–82.

2 **Maslov, A. R., Skhirtladze, A. G.** Obrabotka trudnoobrabaty`vaemy`x materialov rezaniem: uchebnoe posobie [Processing of hard-to-process materials by cutting: a textbook] [Text]. – Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2017. – 208 p.

3 **Mokritsky, B. Ya.** Problemy` e`ffektivnoj obrabotki trudnoobrabaty`vaemy`x materialov : monografiya [Problems of efficient processing of difficult-to-machine materials: monograph] [Text]. – Komsomolsk-on-Amur: KnAGU, 2021. – 162 p.

4 **Trusov, V. N., Skuratov, D. L., Zakonov, O. I., Shikin, V. V.** Vliyanie rezhimov rezaniya na temperaturu pri frezerovanii zagotovok iz trudnoobrabaty`vaemy`x materialov [The effect of cutting modes on temperature when milling workpieces made of hard-to-process materials] [Text] // Bulletin of Samara State Aerospace University named after Academician of SP Korolev (National Research University). – 2011. – № 3–1. – P. 57–62.

5 **He, Q., Saciotto, V., DePaiva, J. M., Guimaraes, M. C., Kohlscheen, M. M., Veldhuis, S. C.** Enhancing Tool Performance in High-Speed End Milling of Ti6Al-4V Alloy : The Role of AlCrN PVD Coatings and Resistance to Chipping Wear [Text] // J. Manuf. Mater. Process. – 2024. – № 8(2). – 68. – https://doi.org/10.3390/jmmp8020068.

6 **Hojati, F., Azarhoushang, B., Daneshi, A., Hajyaghaee Khiabani, R.** Prediction of Machining Condition Using Time Series Imaging and Deep Learning in Slot Milling of Titanium Alloy [Text] // J. Manuf. Mater. Process. – 2022. – 6. – 145. – https://doi.org/10.3390/ jmmp6060145.

7 **Weiwei, M., Xianghuiю H., Min, J., Jinyang, X., Fan, Z., Ming, Ch.** Analysis of cutting responses of Sialon ceramic tools in high-speed milling of FGH96 superalloys [Text] // Ceramics International. – 2021. – Vol.47. – P. 149–156

8 **Janardhan, L., Chandrappa, K., Suresh, R.** An Experimental Study on High-Speed Milling of Super Duplex Stainless Steel and to Investigate the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness [Text] // J. Inst. Eng. India Ser. – 2024. – Vol.105. – P.127–132

9 **Du, M., Wang, J., Zhang, J.** Reliable analysis of design optimization of experimental results of high-speed milling of alloyed cast iron [Text] // China Mechanical Engineering. – 2019. – Vol.30 (5). – P. 554–559.

10 **Egorov, Yu. A., Sidorov, P. N.** Osobennosti frezerovaniya titanovy`x splavov [Features of milling titanium alloys] [Text] // Bulletin of mechanical engineering. – 2020. – № 7. – P. 45–49.

11 **Kozlov, S. V., Shirshov, O. E.** Povy`shenie e`ffektivnosti rezhimov vy`sokoskorostnogo frezerovaniya detalej iz titanovy`x splavov [Improving the efficiency of high-speed milling modes for titanium alloy parts] [Text] // Issues of technical and physical-mathematical sciences in light of modern research. – Novosibirsk : Publ. OOO «SibAK». – 2021. – № 1. – P. 31–44.

01.08.24 ж. баспаға түсті.
04.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
11.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***С. О. Тусупова[1], Н. Ю. Кузьминова[2], А. С. Янюшкин[3],***
***З. Р. Исабек[4], А. Д. Сулейменов[5]***
[1,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[2]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау;
[3]Чувашский государственный университет,
Российская Федерация, г. Чебоксары.
Поступило в редакцию 01.08.25.
Поступило с исправлениями 04.08.25.
Принято в печать 11.08.25.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ КАЧЕСТВА ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

*В условиях современной обрабатывающей промышленности наблюдается активное применение труднообрабатываемых материалов, обладающих высокой прочностью, термостойкостью и коррозионной стойкостью. Однако их механическая обработка сопровождается повышенным износом инструмента, снижением производительности и трудностями в обеспечении требуемого качества поверхности [1, с. 71–73]. В связи с этим возрастающий интерес вызывают современные методы обработки, в частности – высокоскоростное фрезерование.*

*В данной статье представлен обзор актуальных методов обработки труднообрабатываемых материалов, применяемых в мировой практике, выявлены особенности обработки труднообрабатывающих материалов. Выполнены экспериментальные исследования, в которых основное внимание уделено влиянию высокоскоростного фрезерования на свойства поверхностного слоя обработанных материалов. В качестве объектов исследования использованы три типа труднообрабатываемых материалов: титан ВТ-1, жаростойкая сталь 20Х23Н18 и аустенитная коррозионностойкая сталь 10Х17Н13М2Т.*

*Проведённый анализ твёрдости и параметров шероховатости обработанной поверхности показал преимущества высокоскоростной обработки в обеспечении более стабильных характеристик. Результаты эксперимента подтвердили эффективность высокоскоростной обработки. Представленные данные могут быть использованы для оптимизации режимов обработки в машиностроении и других высокотехнологичных отраслях.*

*Таким образом, данное исследование является актуальным и востребованным в условиях развития современных машиностроительных производств, ориентированных на повышение эффективности обработки и качества продукции при работе с труднообрабатываемыми материалами.*

*Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, оптимизация режимов резания, титан, жаропрочная сталь, повехрностный слой, твердость, шероховатость.*

***S. O. Tussupova[1], N. Yu. Kuzminova[2], A. S. Yanushkin[3],***
***Z. R. Issabek[4], A. D. Suleimenov[5]***
[1,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[2]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;
[3]Chuvash State University, Russian Federation, Cheboksary.
Received 01.08.25.
Received in revised form 04.08.25.
Accepted for publication 11.08.25.

# STUDY OF THE EFFECT ON THE SURFACE QUALITIES OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS DURING HIGH-SPEED MILLING

*In the conditions of modern manufacturing industry, there is an active use of difficult-to-machine materials with high strength, heat resistance and corrosion resistance. However, their mechanical processing is accompanied by increased tool wear, decreased productivity and difficulties in ensuring the required surface quality [1, pp. 71–73]. In this regard, modern processing methods, in particular high-speed milling, are of increasing interest.*

*This article provides an overview of current methods of processing hard-to-process materials used in world practice, and identifies the features of processing hard-to-process materials. Experimental studies have been carried out, in which the main attention is paid to the effect of high-speed milling on the properties of the surface layer of processed materials. Three types of difficult-to-process materials were used as objects of research: titanium VT-1, heat-resistant steel 20X23H18 and austenitic corrosion-resistant steel 10X17H13M2T.*

*The analysis of the hardness and roughness parameters of the treated surface showed the advantages of high-speed processing in providing more stable characteristics. The experimental results confirmed the effectiveness of high-speed processing. The presented data can be used to optimize processing modes in mechanical engineering and other high-tech industries.*

*Thus, this research is relevant and in demand in the context of the development of modern machine-building industries focused on improving the processing efficiency and product quality when working with difficult-to-process materials.*

*Keywords: high-speed milling, optimization of cutting modes, titanium, heat-resistant steel, surface layer, hardness, roughness.*

ҒТАМР 55.13.99

https://doi.org/10.48081/PGVW6395

***Э. С. Чукенова[1], Е. З. Нұғман[2], А. Қ. Мустафа[3],***
***Ф. Хошнау[4], И. М. Дюсебаев[5]***

[1,2,3]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4]Де Монфорт университеті, Ұлыбритания, Лестер қ.;
[5]«Алматы Электрқалқан зауыты» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2,3]«RnD Center» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4371-5989
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4537-9440
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4751-7141
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4467-1944
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8514-8300
*e-mail: elvira_85-11@mail.ru

# *БЕЛСЕНДІ ЖӘНЕ ИНЕРТТІ ГАЗДАРДЫҢ WAAM ТЕХНОЛОГИЯСЫ АРҚЫЛЫ ӨНДІРІЛГЕН БОЛАТТЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНА ӘСЕРІ*

*Бұл мақалада сым доғалық аддитивті өндіріс (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) технологиясында қолданылатын белсенді ($CO_2$) және инертті (Ar) қорғаушы газдардың ER70S-6 төменгі көміртекті болат дәнекерлеу сымынан алынған үлгілердің микроқұрлымына әсері жан - жақты зерттелді. Эксперименттік зерттеу барысында бірдей технологиялық параметрлерді оңтайлы қолданылып, тек қорғаушы газ түрі өзгертілді. Алынған үлгілерді алдын ала дайындап, оларға металлографиялық және микроскопиялық әдістермен кешенді талдау жүргізілді. $CO_2$ белсенді қорғаушы газ қолданылған үлгілерден феррит, перлит және цементит фазалары, ал Ar инертті қорғаушы газ қолданылған үлгілерден феррит, перлит, аустенит және мартенситтік құрылымдар анықталды. Сонымен қатар, аргон газы кеуектіліктің азаюына және құрылымының біркелкі болуына оң әсер ететіні көрсетілді. Бұл аргонның аддитивті өндіріс кезінде құйылған үлгінің балқыманың тұрақтылығына, қату процесіне және термиялық әсер ету аймағының сапасына оң әсер ететінін дәлелдеді. Зерттеу нәтижелері WAAM технологиясында қорғаушы газдың микроқұрлымдық қалыптасуға және дайын өнім сапасына әсерін нақты көрсетті. Бұл жұмыс болашақта жоғары сапалы, сенімді және ұзақ қызмет ететін металл конструкцияларын аддитивті әдіспен дайындауда газды дұрыс таңдаудың шешуші рөл татқаратынын көрсетеді.*

*Кілтті сөздер: аддитивті өндіріс, WAAM технология, болат, қорғаушы газ, микроқұрылым, кеуектер.*

**Кіріспе**

Сым доғалық аддитивті өндіріс (Wire Arc Additive Manufacturing – ары қарай WAAM) күрделі геометриялы металл бөлшектерін қабаттап құюға мүмкіндік беретін, дәнекерлеу процесіне негізделген заманауи өндіріс әдісі. Дәстүрлі өндіру тәсілдеріне қарағанда бұл технология өндірістік циклді қысқарту, материал шығынын азайту және ірі габаритті құрлымдарды дайындау мүмкіндігі бойынша көптеген артықшылықтарға ие [1].

WAAM әдісі арқылы өндірілген болат үлгілердің сапасы көбіне доғаның ток күші, кернеу, қорғаушы газ түріне және жүру жылдамдығы сияқты технологиялық параметрлердің оңтайлы таңдалуына байланысты [2]. WAAM процесі бірнеше қабаттардың дәйекті түрде тұндырылуын қамтиды, бұл кезде әрбір параметр, әсіресе қорғаушы газдың түрі мен шығыны, алынатын құрылым сапасына тікелей әсер етеді. Қорғаушы газдың негізгі әсерлерінің бірі – балқытылған металл ваннасында газ кеуектерінің түзілу ықтималдығын азайту немесе арттыру. Мысалы, Arana және авторлар осы қорғаушы газ ағының жылдамдығын кеуекке қалай әсер ететінін зерттеді, газ ағының арттырған сайын кеуектің саны азайтатынын, бірақ қорғаушы газдың ағыны дәнекерлеу өлшемдеріне тікелей әсер етпейтінін айтты [3]. Бұл айтылған факторлар бүкіл құрамдас бөлікте пайда болатын микроқұрылымға айтарлықтай әсер етеді.

Сондықтан, болат материалының WAAM технологиясында қолданылған режимдердің болаттың ішкі құрлымына әсерін зерттеу өндірістің тиімділігі мен өнім сапасын арттыруда маңызды рөл атқарады [4]. Қазіргі таңда WAAM әдісін қолдану бойынша жүргізілген ғылыми зерттеулердің басым бөлігі жекелеген параметрлерге тоқталып, оларды жеке – жеке қарастырады. Әсіресе қорғаныс газының (белсенді немесе инертті) болаттың құрлымына әсері туралы кешенді әрі салыстырмалы зерттеулер аз [5]. Ішкі құрлымның қалыптасуына әсер ететін басты көрсеткіштердің бірі қорғаушы газының рөлін зерттеу – өндіріс процесін оңтайландырудың маңызды бөлігі болып саналады [6].

Көптеген ғылыми еңбектер аргон немесе көмірқышқыл газын стандартты параметр ретінде қабылдап, олардың құрылымдық ерекшеліктерге қалай әсер ететінін нақтыламайды [7].

Осы зерттеуде WAAM технологиясында белсенді ($CO_2$) және инертті (Ar) газдарды қолдану жағдайында болаттың микроқұрлымдық өзгерістерін салыстырмалы түрде зерттелді. Зерттеу барысында алынған үлгілер металлографиялық әдістермен талданып, белсенді немесе инертті газдар қолданылған кездегі дән өлшемі, айқындалған фазалар мен фазалар арасындағы айырмашылықтар анықталады.

**Материалдар мен әдістер**

*Шикізат материалдары*

Материал ретінде номиналды диаметрі 0,8 мм ER70S-6 маркалы болат дәнекерлеу сымы қолданылды. Субстрат ретінде 208×63×12 мм болат (Б3) пластинасын пайдаланылды. ER70S-6 маркалы болат сымының химиялық құрамы 1-кестеде келтірілген.

1-кесте – ER70S-6 сымының химиялық құрамы (%) [8].

| Сымның түпнұсқасы | **C** | **Si** | **Mn** | **Cr** | **Ni** | **Mo** | **Cu** | **V** | **Fe** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ER70S-6 | 0,07 | 0,85 | 1,43 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | Қалған үлесі |

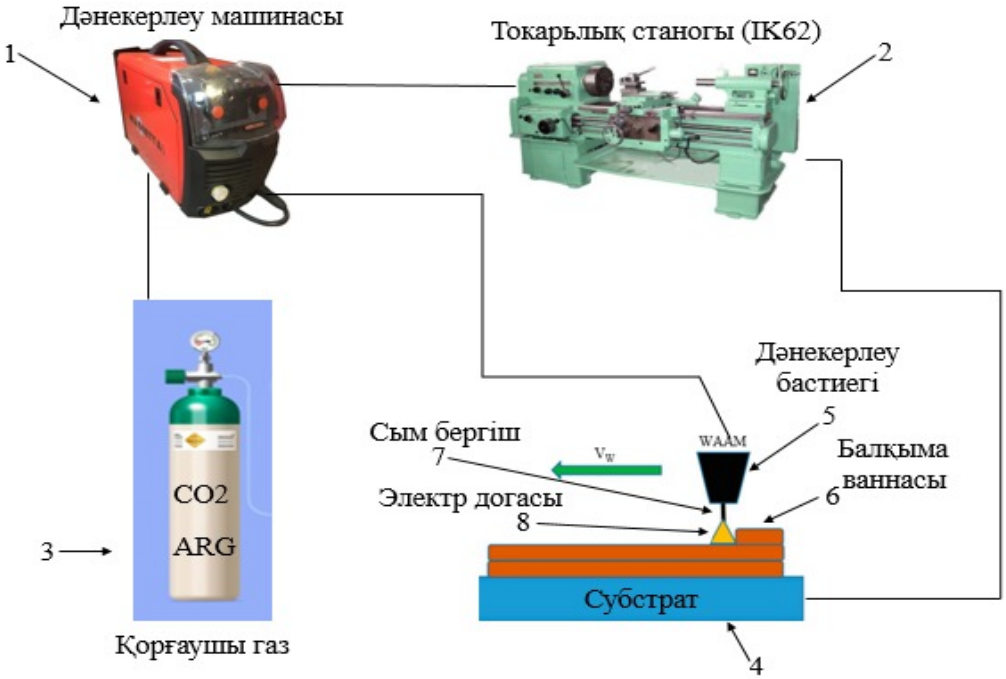
*WAAM үлгілерін дайындау әдісі*

Зерттеу барысында Magnetta 220 S металл инертті/белсенді газбен дәнекерлеу (MIG/MAG) аппараты пайдаланылды. WAAM технологиясы көмегімен үлгілерді дайындау үшін $CO_2$ және Ar қорғаушы газдар үшін бірдей технологиялық параметрлер, атап айтқанда, доға кернеуі, ток, қозғалыс жылдамдығы, сым беру жылдамдығы тағайындалды (2-кесте). Айырмашылғы тек қорғаушы газдарда болды, яғни қорғаушы газдар өзгергенде үлгілердің микроқұрылымы қалай өзгеретіні зерттелді.

2-кесте – WAAM үлгілері үшін қолданылатын технологиялық параметрлер

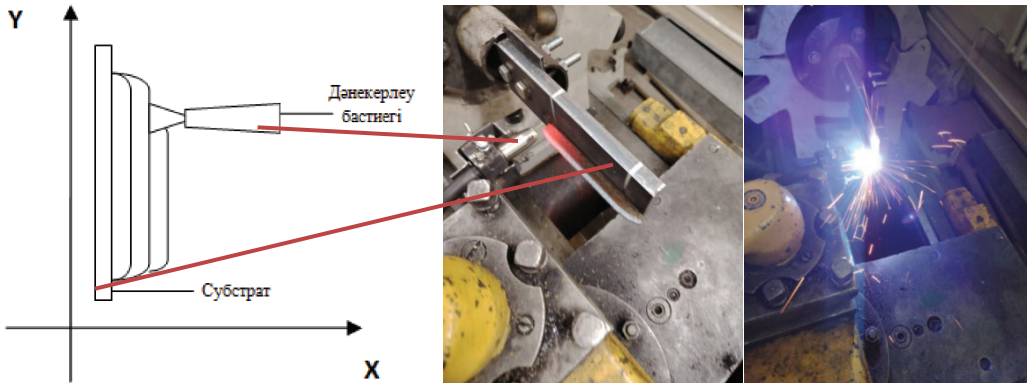
| Басып шығу параметрлері | Мәндер, $CO_2$ газы үшін | Мәндер, Ar газы үшін |
|---|---|---|
| Сымның диаметрі (мм) | 0,8 | 0,8 |
| Жүру жылдамдығы (мм/сек) | 3,5 | 3,5 |
| Сым беру жылдамдығы (м/мин) | 3,0 | 3,0 |
| Дәнекерлеу кернеуі (В) | 14,8 | 14,8 |
| Дәнекерлеу тогы (А) | 53 | 53 |
| Газ шығыны (л/мин) | 18 | 18 |
| Қорғаушы газ | $CO_2$ | Ar |
| Дәнекерлеу режимі | 2T | 2T |
| Тұру уақыты (сек) | 15 | 15 |
| Алынған үлгілердің биіктігі (мм) | 2,4-2,5 | 2,7-2,9 |
| Алынған үлгілердің қалыңдығы (мм) | 0,48-0,50 | 0,48-0,50 |

Үлгілерді дайындау 1-суретте көрсетілген сұлбадағыдай жасалды. Сұлбада дәнекерлеу жүйесінен дәнекерлеу бастиегі арқылы субстратқа көлденең бағытта сымды электр доғасымен балқытып және қорғаушы газдардың көмегімен қорғап қабат-қабат үлгілер құйылды, автоматты қозғалмалы IK62 токарлық станогына субстрат люнет арқылы бекітіліп эксперимент жүргізілді.




1-сурет – WAAM жүйесінің схемалық көрінісі

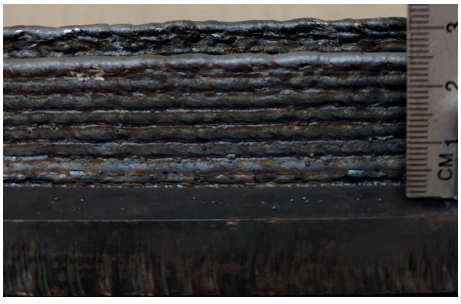
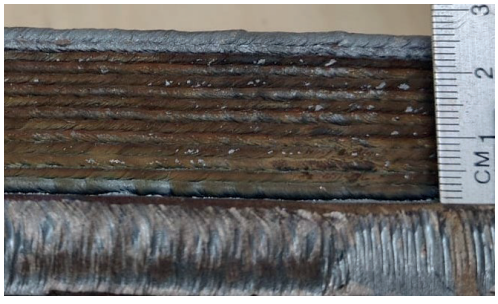
Қорғаушы газ ретінде 100 пайыз таза аргонмен (Ar) және 100 пайыз көмірқышқыл газын ($CO_2$) әр эксперимент үшін жеке – жеке қолданылды. Қорғаушы газдардың шығыны 18 л/мин болып таңдалды, себебі бұл мән қол жетімді библиографиялық анықтамалардың көпшілігінде көрсетілген [9]. Әрбір қорғаныш газдарын пайдалана отырып бес үлгіден жасалды, әрбір үлгі 15 қатардан құю арқылы алынды, әрбір қабатты құю кезінде 15 секунд уақыт күтіп келесі қабат құйылды [10]. Сымды баспалау екі бағытта жүргізілді. Үлгілер көлденең бағытта 90 градустық бұрышпен баспаланды (2-сурет).




2-сурет – Металды қабаттап құю барысы

Алынған әрбір үлгінің биіктігі мен қалыңдығы өлшеніп параметрлер кестесіне енгізілді. Үлгілердің морфологиясы 3–кестеде салыстырып келтірілген.

3-кесте – (a) $CO_2$ және (b) Ar қорғаушы газдарын өзгерте отырып басып шығару үлгілерінің сыртқы көрінісін салыстыру

| № үлгі | $CO_2$ қорғаушы газымен алынған үлгілер | Ar қорғаушы газымен алынған үлгілер |
|---|---|---|
| 1 үлгі | | |
| 2 үлгі | | |
| 3 үлгі | | |
| 4 үлгі |  |  |
| 5 үлгі | | |

*Үлгілерді микроқұрылымдық зерттеуге дайындау*

Басып шығарудан кейін үлгілер субстраттан кесіліп алынып, гриндер құрылғысы арқылы беттері тегістелді. Тегістелген үлгілер Buehler маркалы құрылғыда әртүрлі түйіршіктік өлшемдері бар абразивті қағаздармен (180, 320, 600, 1200 grit) ажарланды (3а-сурет). Абразивті қағаздар материалдың беткі қабатын тиімді түрде алып тастау үшін қолданылды. Кейіннен үлгілер MetaDi™ Supreme маркалы алмаз суспензиялары (1F өm, 3F өm және 9 өm) мен жұмсақ жылтырату дискілерінің көмегімен жылтыратылып, айнадай тегіс күйге жеткізілді. Жылтыратылған үлгілер 5 % тұз қышқылы (HCl) ерітіндісімен 4 минут бойы бетін өңдеу (травление) процесінен өткізілді.

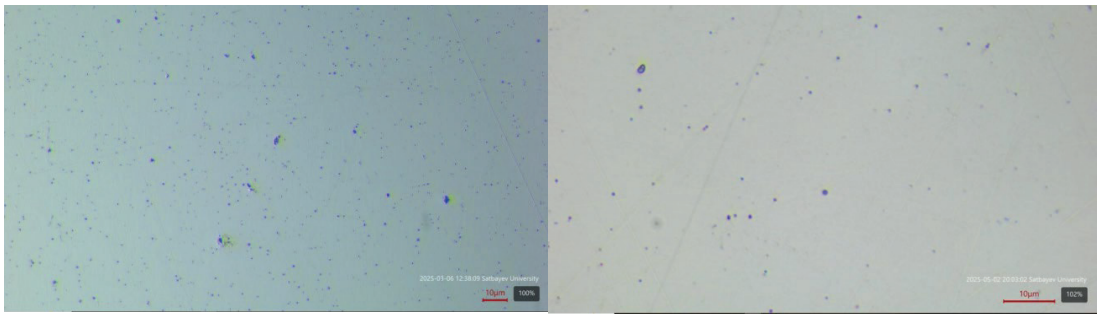
а) б)

3-сурет – а) Buehler маркалы құрылғысымен ажарландыру процессі.
б) Оптикалық микроскоппен микроқұрылымдық талдау жасау процессі

Ажарлау процессінен кейін алынған үлгілерге микроқұрылымдық сипаттама оптикалық микроскопия арқылы орындалды (3б-сурет). Оптикалық микроскоп 50 мкм-ден 1000 мкм-ге дейінгі аралықта үлкейту мүмкіндігі бар. Фазалық құрамды сандық талдау үшін ImageJ бағдарламасы арқылы өңделді. Микроструктуралық талдау нәтижесінде феррит, перлит, цементит, аустенит және мартенсит фазаларының салыстырмалы аудандары пайыздық үлеспен анықталды.

**Нәтижелер және талқылау**

Кеуектілік барлық бөлікте кездейсоқ алынған микроструктуралық талдау нәтижесі суреттерінен анықталды. Кеуектілік аймағының пайызын және ең үлкен кеуек өлшемін азайтудың ең жақсы шарттары Ar қорғаныс газын пайдаланғанда кеуектілік төмен болды (4а,б-сурет).

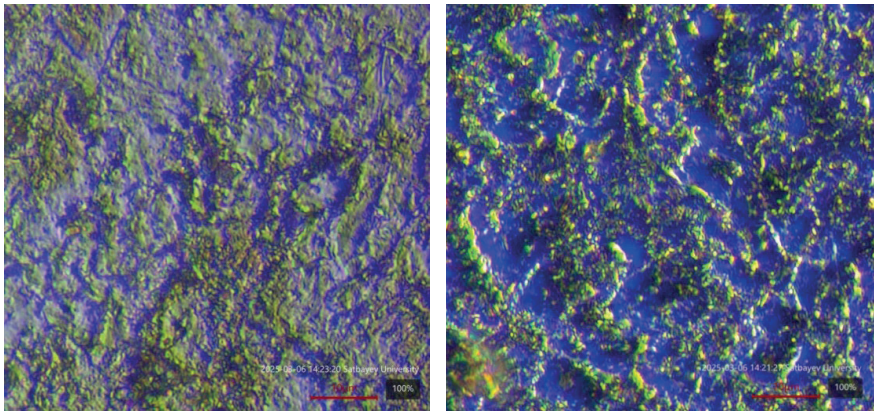


а) б)

4-сурет – Кеуектілік аймағын салыстыру (үлкейту мөлшері 100х)
а) $CO_2$ қорғаушы газымен алынған үлгінің микроструктурасы,
б) Ar қорғаушы газымен алынған үлгінің микроструктурасы.

Микроскопиялық зерттеу нәтижесінде CO2 қорғаушы газымен алынған үлгілерден феррит, перлит және аз мөлшерде цементит фазалары анықталды (5а-сурет). Феррит (α) – ашық түсті, жұмсақ фаза. Перлит (α+$Fe_3C$) – көк-күлгін аймақтарда көрінеді және аустинит қалдықтары күлгін аймақтарда шоғырланды. Цементит ($Fe_3C$) – қара түсті, қатты компонент ретінде анықталды.

Ar қорғаушы газымен алынған үлгілерде феррит, перлит және аз мөлшерде аустенит және мартенситтік трансформация байқалады (5б-сурет). Феррит (α) көгілдір күлгін түсті, құрылымда ең көп таралған фаза. Перлит (α+$Fe_3C$) – жасыл сары және қою түсті аймақтарда, көбіне салқындау кезінде пайда болатын фаза. Аустенит және мартенсит – жарық шағылыстары жоғары бөліктер. Аргон газы инертті болғандықтан оттегімен реакция жүрмейді де, беткі оксидтену аз. Бұл құрылым WAAM технологиясы кезінде материалдың термиялық цикліне сәйкес қалыптасқан.

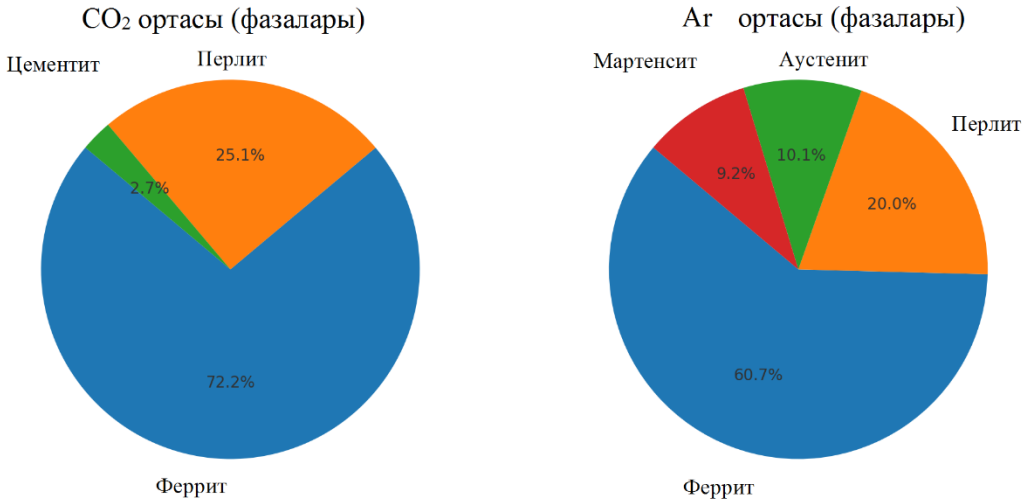


а) $CO_2$ қорғаушы газымен б) Ar қорғаушы газымен

5-сурет – Қорғаушы газдармен алынған үлгілердің
фазалық ажырату нәтижесі

Fe-C фазалық диаграммасына сәйкес, ER70S-6 болаты 727°C-та эвтектоидтық фазалық түрленуді бастан кешіреді. WAAM процесі кезінде сым аустенит фазасына өтеді де, салқындату барысында феррит перлит құрылымына айналады [11]. Жоғары жылдамдықты салқындату жағдайында мартенситтің пайда болуы мүмкін, алайда бұл зерттеуде негізінен ферритті-перлитті құрылым басым болды.

MIG/MAG әдісі арқылы баспаланғаннан кейін алынған үлгілер микроскоп арқылы зерттелгенде, феррит дәндері мен олардың арасындағы перлит арақашықтары анық көрінеді. Бұл құрылымдар материалдың беріктігі мен тұтқырлығын қамтамасыз етеді. Аустенит фазасының қалдықтары сирек кездеседі және негізінен жылдам салқындау жағдайында ғана байқалуы мүмкін. Цементит пен ферриттің эвтектоидтық комбинациясы ретінде қалыптасуы мүмкін, алайда бұл үлгіде перлит пен цементит көлемі аз, себебі жылдам салқындау мен $CO_2$ ортасының тотығу қабілеті перлиттің толық дамуына кедергі келтіреді (6-сурет). Аргонның инертті табиғаты ферриттің біркелкі түзілуіне ықпал еткен. Кейбір ірі, шет жақтары ашық түсті, ортасы қою қара дақтар оксидтік қосылыстар болуы мүмкін. Бұл аргонмен баспалау кезінде де беткі тотығу процесінің толық болмауын білдіреді, дегенмен $CO_2$-мен салыстырғанда олар әлдеқайда аз.




6-сурет – $CO_2$ және Ar қорғаушы газ орталарында алынған үлгілердің фазалық құрамының сандық үлестірімі

Бұл мәліметтер Ar газында алынған үлгілерде аустенит пен мартенситтің қосымша түзілуі байқалатының және құрылымының күрделірек екенін 4-кестеде көрсетті.

4-кесте – Фазалық құрамды сандық талдау.

| Газ ортасы | Феррит (%) | Перлит (%) | Цементит (%) | Аустенит (%) | Мартенсит (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| $CO_2$ | 72,2 | 25,1 | 2,7 | - | - |
| Ar | 60,7 | 20,0 | - | 10,1 | 9,2 |

Көрсетілген сандық мәліметтерде қорғаушы газдың түріне байланысты фазалық құрамның өзгеретінін айқын көрсетеді, аргон газы кеуектілікті төмендетіп, қосымша аустенит пен мартенсит түзілуіне ықпал етеді.

Қорытындылай келе, WAAM әдістері, материал құрамы, процесс параметрлері, қорғайтын газ құрамы, кейінгі термиялық өңдеулер және микроқұрылымы мен ақаулары WAAM болаттарының механикалық қасиеттерін жақсырақ бақылау үшін жоғарыда аталған факторлар арасындағы корреляцияны әрі қарай түсіну және оларды нақты бақылау, келесі жұмыстарда тереңірек зерттеледі.

**Қаржыландыру туралы ақпарат**

Ғылыми мақала №AP19679253 «Көпфункционалды мобильді металл 3д принтерді зерттеу және жобалау» ғылыми жобасы аясында жарияланды (зерттеуді Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады).

**Қорытынды**

Бұл зерттеу барысында WAAM технологиясын пайдалану арқылы ER70S-6 төмен көміртекті болат үлгілернің микроқұрлымдық қасиеттері белсенді ($CO_2$) және инертті (Ar) қорғаушы газдар қолданылған жағдайда салыстырмалы түрде зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қорғаушы газдың түрі дайындаған материал құрлымына айтарлықтай әсер етеді.

$CO_2$ қолданылған үлгілерде феррит, перлит және цементит фазалары айқындалса, Ar қолданылған үлгілерде феррит, перлит, аустенит және мартенситтік құрылымдар анықталды. Сонымен қатар, аргон газы алынған үлгілерде құрылымының біркелкілігі жоғары болып, кеуектілік деңгейі төмен болды. Бұл өз кезегінде материалдың беріктігі мен тұтқырлығын арттыруға ықпал етеді, болашақта механикалық қасиеттерге сынақ жүргізу жоспарлануда. Авторлар аддитивті өндірісте құрылым қасиет арақатынасының маңыздылығын мойындайды және болашақ зерттеулерде аталған сынақтарды жүргізу жоспарлануда. Үлгілердің морфологиялық ерекшеліктері, салқындату жылдамдығы және қабат аралық уақыттың әсері де егжей-тегжейлі сипатталды.

Қорыта келгенде, алынған нәтижелер WAAM технологиясындағы қорғаушы газ түрі баспаланатын өнім сапасына тікелей ықпал ететінін айғақтады. Бұл зерттеу нәтижелерін дәнекерлеу параметрлерін оңтайландыру, құрылымның біртектілігін қамтамасыз ету үшін пайдалануға болады.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Raspall, F., Araya, S., Pazols, M., Valenzuela, E., Castillo, M., Benavides, P.** Wire Arc Additive Manufacturing for Widespread Architectural Application: A Review Informed by Large-Scale Prototypes //Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 6. – P. 906. – https://doi.org/10.3390/buildings15060906.

2 **Scheck, M., Richter, A., Beitler, S., Gehling, T., Treutler, K., Wesling, Wesling, V., Christian, R., Bohn, C.** High geometric fidelity through closed-loop control of the weld pool size in gas metal arc welding based direct energy deposition //Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 80. – P. 103944. – https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103944.

3 **Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Iturrioz, A., & Alvarez, P.** Strategies to reduce porosity in Al-Mg WAAM parts and their impact on mechanical properties // Metals. – 2021. – Vol. 11. – № 3. – P. 524. – https://doi.org/10.3390/met11030524.

4 **Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., Dewidar, M.** Challenges and Developments in Wire Arc Additive Manufacturing of Steel: A Review // Results in Engineering. – 2025. – P. 104657. – https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104657.

5 **Teixeira, F. R., Jorge, V. L., Scotti, F. M., Siewert, E., & Scotti, A.** Methodology for Shielding-Gas Selection in Wire Arc Additive Manufacturing with Stainless Steel // Materials. – 2024. – Vol. 17. – №. 13. – P. 3328. – https://doi.org/10.3390/ma17133328.

6 **Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., Nasiri, A.** Effect of solidification defects and HAZ softening on the anisotropic mechanical properties of a wire arc additive-manufactured low-carbon low-alloy steel part // Jom. – 2019. – Vol. 71. – P. 4215-4224. – https://doi.org/10.1007/s11837-019-03773-5.

7 **Zhai, W., Aishwarya, Shandro, R., Zhou, W.** Microstructure and mechanical properties of the wire arc additively manufactured 316L/ER70S-6 bimetal structure // Virtual and Physical Prototyping. – 2024. – Vol. 19. – № 1. – P. e2375105. – https://orcid.org/0000-0002-8769-1152.

8 **Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Britton, T. B., Gardner, L.** Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels // Materials & Design. – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544.

9 **Ron, T., Levy, G. K., Dolev, O., Leon, A., Shirizly, A., Aghion, E.** The effect of microstructural imperfections on corrosion fatigue of additively manufactured ER70S-6 alloy produced by wire arc deposition //Metals. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – P. 98. – https://doi.org/10.3390/met10010098.

10 **Vander Voort, G. F.** Metallographic Methods, Generally Applicable to All Metals. In: Metals Handbook, 2nd Edition, ASM International Handbook Committee, 1998. – P. 1356–1371. – https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.a0003244.

11 **Zou, X., Niu, B., Pan, L., Yi, J.** Wire+ arc additive manufacturing and heat treatment of super martensitic stainless steel with a refined microstructure and excellent mechanical properties // Materials. – 2022. – Vol. 15. – №. 7. – P. 2624. – https://doi.org/10.3390/ma15072624.

REFERENCES

1 **Raspall, F., Araya, S., Pazols, M., Valenzuela, E., Castillo, M., Benavides, P.** Wire Arc Additive Manufacturing for Widespread Architectural Application: A Review Informed by Large-Scale Prototypes // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 6. – P. 906. – https://doi.org/10.3390/buildings15060906.

2 **Scheck, M., Richter, A., Beitler, S., Gehling, T., Treutler, K., Wesling, Wesling, V., Christian, R., Bohn, C.** High geometric fidelity through closed-loop control of the weld pool size in gas metal arc welding based direct energy deposition // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 80. – P. 103944. – https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103944.

3 **Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Iturrioz, A., & Alvarez, P.** Strategies to reduce porosity in Al-Mg WAAM parts and their impact on mechanical properties // Metals. – 2021. – Vol. 11. – № 3. – P. 524. – https://doi.org/10.3390/met11030524.

4 **Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., Dewidar, M.** Challenges and Developments in Wire Arc Additive Manufacturing of Steel: A Review // Results in Engineering. – 2025. – P. 104657. – https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104657.

5 T**eixeira, F. R., Jorge, V. L., Scotti, F. M., Siewert, E., & Scotti, A.** Methodology for Shielding-Gas Selection in Wire Arc Additive Manufacturing with Stainless Steel // Materials. – 2024. – Vol. 17. – № 13. – P. 3328. – https://doi.org/10.3390/ma17133328.

6 **Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., Nasiri, A.** Effect of solidification defects and HAZ softening on the anisotropic mechanical properties of a wire arc additive-manufactured low-carbon low-alloy steel part // Jom. – 2019. – Vol. 71. – P. 4215-4224. – https://doi.org/10.1007/s11837-019-03773-5.

7 **Zhai, W., Aishwarya, Shandro, R., Zhou, W.** Microstructure and mechanical properties of the wire arc additively manufactured 316L/ER70S-6 bimetal structure // Virtual and Physical Prototyping. – 2024. – Vol. 19. – № 1. – P. e2375105. – https://orcid.org/0000-0002-8769-1152.

8 **Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Britton, T. B., Gardner, L.** Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels // Materials & Design. – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544.

9 **Ron, T., Levy, G. K., Dolev, O., Leon, A., Shirizly, A., Aghion, E.** The effect of microstructural imperfections on corrosion fatigue of additively manufactured ER70S-6 alloy produced by wire arc deposition //Metals. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – P. 98. – https://doi.org/10.3390/met10010098.

10 **Vander Voort, G. F.** Metallographic Methods, Generally Applicable to All Metals. In: Metals Handbook, 2nd Edition, ASM International Handbook Committee, 1998. – P. 1356–1371. – https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.a0003244.

11 **Zou, X., Niu, B., Pan, L., Yi, J.** Wire+ arc additive manufacturing and heat treatment of super martensitic stainless steel with a refined microstructure and excellent mechanical properties // materials. – 2022. – Vol. 15. – № 7. – P. 2624. – https://doi.org/10.3390/ma15072624.

01.06.25 ж. баспаға түсті.
15.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
26.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Э. С. Чукенова[1], Е. З. Нугман[2], А. К. Мустафа[3], Ф. Хошнау[4], И. М. Дюсебаев[5]***
[1,2,3]Университет имени Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]Университет Де Монфорта, Великобритания, г. Лестер;
[5]ТОО «Алматинский завод Электрощит», Республика Казахстан, г. Алматы;
[2,3]ТОО «RnD Center», Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 01.06.25.
Поступило с исправлениями 15.07.25.
Принято в печать 26.08.25.

## ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ И ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ WAAM

*В данной статье всесторонне исследовано влияние активного ($CO_2$) и инертного (Ar) защитных газов, используемых в технологии проволочной дуговой аддитивной наплавки (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), на микроструктуру образцов, полученных из сварочной проволоки ER70S-6 низкоуглеродистой стали. В ходе экспериментального исследования были оптимально применены одинаковые технологические параметры, изменялся только тип защитного газа. Полученные образцы были предварительно подготовлены и подвергнуты комплексному металлографическому и микроскопическому анализу. В образцах, изготовленных с применением активного защитного газа $CO_2$, были выявлены ферритные, перлитные и цементитные фазы, тогда как в образцах с применением инертного газа Ar дополнительно обнаружены аустенитные и мартенситные структуры. Кроме того, было показано, что аргон способствует снижению пористости и улучшению однородности структуры. Это доказывает положительное влияние аргона на устойчивость расплава, процесс кристаллизации и качество зоны термического воздействия во время аддитивного производства. Результаты исследования наглядно продемонстрировали, что выбор защитного газа оказывает прямое влияние на формирование микроструктуры и качество готового изделия в технологии WAAM. Данная работа подчеркивает решающую роль правильного выбора газа в производстве высококачественных, надежных и долговечных металлических конструкций методом аддитивного производства.*

*Ключевые слова: аддитивное производство, технология WAAM, сталь, защитный газ, микроструктура, поры.*

***E. S. Chukenova[1], Y. Z. Nugman[2], A. K. Mustafa[3],***
***F. Khoshnaw[4], I. M. Dyussebayev[5]***
[1,2,3]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]De Montfort University, United Kingdom, Leicester;
[5]LLP «Almaty Electroschit Plant», Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2,3]LLP «RnD Center», Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 01.06.25.
Received in revised form 15.07.25.
Accepted for publication 26.08.25.

# EFFECT OF ACTIVE AND INERT GASES ON THE MICROSTRUCTURE OF STEEL PRODUCED BY WAAM TECHNOLOGY

*This article presents a comprehensive study on the effect of active ($CO_2$) and inert (Ar) shielding gases used in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technology on the microstructure of samples produced from ER70S-6 low-carbon steel welding wire. During the experimental investigation, identical technological parameters were optimally applied, with only the type of shielding gas being varied. The prepared samples underwent thorough metallographic and microscopic analysis. In the specimens produced using the active shielding gas $CO_2$, ferrite, pearlite, and cementite phases were identified. In contrast, the specimens produced under argon (Ar) revealed additional austenitic and martensitic structures alongside ferrite and pearlite. Furthermore, the use of argon was shown to significantly reduce porosity and contribute to a more uniform microstructure. This indicates the positive effect of argon on melt stability, solidification behavior, and the quality of the heat-affected zone during the additive manufacturing process. The research results clearly demonstrate that the choice of shielding gas has a direct impact on microstructural formation and the quality of the final product in WAAM technology. This study highlights the critical importance of selecting the appropriate shielding gas in the additive manufacturing of high-quality, reliable, and durable metal structures.*

*Keywords: Additive Manufacturing, WAAM technology, steel, shielding gas, microstructure, porosity.*

ҒТАМР 55.24.99

https://doi.org/10.48081/VFQK8410

***К. Т. Шеров[1], Д. И. Бердімұратова[2], А. А. Сагитов[3], М. М. Мусаев[4], А. Турусбекова[5]***

[1,2,3]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

[4,5]А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9612-8487

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8007-1690

*e-mail: shkt1965@mail.ru

# *3D-ПРИНТЕРДЕ FDM ӘДІСІМЕН ЖАСАЛҒАН ГИДРАВЛИКАЛЫҚ МАШИНАНЫҢ «БІЛІК-ТІСТЕГЕРІШ» БӨЛІГІНІҢ БЕРІКТІГІН ЗЕРТТЕУ*

*Бұл мақалада гидравликалық машиналардың бөлшектерін, атап айтқанда тістегеріш сорғыларын (ТС) өндіруде аддитивті технология әдістерін қолдану мүмкіндігі зерттелген. Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешені субъектілерінің жөндеу өндірістерін талдау нәтижесінде (ҚР АӨК), ТС бөлшектерін жөндеуге және қалпына келтіруге жиі түсетіні анықталды. ТС істен шығуының негізгі себептері сорғы жұмыс істеп тұрған кезде тісті тістегеріштің жанасуын ашу, сапасыз құрастыру, втулка бөлшектерінің, подпятниктердің, тісті тістегеріштің тозуы және т. б. болып табылады.*

*Сондай-ақ, жөндеу-қалпына келтіру жұмыстарын орындау кезінде қажетті технологиялық жабдықтың, технологиялық жабдықтың және құралдың болмауына байланысты ҚР АӨК қызмет көрсететін субъектілерінің жөндеу өндірістері жағдайында үлкен проблема бар екені анықталды.*

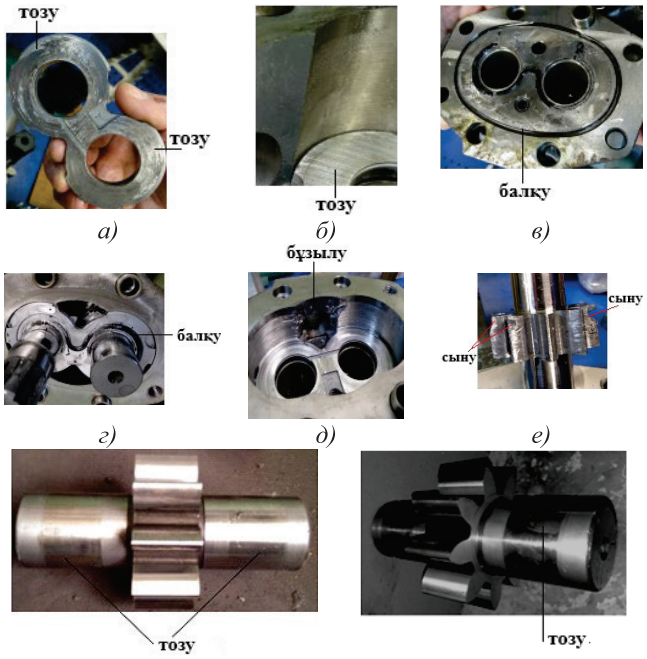
*Бұл мәселені шешу үшін ТС бөлшектерін, сондай-ақ ауыл шаруашылығы машиналары мен техникасының бөлшектерін жөндеу және дайындау кезінде аддитивті технология әдістерін қолдану ұсынылды. RAISE3D Pro Plus 3D принтерінде FDM әдісімен «білік-тістегеріш» ТС бөлшегі басып шығарылды және SolidWorks бағдарламасында оның беріктігін есептеу орындалды. Беріліс білігі жұмыс жүктемесіне төтеп беретіні анықталды. Максималды кернеу 18,45 МПа-ға жетеді, ол 3D басып шығаруда қолданылатын пластмассалар үшін рұқсат етілген шектерде. Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті AP23489364 қаржыландырған «Модельдеу және эксперименттік зерттеу жолымен процесті оңтайландыра отырып, ауыл шаруашылығы машиналарын жөндеу кезінде аддитивті технологияларды пайдалану» гранттық тақырыбы аясында орындалды.*

*Кілтті сөздер: Тістегеріш сорғы, тозу, жөндеу, қалпына келтіру, аддитивті технология, 3D басып шығару, пластик, беріктік.*

**Кіріспе**

Гидравликалық машиналар – олар арқылы ағып жатқан сұйықтықты механикалық энергиямен (сорғымен) байланыстыратын немесе сұйықтықтан энергияның бір бөлігін алатын және оны пайдалы пайдалану үшін жұмыс органына беретін машиналар (гидравликалық қозғалтқыш) [1; 2]. Сорғылар барлық дерлік салаларда қолданылатын гидравликалық машиналардың ең көп таралған түрлерінің бірі болып табылады, атап айтқанда машина жасау, құрылыс, тау-кен, мұнай-газ, ауыл шаруашылығы және т.б. ҚР АӨК қызмет көрсететін субъектілерінің машина жасау және механикалық өндірістері жағдайында жүргізілген зерттеулер ауыл шаруашылығы машина жасауда кеңінен қолданылатын бұйымдардың бірі гидравликалық машиналар, атап айтқанда ТС болып табылатынын көрсетті. Сондай-ақ, ТС бөлігін жөндеуге және қалпына келтіруге жиі келетіні анықталды. ТС істен шығуының негізгі себептері сорғы жұмыс істеп тұрған кезде тісті тістегеріштің жанасуын ашу, сапасыз құрастыру, втулка бөлшектерінің, подпятниктердің, тісті тістегеріштің тозуы және т. б. болып табылады.

1 суретте тозған және зақымдалған ТС бөлшектері көрсетілген [3].




а – тірек пластиналарына тән тозу; б – жұмыс камераларының қабырғаларында тозу; в,г – тығыздағыштардың балқуы;
д – айдау камерасының қабырғаларының зақымдануы;
е – тістердің зақымдануы; ж,з – беріліс дөңгелегінің тозуы
1-сурет – Тозған және зақымдалған ТС бөлшектері

Тісті сорғылар гидравликалық майдың ластануына осьтік поршеньдер сияқты әсер етпейтіні белгілі, сондықтан оны күту оңайырақ. Дегенмен, олар жұмыс

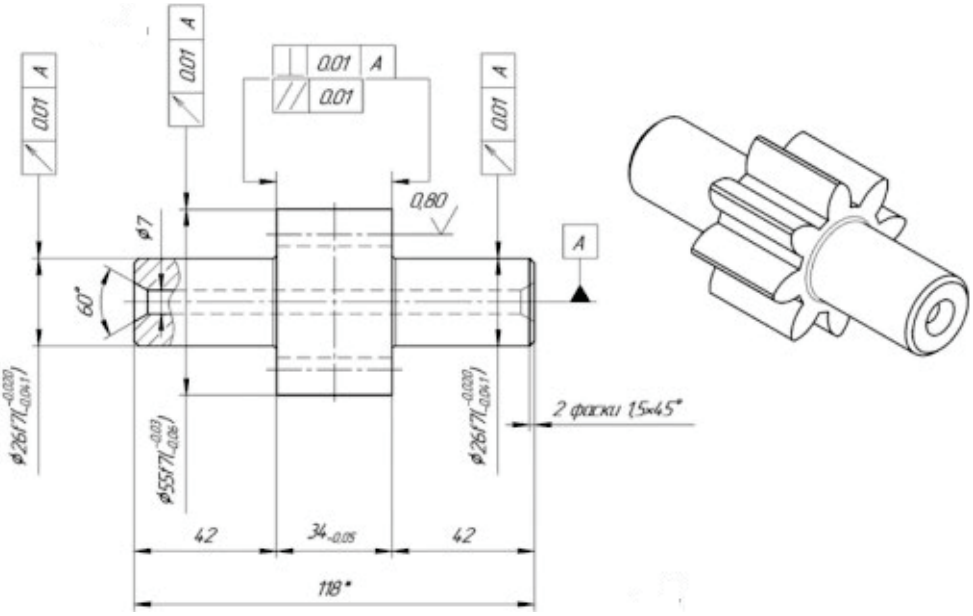
камераларына үшінші тарап қосындыларының түсуінен немесе компоненттер арасындағы үйкелістің жоғарылауынан туындайтын тозуға сезімтал. Осы жерден құрылғының осы түрінің бірінші және ең көп таралған бұзылуы – жұмыс камерасының бөлшектерінің беттеріндегі тозу. «Тістегеріш тістерімен жұмысшы камераларының қабырғалары» арасында, сондай-ақ «тістердің бүйір беттерімен тірек пластиналарының» арасында үйкеліс кезінде тозу пайда болған кезде, бұл саңылаулардың ұлғаюына әкеледі. Осының нәтижесінде айдау камерасынан сору камерасына қайта ағып кету артады, бұл құрылғының көлемдік тиімділік коэффициентін айтарлықтай төмендетеді [3].

Тозу нәтижесінде сорғы өзінің жұмысын сақтай алады, бірақ ағын жылдамдығы мен қысымы төмендейді. Сондай-ақ, жөндеу-қалпына келтіру жұмыстарын орындау кезінде қажетті технологиялық жабдықтың, технологиялық жабдықтың және құралдың болмауына байланысты ҚР АӨК қызмет көрсететін субъектілерінің машина жасау және механикалық өндірістері жағдайында үлкен проблема бар [4]. Бұл проблема соңғы онжылдықтарда пайда болған қосымша өндіріс технологияларын (Additive manufacturing – AM) шешуге көмектеседі, олар тек технологиялық ғана емес, сонымен қатар машиналарды жөндеуде ұйымдастырушылық рөл атқара алады. Аддитивті технологияларды енгізу арқылы сорғы дизайнын жаңарту қажеттілігі артады, өйткені бұл технологиялар құрылымдық икемділікті арттыру арқылы құрылғылардың функционалдығын айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік береді. Қосымша өндіріс әдістері күрделі пішінді бөлшектерді жасау үшін икемді болғандықтан, олар сорғы бөлшектерінің дизайнындағы геометриялық және инженерлік өзгерістерге жол ашады. Осы технологияларды қолдана отырып, сорғы бөлшектерінің дизайнын оңтайландыру құрылғының жалпы өнімділігін арттыруға және оның тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді [5]. Талдау нәтижесінде [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14] аддитивті технологияның теориялық негіздері жоғары экономикалық тиімділікпен күрделі және дәл бөлшектерді жасауға мүмкіндік беретіндігі анықталды. Негізгі әдістер (FDM, SLS, SLES) және қолданылатын материалдар қарастырылады, бұл кейінгі эксперименттер мен беріктік есептеулерінің негізін қалады. Машина жасауда функционалды прототиптер жасау үшін FDM технологиясының артықшылықтары анықталды. Алынған теориялық білім сорғы жабдықтарының бөлшектерін жасау мен жөндеуде аддитивті әдістерді қолданудың өзектілігін растады. Бұл зерттеудің практикалық бөлігі үшін берік негіз құрды.

Осыған байланысты ауылшаруашылық техникасының гидравликалық машиналарының бөлшектерін жасауға бағытталған ғылыми зерттеулер өзекті болып табылады.

**Материалдар мен әдістер**

2-суретте ТС50 білік-тістегеріш бөлігінің эскизі көрсетілген.



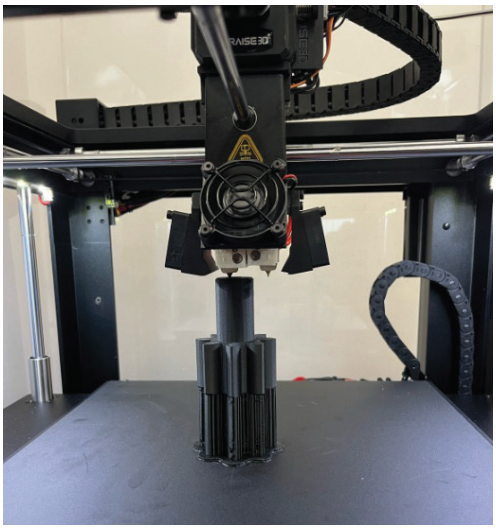

2-сурет – ТС50 «білік-тістегеріш» бөлшегінің эскизі

Білік-тістегерішті 3D басып шығару үшін CAD бағдарламасында модельденді және RAISE3D Pro Plus 3D принтеріне арналған IdeaMaker бағдарламасына импортталды (3-сурет).

3-сурет – 3D-принтер Raise3D Pro Plus

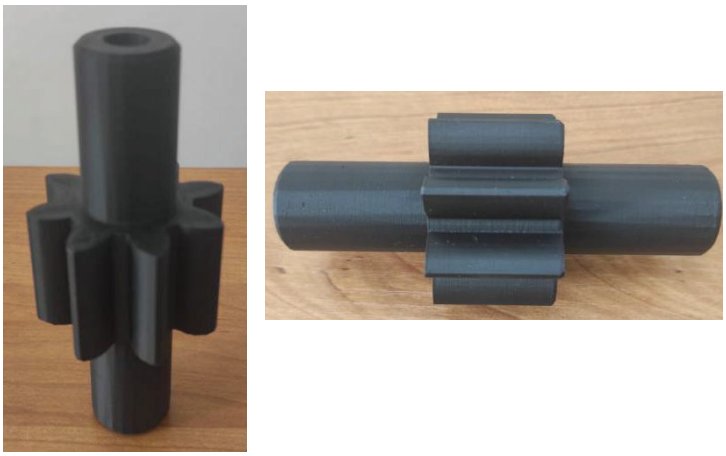
IdeaMaker бағдарламасына импортталған модель raise 3D Pro Plus 3D басып шығарылды (4-сурет). Raise 3D Pro Plus принтері FDM әдісімен жұмыс істейді. FDM (Fused Deposition Modeling) – термопластикалық материалды (мысалы, PLA, ABS, PETG) қыздырып, саптама арқылы экструдтайтын, содан кейін дайын

модельді қалыптастыру үшін қабаттастыратын қабатты 3D басып шығару әдісі болып табылады.



4-сурет – Raise 3D Pro Plus принтерінде 3D басып шығару процесі

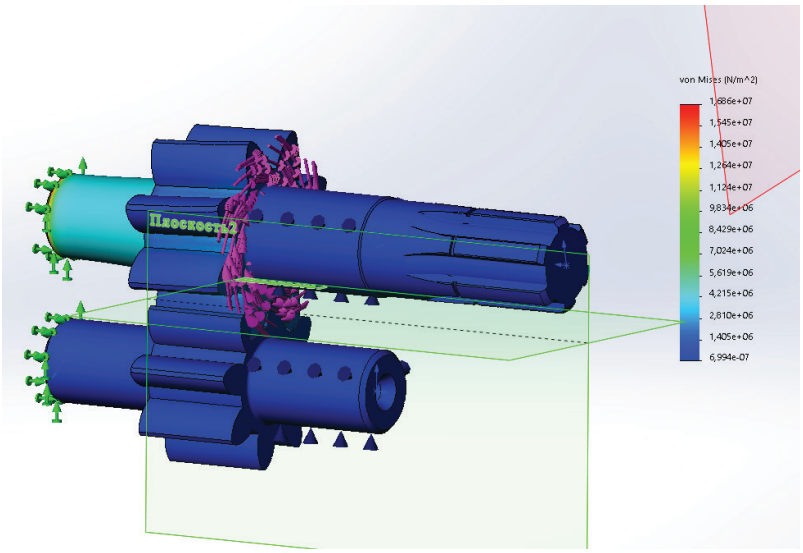
5-суретте басылған білік-тістегеріш бөлшегі көрсетілген.



5-сурет – Басылған білік-тістегеріш бөлшегі

**Нәтижелер және талқылау**

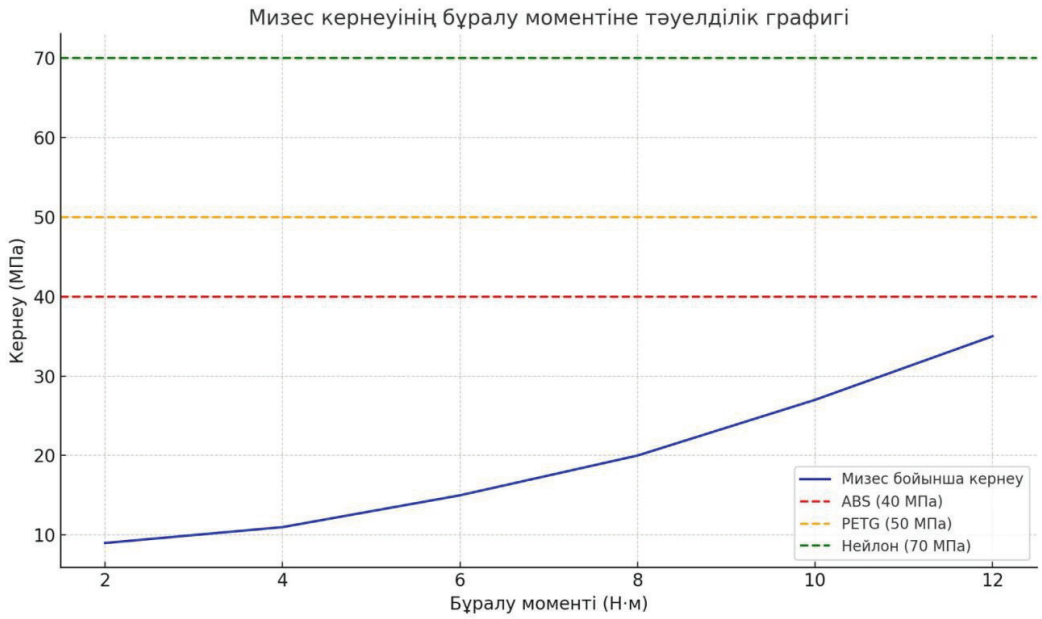
FDM әдісімен жасалған білік-тістегеріш беріктігін есептеу үшін ТС-50 жұмыс процесін модельдеуді орындаймыз. 6-суретте беріктікті есептеу үшін екі беріліс білігінің жұмысын модельдеу көрсетілген.




6-сурет – Беріктікті есептеу үшін екі беріліс білігінің жұмысын модельдеу

Білік пен тістегеріш әр жағдайда пластиктен 3D басып шығару әдісімен (мысалы, ABS) жасалатын бір бөлшек ретінде жасалады. ABS материалы PLA пластигіне балама ретінде таңдалды. Есептеудің мақсаты құрылымның жұмыс моментіне төтеп бере алатынын анықтау болды. Біліктердің бірі корпуста екі жағынан бекітілген (суреттегі жасыл көрсеткілер) – бұл мойынтіректердегі тірекке бекітіледі. Басқа білікке 7,96 Н·м айналу моменті беріледі бұл жұмыс кезінде нақты жүктемені имитациялайды. 7,96 Н · м айналу моменті 3000 айн/мин айналу жылдамдығымен 2500 Вт (немесе 2,5 кВт) қуатқа сәйкес келеді. Бұл берілген айналу моменті 2,5 кВт қуат негізінде есептелгенін дәлелдейді. Жүктеменің нақты әсерін көрсету үшін біз, осындай механизмдер үшін стандартты қуат деңгейіне сәйкес келетін 2,5 кВт қуатты таңдадық. Білік пен тістегеріш бір бөлшек ретінде модельденеді, өйткені олар бірге басылады. Тісті доңғалақтар арасындағы жұптасу тістер арасындағы нақты жанасуды ескере отырып орнатылады.

7-суретте Мизес критерийі бойынша кернеулердің графигі көрсетілген.




7-сурет – Мизес критерийі бойынша кернеуге тәуелділік кестесі

7-суретте Мизес критерийі бойынша кернеудің таралуы көрсетілген – бұл көрсеткіш пластикалық және металл бөлшектердің беріктігін бағалау үшін қолданылады. Модельдегі максималды кернеу – 18,45 МПа (тістегеріште қызыл аймақпен белгіленген, 6-суретті қараңыз).

Бұл кернеулер 3D басып шығаруда қолданылатын пластмассалар үшін рұқсат етілген шектерде. Мысалы (7-суретті қараңыз) ABS бір үзіліске шамамен 40 МПа, PETG шамамен 50 МПа, Нейлон 70 Мпа дейін шыдайды. Осылайша, алынған кернеу мәндері стандартты берік пластмассадан басып шығару кезінде құрылымының қауіпсіз және сенімді екенін көрсетеді. Жинақта корпус, манжеттер және қақпақтар да бар. Алайда, олар есептеудің өзіне кірмеді, өйткені олар моменттің берілуіне қатыспайды және айтарлықтай механикалық жүктемелерге ұшырамайды.

Бұл элементтерді есептеуден шығару маңызды түйіндерге назар аударуға және нәтижелердің дәлдігін жоғалтпай модельдеу уақытын қысқартуға мүмкіндік берді.

**Қаржыландыру туралы мәлімет**

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті AP23489364 қаржыландырған «Модельдеу және эксперименттік зерттеу жолымен процесті оңтайландыра отырып, ауыл шаруашылығы машиналарын жөндеу кезінде аддитивті технологияларды пайдалану» гранттық тақырыбы аясында орындалды.

**Қорытындылар**

ҚР АӨК қызмет көрсететін субъектілерінің машина жасау және механикалық өндірістері жағдайында жүргізілген зерттеулердің нәтижелері ауыл шаруашылығы машина жасау саласында кеңінен қолданылатын бұйымдардың бірі ТС болып табылатынын көрсетті. ТС істен шығуының негізгі себептері сорғы жұмыс істеп

тұрған кезде тісті тістегеріштердің жанасуының ашылып кетуі, сапасыз құрастыру, төлке бөлшектерінің, подпятниктердің, тісті тістегеріштің тозуы және т. б. болып табылады. Сондай-ақ, жөндеу-қалпына келтіру жұмыстарын орындау кезінде қажетті технологиялық жабдықтың, технологиялық және құралдық әбзелдердің болмауына байланысты болған ҚР АӨК субъектілеріне қызмет көрсететін машина жасау және механикалық өндірістері жағдайында үлкен проблема анықталды. Бұл мәселені шешу үшін ТС бөлшектерін, сондай-ақ ауыл шаруашылығы машиналары мен техникасының бөлшектерін жөндеу және дайындау кезінде аддитивті технология әдістерін қолдану ұсынылады. RAISE 3D Pro Plus 3D принтерінде FDM әдісімен ТС «білік-тістегеріш» бөлшегі басып шығарылды және SolidWorks бағдарламасында оның беріктігін есептеу орындалды. Беріліс тістегеріші жұмыс жүктемесіне төтеп беретіні анықталды. Максималды кернеу 18,45 МПа-ға жетеді, ол 3D басып шығаруда қолданылатын пластмассалар үшін рұқсат етілген шектерде. Осылайша, алынған кернеу мәндері стандартты берік пластмассадан басып шығару кезінде құрылымның қауіпсіз және сенімді екенін көрсетеді. Әрі қарайғы зерттеулерде басып шығарылған «білік-тістегеріш» бөлшегін ТС жұмыс істеу процесінде сынақтан өткізу жоспарланып отыр.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Стесина, С. П.** Гидравлика, гидромашины и гидропривод [Текст] / под ред. С. П. Стесин. – М. : Академия, 2006. – 336 с.

2 **Медведев, В. Ф.** Гидравлика и гидравлические машины: учеб. пособие / В. Ф. Медведев. – Минск : Выш. шк., 1998. – 311 с.

3 **Семёнов, А. В.** Причины отказов шестеренных насосов: [Электронный ресурс]. – URL: https://gidravlikov.ru/articles/prichiny-otkazov-shesteryennykh-nasosov (дата обращения: 01.08.2025).

4 **Шеров, К. Т., Бердімұратова, Д. И., Мырзахмет, Б., Сагитов, А. А., Мендалиева, С. И.** Исследование возможности использования методов аддитивной технологии при ремонте деталей сельскохозяйственной техники // ВЕСТНИК ЕНУ имени Л. Н. Гумилева. Серия технические науки и технологии. – Астана: Изд-во ЕНУ. – 2024. – № 1 (148). – С. 241–252. – https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-241-252

5 **Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C.** Additive Manufacturing of Metals // Acta Materialia. – 2016. – № 117. – P. 371–392.

6 **Patel, R., Desai, C., Kushwah, S., Mangrola, M.** A review article on FDM process parameters in 3D printing for composite materials // Mater. Today Proc. – 2022. – № 60. – P. 2162–2166.

7 **Wickramasinghe, S., Do, T., Tran, P.** FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments // Polymers. – 2020. – № 12. – P. 1529.

8 **Asif, M., Lee, J.H., Lin-Yip, M. J., Chiang, S., Levaslot, A., Giffney, T., Ramezani, M., Aw, K. C.** A new photopolymer extrusion 5-axis 3D printer // Addit. Manuf. – 2018. – № 23. – P. 355–361.

9 **Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D. Ubaidillah Arifin, Z.** A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters // Open Eng. – 2021. – № 11. – P. 639–649.

10 **Haryn´ska, A., Carayon, I., Kosmela, P., Szeliski, K., Łapin´ski, M., Pokrywczyn´ska, M., Kucin´ska-Lipka, J., Janik, H.** A comprehensive evaluation of flexible FDM/FFF 3D printing filament as a potential material in medical application // Eur. Polym. J. – 2020. – № 138. – P. 109958.

11 **Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baciu, F., Marinescu, R.** FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review // Polym. Test. – 2018. – № 69. – P. 157–166.

12 **Chaudhary, R., Fabbri, P., Leoni, E., Mazzanti, F., Akbari, R., Antonini, C.** Additive manufacturing by digital light processing: A review // Prog. Addit. Manuf. – 2023. – № 8. – P. 331–351.

13 **Толочко, Н. К., Нукешев, С. О., Романюк Н. Н., Мендалиева С. И.** Аддитивные технологии в производстве и ремонте машин: учебное пособие / Н. К. Толочко. – Нур-Султан : КАТУ им. С. Сейфуллина, 2022. – 176 с.

14 **Толочко, Н. К., Романюк, Н. Н., Авраменко, П. В., Сокол, О. В.** Аддитивное производство деталей сельскохозяйственных машин // Исследования, результаты (Алматы). – 2020. – № 4. – С. 335–344.

REFERENCES

1 **Stesina, S. P.** Gidravlika, gidromashiny i gidroprivod [Tekst] [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drive] / pod red. S. P. Stesin. – Moscow : Akademiya, 2006. – 336 p.

2 **Medvedev, V. F.** Gidravlika i gidravlicheskie mashiny: ucheb. posobie [Hydraulics and hydraulic machines: a textbook] / V. F. Medvedev. – Minsk : Vysh. shk., 1998. – 311 p.

3 **Semyonov, A. V.** Prichiny otkazov shesterennyh nasosov: Causes of gear pump failures: [Electronic resource] – URL: https://gidravlikov.ru/articles/prichiny-otkazov-shesteryennykh-nasosov (Access date: 01.08.2025).

4 **Sherov, K. T., Berdimұratova, D. I., Myrzahmet, B., Sagitov, A. A., Mendalieva, S. I.** Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya metodov additivnoj tekhnologii pri remonte detalej sel'skohozyajstvennoj tekhniki [Study of the possibility of using additive technology methods in the repair of agricultural machinery parts] // VESTNIK ENU imeni L. N. Gumileva. Seriya tekhnicheckie nauki i tekhnologii – Astana: Izd-vo ENU. – 2024. – № 1 (148). – P. 241–252. – https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-241-252

5 **Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C.** Additive Manufacturing of Metals // Acta Materialia. – 2016. – № 117. – P. 371–392.

6 **Patel, R., Desai, C., Kushwah, S., Mangrola, M.** A review article on FDM process parameters in 3D printing for composite materials // Mater. Today Proc. – 2022. – № 60. – P. 2162–2166.

7 **Wickramasinghe, S., Do, T., Tran, P.** FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments // Polymers. – 2020. – № 12. – P. 1529.

8 **Asif, M., Lee, J.H., Lin-Yip, M. J., Chiang, S., Levaslot, A., Giffney, T., Ramezani, M., Aw, K. C.** A new photopolymer extrusion 5-axis 3D printer // Addit. Manuf. – 2018. – № 23. – P. 355–361.

9 **Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D.** Ubaidillah Arifin, Z. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters // Open Eng. – 2021. – № 11. – P. 639–649.

10 **Haryn´ska, A., Carayon, I., Kosmela, P., Szeliski, K., Łapin´ski, M., Pokrywczyn´ska, M., Kucin´ska-Lipka, J., Janik, H.** A comprehensive evaluation of flexible FDM/FFF 3D printing filament as a potential material in medical application // Eur. Polym. J. – 2020. – № 138. – P. 109958.

11 **Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baciu, F., Marinescu, R.** FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review // Polym. Test. – 2018. – № 69. – P. 157–166.

12 **Chaudhary, R., Fabbri, P., Leoni, E., Mazzanti, F., Akbari, R., Antonini, C.** Additive manufacturing by digital light processing: A review // Prog. Addit. Manuf. – 2023. – № 8. – P. 331–351.

13 **Tolochko, N. K., Nukeshev, S. O., Romanyuk N. N., Mendalieva S. I.** Additivnye tekhnologii v proizvodstve i remonte mashin: uchebnoe posobie [Additive technologies in the production and repair of machines: a tutorial] / N. K. Tolochko. – Nur-Sultan : KATU im. S. Sejfullina, 2022. – 176 p.

14 **Tolochko, N. K., Romanyuk, N. N., Avramenko, P. V., Sokol, O. V.** Additivnoe proizvodstvo detalej sel'skohozyajstvennyh mashin [Additive manufacturing of agricultural machinery parts] // Issledovaniya, rezul'taty (Almaty). – 2020. – № 4. – P. 335–344.

21.06.25 ж. баспаға түсті.
13.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***К. Т. Шеров[1], Д. И. Бердимуратова[2], А. А. Сагитов[3],***
***М. М. Мусаев[4], А. Турусбекова[5]***
[1,2,3]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[4,5]Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда
Поступило в редакцию 21.06.25.
Поступило с исправлениями 13.08.25.
Принято в печать 19.08.25.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛИ «ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ» ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ FDM НА 3D-ПРИНТЕРЕ

*В данной статье выполнено исследование возможности использования методов аддитивной технологии при изготовлений деталей гидравлических машин, в частности насосов шестеренных (НШ). Так как в результате анализа ремонтных производств субъектов агропромышленного комплекса Республики Казахстан (АПК РК), было выявлено, что чаще всего поступает на ремонт и восстановление детали НШ. Установлено, что основными причинами возникновения отказов НШ являются раскрытие контакта зубьев шестерен во время работы насоса, некачественная сборка, износ деталей втулок, подпятников, зубьев шестерен и т.п.*

*Также выявлена, что существует крупная проблема в условиях ремонтных производств обслуживающих субъектов АПК РК, связанная с отсутствием необходимого технологического оборудования, технологической оснастки и инструмента при выполнении ремонтно-восстановительных работ.*

*Для решения данной проблемы предложено использование методов аддитивной технологии при ремонте и изготовлении деталей НШ, а также деталей сельскохозяйственных машин и техники. Распечатан деталь НШ «вал-шестерня» методом FDM на 3D-принтере Raise3D Pro Plus и выполнен его прочностной расчет в программе SolidWorks. Установлено, что вал-шестерня выдерживает рабочую нагрузку. Максимальное напряжение достигает 18,45 МПа, который находятся в пределах допустимого для пластиков, применяемых в 3D-печати. Исследование выполнено в рамках выполнения грантовой темы, финансированной Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан AP23489364 «Использование аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственных машин с оптимизацией процесса путем моделирования и экспериментального исследования».*

*Ключевые слова. Насос шестеренный, износ, ремонт, восстановление, аддитивная технология, 3D-печать, пластик, прочность.*

***K. T. Sherov[1], D. I. Berdimuratova[2], A. A. Sagitov[3],***
***M. M. Mussayev[4], A. Turusbekova[5]***
[1,2,3]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[4,5]A. Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 21.06.25.
Received in revised form 13.08.25.
Accepted for publication 19.08.25.

## STUDY OF THE STRENGTH OF THE PART «GEAR SHAFT» OF A HYDRAULIC MACHINE MANUFACTURED BY THE FDM METHOD ON A 3D PRINTER

*This article presents a study of the possibility of using additive technology methods in the manufacture of hydraulic machine parts, in particular gear pumps (GP). As a result of the analysis of repair production facilities of the subjects of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan (AIC RK), it was revealed that GP parts are most often sent for repair and restoration.*

*It has been established that the main causes of pump failures are the opening of the contact of the gear teeth during pump operation, poor assembly, wear of bushing parts, thrust bearings, gear teeth, etc.*

*It was also revealed that there is a major problem in the conditions of repair production of service entities of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan, associated with the lack of necessary technological equipment, technological tooling and tools when performing repair and restoration work.*

*The maximum stress reaches 18.45 MPa, which is within the permissible limits for plastics used in 3D printing. The study was carried out within the framework of the grant topic funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan AP23489364 «Use of additive technologies in the repair of agricultural machinery with process optimization through modeling and experimental research».*

*Keywords: Gear pump, wear, repair, restoration, additive technology, 3D printing, plastic, strength.*

SRSTI 53.37.31

https://doi.org/10.48081/VBZO5882

***A. R. Abildina***
Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1705-1352
*e-mail: aizhan--1984@mail.ru

# *STUDY OF THE EFFECT OF MOLYBDENUM ON THE PROPERTIES OF THE CO-CR-FE-NI-MN-NB QHEA*

*This study investigates the effects of varying molybdenum concentrations (5 %, 10 %, and 15 %) on the microstructural features, hardness, and melt fluidity of quasi-high-entropy alloys (QHEAs) within the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb system. The primary objective is to reduce production costs of advanced alloys by partially replacing pure elemental constituents with ferroalloys. Experimental ingots were synthesized via induction melting, followed by characterization through scanning electron microscopy (SEM), Brinell hardness testing, and spiral fluidity assessments. Results indicate that increasing Mo content markedly enhances hardness – approaching a threefold increase at 15 % Mo – attributable to solid-solution strengthening and probable intermetallic phase formation. However, elevated molybdenum levels negatively affect melt fluidity, with a reduction of approximately 12 % observed at Mo contents between 10 % and 15 %, leading to casting defects. These findings emphasize the importance of optimizing molybdenum concentration to achieve an optimal balance between mechanical performance and castability. For components with complex geometries, maintaining Mo content below 10 % is advisable. This work contributes to the development of cost-effective QHEAs suitable for precision casting using locally sourced materials.*

*Keywords: quasi-high-entropy alloy, melt fluidity, molybdenum, hardness, microstructure, casting, ferroalloy.*

## Introduction

Since the early 2000s, the field of alloy development has increasingly emphasized multicomponent systems based on the high-entropy alloy (HEA) concept, establishing HEAs as a novel class of advanced metallic materials. Among these, the equiatomic five-element Cantor alloy (Co-Cr-Fe-Ni-Mn) [1; 3] stands out as one of the most extensively studied, exhibiting remarkable mechanical properties, including an ultimate tensile strength of 491 MPa, yield strength of 292 MPa, and ductility reaching elongations up to 50 %. Such a unique combination of strength and ductility is uncommon in conventional alloy systems.

Despite these advantages, the practical application of HEAs is frequently constrained by high production costs, largely attributed to the necessity of using high-purity elemental feedstock. Strategies aimed at cost reduction involve streamlining manufacturing processes or substituting expensive raw materials with more economical alternatives.

Within this context, the emergence of quasi-high-entropy alloys (QHEAs) has garnered significant attention [2; 3; 4].

Previous studies [4; 5] have validated the feasibility of synthesizing QHEAs through partial replacement of pure elements with ferroalloys. Additionally, alloying with elements such as niobium (Nb) has demonstrated marked improvements in both strength and wear resistance relative to the baseline Cantor alloy. Investigations detailed in [6, p. 3] have further explored the impact of processing conditions on the fluidity of QHEAs in the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb system, revealing that Nb additions tend to diminish melt fluidity, likely due to the formation of secondary phases.

The influence of molybdenum (Mo) as an additional alloying constituent in Cantor-type systems has been examined in prior research [7; 8]. Due to its comparatively large atomic radius, Mo induces significant lattice distortions, thereby enhancing hardness. Acting as an effective solid-solution strengthener, molybdenum impedes dislocation motion, which translates into improved resistance to plastic deformation and increased mechanical strength.

However, these mechanical enhancements are often accompanied by a reduction in casting fluidity, since materials with elevated strength typically exhibit lower melt flowability. For the production of precision cast components, achieving an optimal balance between mechanical properties and castability necessitates meticulous control of Mo content, taking into account its effects on melt viscosity and phase stability.

**Materials and methods**

The present study focuses on examining how different molybdenum concentrations (5 %, 10 %, and 15 %) influence the hardness, microstructure, and melt fluidity of quasi-high-entropy alloys (QHEAs) based on the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb system.

For alloy synthesis, the charge mixture comprised ferromanganese (FeMn80C05), ferrochrome (grade FK005), electrolytic nickel (N1 grade), metallic cobalt (K1AU grade), ferroniobium (FNb60 grade), and ferromolybdenum (FMo60 grade). The chemical composition of each input component was determined using a NITON XL2-100G (USA) portable X-ray fluorescence analyzer and a SPAS-05 spectrometer (Russia). The obtained elemental compositions are summarized in Table 1.

Table 1 – Chemical analysis of the charge component composition

| Element, wt.% | Mn | Nb | Fe | Cr | Ni | Co | Mo | C | Si | P | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FeMn80C05 | 75,1 | - | 25,2 | - | - | - | | 0,1 | 1,85 | up to 0,3 | up to 0,03 |
| ФХ001А | - | - | 32,04 | 68,2 | - | - | | 0,01 | 0,82 | up to 0,02 | up to 0,02 |
| ФНб60 | - | 62 | 35,5 | - | - | - | | 0,3 | 1,8 | 0,04 | 0,05 |
| Ni Н-1у | - | - | - | - | 99,95 | | | 0,01 | 0,002 | 0,001 | 0,001 |
| Co К1Ау | 0,03 | - | 0,2 | - | - | 99,3 | | 0,02 | | 0,003 | 0,004 |
| ФМо60 | - | - | 38,8 | - | - | - | 60,2 | 0,08 | 0,8 | 0,05 | 0,01 |

The charge formulation was designed to obtain target molybdenum concentrations of 5 %, 10 %, and 15 %, while keeping the contents of the remaining alloying elements approximately balanced. The majority of the raw materials (about 90 %) had a particle size in the range of 2–3 mm. The particle size distribution was assessed using an AS 200 control analytical sieve shaker (Retsch, Germany). Following sieving, the charge components were uniformly mixed for 15 minutes in a Schatz laboratory mixer to ensure compositional homogeneity.

The alloy ingots were fabricated via double remelting in an induction furnace under ambient atmospheric conditions. The second melting stage was conducted specifically to improve structural uniformity and minimize chemical segregation within the ingot.

To evaluate melt fluidity, a spiral casting test was performed (Figure 1). The spiral mold featured a triangular cross-section measuring 15 mm in height and 10 mm in width, resulting in a cross-sectional area of 75 mm². The experimental setup consisted of the following elements: 1 – gating cup, 2 – mesh filter, 3 – riser, 4 – sump, 5 – spiral channels, and 6 – calibration protrusions. In order to accurately determine the flow length, notches were pre-machined into the mold at 50 mm intervals along the spiral, which subsequently formed raised markers on the castings, simplifying length measurement.

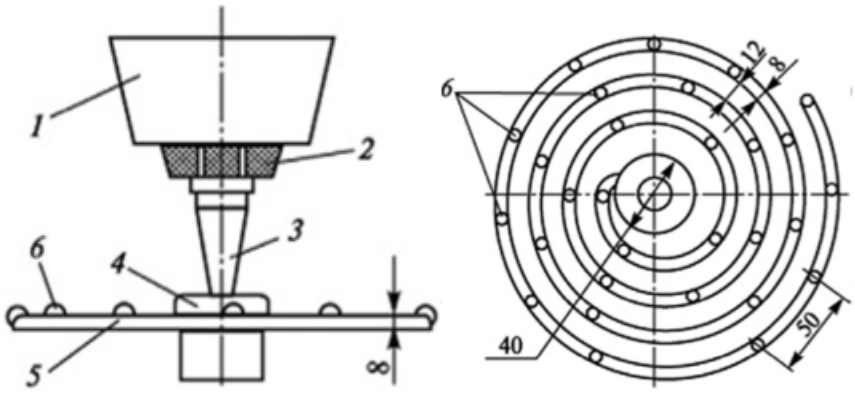



Figure 1 – Spiral test for determining the fluidity of the alloy [9]

The chemical compositions of the experimental alloys are summarized in Table 2. Sample № 0, which does not contain molybdenum, served as the reference material for comparative analysis.

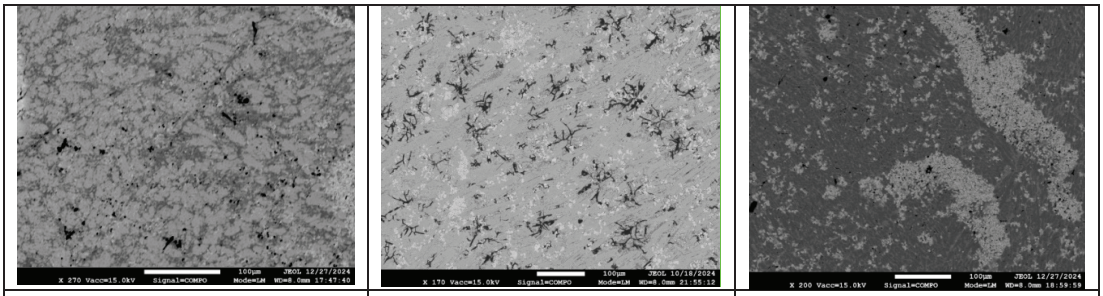
Table 2 – Chemical composition of the studied samples

| Sample | Co | Cr | Fe | Ni | Mn | Nb | C | Mo | Si | P | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 16.94 | 16.82 | 18.50 | 16.73 | 16.53 | 14.23 | 0.23 | - | 0,002 | trace | trace |
| 1 | 15.64 | 15.67 | 18.02 | 16.02 | 15.28 | 14.20 | 0.28 | 4.86 | 0,003 | trace | trace |
| 2 | 14.12 | 14.84 | 17.95 | 14.28 | 15.15 | 14.33 | 0.28 | 9.05 | 0,002 | trace | trace |
| 3 | 13.29 | 13.127 | 17.42 | 13.08 | 14.52 | 14.02 | 0.29 | 14.25 | 0,003 | trace | trace |

**Results and discussion**

Figure 1 illustrates the microstructural features of the investigated alloy samples. Metallographic preparation was conducted in accordance with standard procedures. The specimens were sectioned using a Struers Discotom precision cutter, followed by mounting, grinding, and polishing carried out on a Struers Planopol system, employing a series of abrasive papers with decreasing grit size to achieve a mirror-like surface finish.

Subsequent to mechanical preparation, the samples were degreased and subjected to chemical etching at ambient temperature (20–25 °C) for periods ranging from 10 to 60 seconds, enabling clear visualization of microstructural details. The etched surfaces were examined using a scanning electron microscope (SEM), model S-3400N.



| a) Sample 1 | b) Sample 2 | c) Sample 3 |
|---|---|---|

Figure 2 – Microstructures of the experimental samples

Microstructural analysis demonstrated that at a molybdenum concentration of 5 wt.% (Figure 2a), the alloy exhibits a relatively homogeneous structure characterized by fine, uniformly distributed grains, indicative of stable solidification conditions and limited elemental segregation. Upon increasing the Mo content to 10 wt.% (Figure 2b), microstructural heterogeneities begin to emerge, including the presence of darker inclusions and localized Mo enrichment, which may point to the formation of intermetallic phases or second-phase particles. At the highest investigated Mo level of 15 wt.% (Figure 2c), the alloy's microstructure becomes markedly inhomogeneous, with pronounced segregation phenomena, likely resulting from decreased solubility limits and incomplete diffusion during solidification. It is important to note that comprehensive phase analysis and crystallographic identification were not conducted within the scope of this investigation.

Hardness properties were evaluated using a Willson 1150 durometer under standard testing conditions. For each sample, a minimum of five indentations were performed, and the mean values were calculated to ensure statistical reliability. The hardness data are compiled in Table 3 and illustrate the influence of increasing Mo content on mechanical strength.

For fluidity assessment, specialized cast samples were prepared under controlled conditions. Alloys of designated compositions (Table 2) were melted and superheated to a processing temperature of 1700 °C, exceeding the liquidus temperature by approximately 100 °C to ensure complete dissolution and adequate fluidity. The molten alloy was poured through the gating system (Figure 1) into a mold containing a spiral

channel designed to quantify casting fluidity. After full solidification and cooling to ambient temperature, the spiral castings were extracted. The effective flow length was measured with a precision of ±0.5 mm by summing the number of calibration marks (spaced every 50 mm) and the remaining distance beyond the final mark. The quantified fluidity lengths are presented in Table 3 and reflect the effect of molybdenum on melt flow behavior.

Table 3 – Obtained data on hardness and fluidity of the samples

| Sample | Hardness, HV | Fluidity, mm |
|---|---|---|
| 0 | 245 | 124 |
| 1 | 484 | 122 |
| 2 | 641 | 119 |
| 3 | 691 | 109 |
| | | |

The data summarized in Table 3 clearly indicate that incorporating molybdenum within the examined concentration range exerts a significant strengthening effect on the experimental alloys, with hardness values increasing by over 2.5 times relative to the Mo-free reference. Conversely, this enhancement in mechanical strength is accompanied by a noticeable reduction in melt fluidity. Specifically, at Mo levels up to 10 %, the decrease in fluidity is marginal, approximately 4 %, which correlates with improved mold filling efficiency and a reduction in casting defects within the spiral channels. However, when the Mo content reaches 15 %, a more pronounced decline in fluidity – around 12 % – is observed, characterized by slower progression of the molten metal through the test channel and the emergence of porosity and voids. These phenomena suggest an increase in melt viscosity and impaired flow behavior at elevated molybdenum concentrations.

The observed deterioration in fluidity likely stems from either the nucleation of novel refractory intermetallic compounds not present at lower Mo levels or from the increased volume fraction of previously identified intermetallic phases. To comprehensively elucidate the mechanisms underlying the simultaneous increase in hardness and decrease in fluidity, further in-depth phase characterization employing techniques such as X-ray diffraction or transmission electron microscopy is warranted.

**Conclusions**

The present study demonstrates that molybdenum exerts a pronounced influence on the properties of quasi-high-entropy alloys (QHEAs) within the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb system. Incorporation of Mo at levels ranging from 5 to 15 wt.% significantly alters the microstructure and leads to a considerable increase in alloy hardness, while concurrently causing a reduction in melt fluidity. Notably, fluidity degradation remains minimal – approximately 4 % – for Mo contents up to 10 %, whereas a more substantial decline of about 12 % is observed at 15 % Mo. This effect must be carefully considered during the optimization of casting parameters. For components featuring complex geometries, it is recommended to restrict molybdenum content to 10 % or alternatively adjust the pouring temperature to compensate for the reduced fluidity.

In summary, molybdenum additions provide beneficial mechanical strengthening to QHEAs; however, to maintain acceptable casting performance, the Mo concentration should ideally not exceed 15 %.

**Information of funding**

The work was carried out within the framework of the implementation of the IRN Program BR21882240 «Developing a quasi-high-entropy alloy using Kazakhstani raw materials and technology of producing precision parts based on it» (agreement with the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan № 378-PTsF-23-25 dated November 15, 2023), funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

REFERENCES

1 **Cantor, B., Chang, I. T., Knight, P., Vincent, A. J. B.** Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering. – 2004. – Vol. 375–377. – P. 213–218. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257

2 **Bazlov, A., Strochko, I., Ubyivovk, E., Parkhomenko, M., Magomedova, D., Zanaeva, E.** Structure and Properties of Amorphous Quasi-High-Entropy Fe-Co-Ni-Cr-(Mo,V)-B Alloys with Various Boron Content // Metals. – 2023. – Vol. 13. – https://doi.org/10.3390/met13081464

3 **Yang, L., Li, Y., Wang, Z., Zhao, W., Qin, C.** Nanoporous Quasi-High-Entropy Alloy Microspheres // Metals. – 2019. – № 9. – P. 345. – https://doi.org/10.3390/met9030345

4 **Kvon, S., Issagulov, A., Kulikov, V., Arinova, S.** Niobium's Effect on the Properties of a Quasi-High-Entropy Alloy of the CoCrFeMnNi System // Metals. – 2024. – Vol. 14. – P. 564. – https://doi.org/10.3390/met14050564

5 **Kvon, S., Issagulov, A., Kulikov, V., Arinova, S.** The use of ferroalloys for the smelting of a quasi-high-entropy alloy // CIS Iron and Steel Review. – Moscow: Ore and Metals, 2024. – Vol. 26. – № 2. – P. 21–25. – https://doi.org/10.17580/cisisr.2024.02.04

6 **Issagulov, A. Z., Kulikov, V. Yu., Kvon, S. S., Tulegenova, Sh. N.** Influence of melting technological regimes on the mechanical properties of quasi-high-entropy alloys // Foundry Production. – Moscow: Publishing House «Foundry», 2024. – № 4. – P. 2–4.

7 **Liu, W., Lu, Z., He, J., Luan, J., Wang, Z., Liu, B., Liu, Y., Chen, M., Liu, C.** CoCrFeNiMox high entropy alloys strengthened by hard intermetallic phases // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 111. – P. 332–342.

8 **Sanin, V. N., Ikornikov, D. M., Golosova, O. A., Andreev, D. E., Yukhvid, V. I.** Centrifugal SHS Metallurgy of Cast Co-Cr-Fe-Ni-Mn High-Entropy Alloys Strengthened by Precipitates Based on Mo and Nb Borides and Silicides // Physical Mesomechanics. – 2021. – Vol. 24. – № 6. – P. 692–700. – https://doi.org/10.1134/S1029959921060072

9 ГОСТ 16438–70. Формы песчаные и металлические для получения образцов для испытаний металлов на текучесть. – Введ. 1972-01-01. – М.: ИПК «Стандарты», – 1999. – С. 692.

10 **Gludovatz, B., George, E. P., Ritchie, R. O.** Processing, Microstructure and Mechanical Properties of the CrMnFeCoNi High-Entropy Alloy // JOM. – 2015. – Vol. 67. – № 10. – P. 2262–2270. – https://doi.org/10.1007/s11837-015-1589-z.

Received 07.08.25.
Received in revised form 07.08.25.
Accepted for publication 13.08.25.

***А. Р. Абильдина***
Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
07.08.25 ж. баспаға түсті.
07.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
13.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## CO-CR-FE-NI-MN-NB ЖҮЙЕСІНІҢ КЖЭҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ МОЛИБДЕННІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

*Бұл жұмыста Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb жүйесіндегі квазижоғарыэнтропиялы қорытпаларға (ҚЖЭҚ) молибденнің (5 %, 10 % және 15 %) мөлшерінің микроқұрылымға, қаттылыққа және ағындылыққа әсері зерттелді. Зерттеу мақсаты - таза металдарды ферроқорытпалармен ішінара алмастыру арқылы жоғары тиімді қорытпаларды арзандату. Эксперименттік үлгілер индукциялық балқыту әдісімен алынған, олардың құрылымы сканерлеуші электронды микроскопия, қаттылықты өлшеу және спиральды арнада ағындылыққа сынау арқылы зерттелді. Нәтижелерге сәйкес, молибден қоспасы қорытпаның қаттылығын айтарлықтай арттырады – 15% Mo кезінде қаттылық шамамен үш есеге өсті, бұл қатты ерітіндінің беріктігінің артуымен және, мүмкін, интерметаллдық фазалардың түзілуімен түсіндіріледі. Алайда, молибденнің артық мөлшері қорытпаның ағындылығын төмендетеді: 10 % дейін ағындылық өзгерісі аз (4 %), ал 15 % Mo кезінде ағындылық 12 % төмендеп, құймада ақаулар байқалды. Сондықтан күрделі пішінді құймаларды жасау үшін Mo мөлшерін 10 % асырмаған жөн. Бұл жұмыс Қазақстандық шикізатты пайдалана отырып дәлме-дәл құюға арналған тиімді ҚЖЭҚ жасауда маңызды үлес қосады.*

*Кілтті сөздер: квазижоғарыэнтропиялық қорытпа, ағындылылық, молибден, қаттылық, микроқұрылым, құйма, ферроқорытпа.*

***А. Р. Абильдина***
Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда
Поступило в редакцию 07.08.25.
Поступило с исправлениями 07.08.25.
Принято в печать 13.08.25.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЛИБДЕНА НА СВОЙСТВА КВЭС CO-CR-FE-NI-MN-NB

*В данном исследовании изучается влияние различного содержания молибдена (5 %, 10 % и 15 %) на микроструктуру, твердость и жидкотекучесть расплава квазивысокоэнтропийных сплавов (КВЭС) системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb. Основная цель – снижение стоимости производства высокопрочных сплавов за счёт частичной замены чистых металлических компонентов ферросплавами. Экспериментальные слитки были получены методом индукционного плавления и охарактеризованы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), измерения твердости по методу Бринелля и тестов на текучесть по спиральной форме. Результаты показали, что увеличение содержания молибдена значительно повышает твердость - почти в три раза при 15 % Mo – что связано с упрочнением твёрдым раствором и вероятным образованием интерметаллических фаз. Вместе с тем, повышение содержания Mo отрицательно сказывается на текучести расплава: при содержании молибдена от 10 % до 15 % наблюдается снижение текучести примерно на 12 %, что приводит к появлению дефектов отливки. Полученные данные подчёркивают необходимость оптимизации концентрации молибдена для достижения баланса между механическими свойствами и литьевыми характеристиками. Для отливок сложной формы рекомендуется ограничивать содержание Mo уровнем не выше 10 %. Работа способствует разработке экономически эффективных КВЭС, пригодных для точного литья с использованием казахстанских сырьевых ресурсов.*

*Ключевые слова: квазивысокоэнтропийный сплав, жидкотекучесть, молибден, твёрдость, микроструктура, отливка, ферросплав.*

МРНТИ 53.37.13

https://doi.org/10.48081/YQUA8828

***А. А. Акбердин[1], А. С. Ким[2], Р. Б. Султангазиев[3], А. С. Орлов[4], *Г. Х. Адамова[5]***

[1,2,4]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда;

[3,5]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2562-1132

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0772-1268

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3928-486X

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6933-6571

*e-mail: guldenaa@mail.ru

# *МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГРАММЫ ФАЗОВОГО СОСТАВА СИСТЕМЫ NI-B-SI*

*Построена диаграмма фазового состава системы Ni-B-Si. Учтено присутствие в ней боридов $Ni_3B$, $Ni_2B$, $Ni_4B_3$, NiB и силицидов никеля $Ni_3Si$, $Ni_5Si_2$, $Ni_2Si$, $Ni_3Si_2$, $Ni_5i$, $NiSi_2$, а также силицидов бора SiB6, SiB4 и двух тройных соединений – $Ni_{11}Si_5B_4$ и $Ni_6Si_2B$. Диаграмма представляет собой набор элементарных треугольников равновесно сосуществующих фаз. Триангуляция выявила наличие в изучаемой системе 17 элементарных треугольников. С использование собственного метода создана математическая модель диаграммы, представляющую собой уравнения связи между исходными элементами вещества (металла) и образующимися фазами. По полученным уравнениям создана компьютерная программа. Она при задании с пульта химического состава металла и пуска находит элементарный треугольник, где находится металл, и выдает содержание всех фаз в массовых процентах. Показан пример использования модели. Совпадение расчетного и экспериментально определенного фазового состава металлов удовлетворительное. Построена диаграмма фазового состава системы Ni-B-Si, создана её математическая модель и на её основе компьютерная программа. Её работоспособность показана сопоставлением рассчитанных и полученных экспериментально данных по фазовому составу сплавов. Для математического описания диаграммы фазового состава применен собственный балансовый метод, отличающийся от существующих простотой и точностью в оценке численных значений фаз.*

*Ключевые слова: фаза, триангуляция, диаграмма, математическая модель, компьютерная программа.*

**Введение**

Диаграммы состояния, фазового состава и физических свойств системы Ni-B-Si представляют интерес для различных отраслей экономики. Это обусловлено возможностью использования этой системы для создания ферросплавов, лигатур, аморфных сплавов. Последние нашли широкое распространение практически во всех наукоемких отраслях современной промышленности [1; 2]. Быстрозакаленные (аморфные) сплавы на основе группы металл-металлоид (Ni, Fe, Co, Cr, Nd – B, P, Si, C) широко применяются в электронике и энергетике для производства мощных магнитов, сердечников трансформаторов, магнитных датчиков и носителей информации [3].

Никель способен образовывать твердый раствор со многими легирующими элементами и растворять их. Такая взаимная растворимость привела к созданию большой группы припоев на основе никеля для соединения металлов между собой. Никель имеет высокую температуру плавления (1725 К). Добавление элементов, понижающих температуру плавления, таких как бор, кремний, углерод и фосфор, значительно снижает температуру пайки, а добавка фосфора, хрома, циркония, титана – получать припои с особыми свойствами. В этом случае прочность соединения, близка к прочности основных металлов. Это позволило создать стойкие к высоким температурам и механическим нагрузкам детали высокоскоростных истребителей, космических ракет и спускаемых аппаратов. Представляется, что создание математической модели и компьютерной программы фазового состава системы Ni-B-Si позволит облегчить поиск металлов и припоев различного назначения.

**Материалы и методы**

Тройная система Ni-B-Si слагается из трёх бинарных частных систем: Ni-B, Ni-Si и B-Si. По данным [4; 6] в первой системе имеются бориды никеля $Ni_3B$, $Ni_2B$, $Ni_4B_3$, NiB. Во второй системе установлены силициды никеля $Ni_3Si$, $Ni_5Si_2$, $Ni_2Si$, $Ni_3Si_2$, NiSi, $NiSi_2$ [7–9].

По третьей системе (Si-B) в ряде исследований указывается на наличии таких соединений как $Si_2B$, $SiB_3$, $SiB_4$, $SiB_6$, SiBn (n=10-14). Однако, по мнению [10] в ней достоверным можно считать существование двух химических соединений – $SiB_4$ и $SiB_6$, которые нами и приняты при построении диаграммы.

По сведениям [11] в системе Ni-B-Si имеются два тройных соединения – $Ni_6Si_2B$ и $Ni_{4.29}Si_2B$, а по данным [12] – $Ni_{11}Si_5B_4$ и $Ni_6Si_2B$. Нами для построения диаграммы приняты два последних соединения.

Для построения диаграммы с использованием метода минимизации энергии Гиббса требуется знание термодинамических данных всех, перечисленных выше фаз. Анализ показал существенные расхождения этих данных для одного и того же соединения в разных источниках. Например, значение энтальпии образования NiB в них отличается не только величиной (-100,46 и -84,0 кдж/моль), но и знаком (+4,186 кдж/моль) [13].

По этой причине использовали данные, созданные и согласованные усилиями специалистов разных стран [14; 15]. При отсутствии каких-то данных их рассчитывали по имеющимся рекомендациям [16].

Попарное сосуществование фаз оценивали по изменению энергии Гиббса соответствующих реакций. Так, в четырехугольнике веществ NiSi-$NiSi_2$-$SiB_6$-$SiB_4$ написанная по его диагоналям реакция $NiSi_2$+2SiB6 = NiSi + 3 $SiB_4$ (1) протекает в прямом направлении, поскольку имеет $\Delta G_{298,15}$ = - 21,62 кдж. Это означает сосуществование продуктов реакции NiSi и $SiB_4$. По этой причине на диаграмме (рисунок 1) их соединили прямой линией. Распространение этого приема на все области позволило создать диаграмму фазового состава системы Ni-B-Si в виде элементарных треугольников сосуществующих фаз. На графическом изображении диаграммы (рисунок 1) черными точками показаны конгруэнтно, а светлыми – инконгруэнтно плавящиеся соединения.

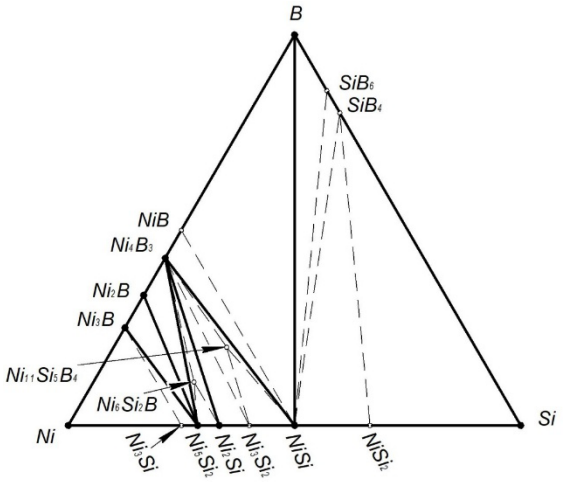



Рисунок 1 – Диаграмма фазового состава системы Ni-B-Si при 300К

Сплошные линии выделяют стабильные треугольники. Их семь: Ni-$Ni^3$B-$Ni_5Si_2$, $Ni_3B$-$Ni_5Si_2$-$Ni_2B$, $Ni_5Si_2$-$Ni_2B$-$Ni_4B_3$, $Ni_5Si_2$- $Ni_4B_3$-$Ni_2Si$, $Ni_4B_3$-$Ni_2Si$-NiSi, $Ni_4B_3$-NiSi-B, NiSi-B-Si.

При учете и нестабильных соединений в системе обнаруживается 17 треугольников равновесно сосуществующих фаз. Построенная диаграмма имеет особенность. Соединяющая стабильные фазы коннода B-NiSi разделяет её на две равные части и делает невозможным присутствие в металлах левой части диаграммы инконгруэнтно плавящихся соединений $SiB_6$, $SiB_4$ и $NiSi_2$. Иное строение диаграммы в этой части [17] требует обсуждения.

Математическую модель диаграммы создали с использованием собственного метода [18]. Он базируется на балансе распределения исходных элементов металла ($Ni_0$, $B_0$, $Si_0$) по образующимся фазам. Так, в элементарном треугольнике $Ni_3B$-$Ni_3Si$-Ni имеющийся в металле никель ($Ni_0$) по образующимся фазам распределяется следующим образом.

$$Ni_0 = 0{,}9422 \cdot Ni_3B + 0{,}8624 \cdot Ni_3Si + 1 \cdot Ni, \quad (1)$$

где 0,9422; 0,8624 и 1- содержание никеля в данной фазе в массовых долях. Аналогично записываются балансовые уравнения по бору и кремнию:

$$B_0 = 0{,}0578 \cdot Ni_3B \quad (2)$$

$$Si_0 = 0{,}1376 \cdot Ni_3Si \quad (3)$$

Совместное решение этих трех выражений позволяет получить конечные уравнения для расчета фаз в данном треугольнике.

$$Ni_3B = 17{,}301 \cdot B_0 \quad (4)$$

$$Ni_3Si = 7{,}267 \cdot Si_0 \quad (5)$$

$$Ni = 1 \cdot Ni_0 - 16{,}301 \cdot B_0 - 6{,}267 \cdot Si_0 \quad (6)$$

Такие уравнения получены для всех 17 треугольников и помещены в таблицу 1. Здесь же приведены площади (S) треугольников.

Таблица 1 – Характеристики системы Ni-B-Si

| N | Треугольник | Уравнения | S, кв. ед. |
|---|---|---|---|
| 1 | $Ni_3B$-$Ni_3Si$-Ni | $Ni_3B = 17{,}301 \cdot B_0$;<br>$Ni_3Si = 7{,}267 \cdot Si_0$<br>$Ni = 1 \cdot Ni_0 - 16{,}301 \cdot B_0 - 6{,}267 \cdot Si_0$ | 0,00345 |
| 2 | $Ni_3B$-$Ni_3Si$-$Ni_5Si_2$ | $Ni_3B = 17{,}301 \cdot B_0$<br>$Ni_3Si = 6{,}956 \cdot Ni_0 - 113{,}401 \cdot B_0 - 36{,}333 \cdot Si_0$<br>$Ni_5Si_2 = -5{,}956 \cdot Ni_0 + 97{,}1 \cdot B_0 + 37{,}333 \cdot Si_0$ | 0,000579 |
| 3 | $Ni_3B$-$Ni_5Si_2$-$Ni_2B$ | $Ni_3B = 3{,}172 \cdot Ni_0 - 34{,}421 \cdot B_0 - 16{,}571 \cdot Si_0$<br>$Ni_5Si_2 = 6{,}222 \cdot Si_0$<br>$Ni_2B = -2{,}172 \cdot Ni_0 + 35{,}421 \cdot B_0 + 11{,}349 \cdot Si_0$ | 0,001844 |
| 4 | $Ni_5Si_2$-$Ni_2B$-$Ni_4B_3$ | $Ni_5Si_2 = 6{,}222 \cdot Si_0$<br>$Ni_2B = 3{,}281 \cdot Ni_0 - 17{,}136 \cdot Si_0 - 23{,}746 \cdot B_0$<br>$Ni_4B_3 = -2{,}281 \cdot Ni_0 + 11{,}914 \cdot Si_0 + 24{,}746 \cdot B_0$ | 0,002575 |
| 5 | $Ni_5Si_2$-$Ni_4B_3$-$Ni_6Si_2B$ | $Ni_5Si_2 = 17{,}981 \cdot Ni_0 - 87{,}691 \cdot Si_0 - 130{,}137 \cdot B_0$<br>$Ni_4B_3 = 4{,}583 \cdot Ni_0 - 23{,}935 \cdot Si_0 - 24{,}930 \cdot B_0$<br>$Ni_6Si_2B = -21{,}564 \cdot Ni_0 + 112{,}626 \cdot Si_0 + 156{,}067 \cdot B_0$ | 0,000385 |
| 6 | $Ni_5Si_2$-$Ni_6Si_2B$-$Ni_2Si$ | $Ni_5Si_2 = 5{,}960 \cdot Ni_0 - 24{,}904 \cdot Si_0 - 64{,}740 \cdot B_0$<br>$Ni_6Si_2B = 38{,}759 \cdot B_0$<br>$Ni_2Si = -4{,}960 \cdot Ni_0 + 25{,}904 \cdot Si_0 + 26{,}981 \cdot B_0$ | 0,000361 |
| 7 | $Ni_4B_3$-$Ni_6Si_2B$- $Ni_2Si$ | $Ni_4B_3 = -2{,}272 \cdot Ni_0 + 24{,}680 \cdot B_0 + 9{,}494 \cdot Si_0$<br>$Ni_6Si_2B = 10{,}690 \cdot Ni_0 - 77{,}371 \cdot B_0 - 44{,}673 \cdot Si_0$<br>$Ni_2Si = -7{,}418 \cdot Ni_0 + 53{,}691 \cdot B_0 + 36{,}179 \cdot Si_0$ | 0,000958 |
| 8 | $Ni_4B_3$-$Ni_2Si$-$Ni_3Si_2$ | $Ni_4B_3 = 8{,}237 \cdot B_0$<br>$Ni_2Si = 4{,}960 \cdot Ni_0 - 35{,}874 \cdot B_0 - 15{,}534 \cdot Si_0$<br>$Ni_3Si_2 = -3{,}960 \cdot Ni_0 + 28{,}637 \cdot B_0 + 16{,}534 \cdot Si_0$ | 0,002565 |
| 9 | $Ni_4B_3$-$Ni_3Si_2$- $Ni_{11}Si_5B_4$ | $Ni_4B_3 = 3{,}311 \cdot Ni_0 - 15{,}726 \cdot B_0 - 10{,}377 \cdot Si_0$<br>$Ni_3Si_2 = 5{,}389 \cdot Ni_0 - 39{,}004 \cdot B_0 - 12{,}756 \cdot Si_0$<br>$Ni_{11}Si_5B_4 = -7{,}7 \cdot Ni_0 + 55{,}730 \cdot B_0 + 24{,}133 \cdot Si_0$ | 0,001653 |
| 10 | $Ni_3Si_2$-$Ni_{11}Si_5B_4$-NiSi | $Ni_3Si_2 = 3{,}957 \cdot Ni_0 - 8{,}268 \cdot Si_0 - 32{,}202 \cdot B_0$<br>$Ni_{11}Si_5B_4 = 19{,}157 \cdot B_0$<br>$NiSi = -2{,}957 \cdot Ni_0 + 9{,}268 \cdot Si_0 + 14{,}045 \cdot B_0$ | 0,001849 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 11 | $Ni_{11}Si_5B_4$-NiSi-$Ni_4B_3$ | $Ni_{11}Si_5B_4 = 21{,}275 \cdot Ni_0 - 44{,}451 \cdot Si_0 - 153{,}979 \cdot B_0$<br>$NiSi = -11{,}127 \cdot Ni_0 + 26{,}338 \cdot Si_0 + 80{,}533 \cdot B_0$<br>$Ni_4B_3 = -9{,}148 \cdot Ni_0 + 19{,}113 \cdot Si_0 + 74{,}446 \cdot B_0$ | 0,000798 |
| 12 | $Ni_4B_3$-NiSi-NiB | $Ni_4B_3 = 4{,}549 \cdot Ni_0 - 24{,}690 \cdot B_0 - 9{,}505 \cdot Si_0$<br>$NiSi = 3{,}089 \cdot Si_0$<br>$NiB = -3{,}549 \cdot Ni_0 + 25{,}690 \cdot B_0 + 7{,}416 \cdot Si_0$ | 0,004794 |
| 13 | NiSi-NiB-B | $NiSi = 3{,}088 \cdot Si_0$<br>$NiB = 1{,}184 \cdot Ni_0 - 2{,}472 \cdot Si_0$<br>$B = -0{,}184 \cdot Ni_0 + 0{,}384 \cdot Si_0 + 1 \cdot B_0$ | 0,118353 |
| 14 | B-NiSi-$SiB_6$ | $B = 1 \cdot B_0 + 1{,}105 \cdot Ni_0 - 2{,}309 \cdot Si_0$<br>$NiSi = 1{,}478 \cdot Ni_0$<br>$SiB_6 = -1{,}583 \cdot Ni_0 + 3{,}309 \cdot Si_0$ | 0,088496 |
| 15 | NiSi-$SiB_6$-$SiB_4$ | $NiSi = 1{,}479 \cdot Ni_0$<br>$SiB_6 = 3{,}171 \cdot Ni_0 - 6{,}626 \cdot Si_0 + 4{,}302 \cdot B_0$<br>$SiB_4 = -3{,}65 \cdot Ni_0 + 7{,}626 \cdot Si_0 - 3{,}302 \cdot B_0$ | 0,026824 |
| 16 | $NiSi_2$-$SiB_4$-NiSi | $NiSi_2 = -1{,}958 \cdot Ni_0 + 4{,}091 \cdot Si_0 - 2{,}656 \cdot B_0$<br>$SiB_4 = 1{,}649 \cdot B_0$<br>$NiSi = 2{,}958 \cdot Ni_0 - 3{,}091 \cdot Si_0 + 2{,}007 \cdot B_0$ | 0,043389 |
| 17 | $SiB_4$-$NiSi_2$-Si | $SiB_4 = 1{,}649 \cdot B_0$<br>$NiSi_2 = 1{,}957 \cdot Ni_0$<br>$Si = 1 \cdot Si_0 - 0{,}649 \cdot B_0 - 0{,}957 \cdot Ni_0$ | 0,13413 |

По приведенным уравнениям создали компьютерную программу (рисунок 2). Она при задании с пульта химического состава металла и пуска находит элементарный треугольник, где находится металл, и выдает содержание всех фаз в массовых процентах.

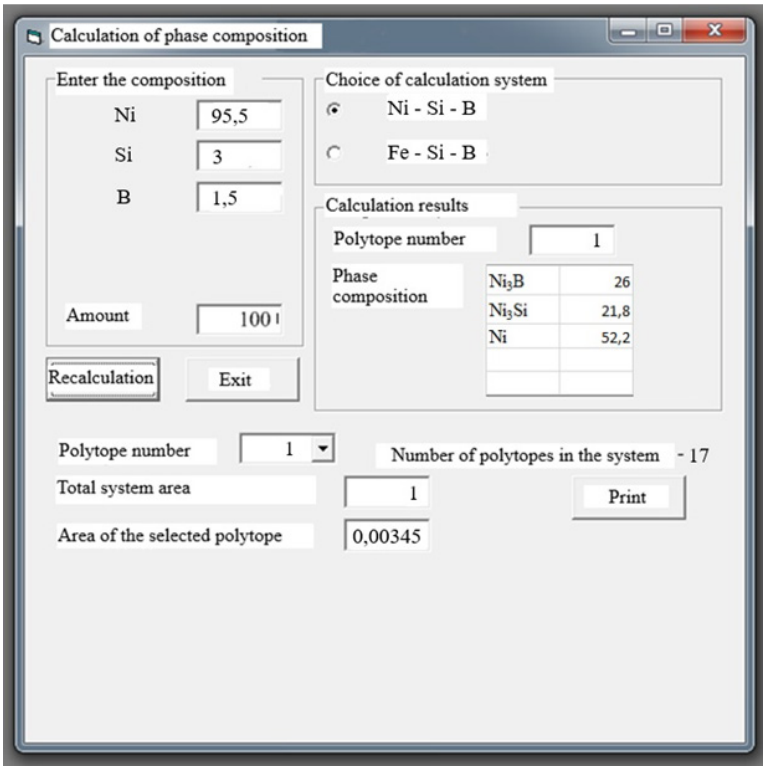



Рисунок 2 – Окно компьютерной программы

В таблице 2 приведен пример использования программы для расчета фазового состава некоторых металлов. Среди них никель-кремниевые, никель-борные и никель-бор-кремниевые сплавы, имеющие самостоятельное значение.

Таблица 2 – Химический и расчетный фазовый состав металлов

| N | Состав металлов, масс.% | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Химический | | | Фазовый | | | | | | | | |
| | | Расчетный | | | Опытный[22] | | | По диаграмме[22] | | | | |
| | Ni | B | Si | $Ni_3Si_2$ | NiSi | $NiSi_2$ | $Ni_3Si_2$ | NiSi | $NiSi_2$ | $Ni_3Si_2$ | NiSi | $NiSi_2$ |
| 1 | 75 | - | 25 | 90,1 | 9,9 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 67,2 | - | 32,8 | 0 | 97,4 | 2,6 | 0 | 96,0 | 4,0 | 0 | 97,0 | 3,0 |
| 3 | 58,3 | - | 41,7 | 0 | 43,6 | 56,4 | 0 | 34,0 | 66,0 | 0 | 42,0 | 58,0 |
| | | | | $Ni_2B$ | $Ni_4B_3$ | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 90 | 10 | - | 57,8 | 42,2 | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | NiB | $Ni_4B_3$ | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 85 | 15 | - | 83,7 | 16,3 | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | $Ni_3B$ | $Ni_3Si$ | Ni | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 95,5 | 1,5 | 3,0 | 26,0 | 21,8 | 52,2 | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 92,0 | 3,5 | 4,5 | 60,6 | 32,7 | 6,7 | - | - | - | - | - | - |

**Результаты и обсуждение**

В компьютерную программу заложены молекулярные веса элементов с точностью четыре знака после запятой. Сплав 1 с 75 % никеля и 25 % кремния не может дать стехиометрический состав Ni3Si2, как это указывается в работе [19] (строка 1, таблица 2), поскольку он должен содержать 75,8166% никеля и 24,1834 % кремния. Программа реагирует на это, указывая на присутствие в сплаве 1 только 90,1 % $Ni_3Si_2$, остальное (9,9 %) – NiSi. Аналогичное замечание касается и других сплавов. Заметим, что снятие численных данных с диаграмм путем геометрических построений не обладает высокой точностью (таблица 2). Рекомендуется использовать для этого предложенную в работе математическую модель.

**Информация о финансировании**

Данное исследование профинансировано Комитетом промышленности Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан (ИРН программы № BR23991563)

**Выводы**

В настоящей работе для построения диаграммы применен термодинамически-диаграммный метод [20]. Выполнялась триангуляция системы Ni-B-Si, результатом которой является диаграмма в виде элементарных треугольников сосуществующих фаз. Для математического описания диаграммы фазового состава применен собственный балансовый метод, отличающийся от существующих простотой и точностью в оценке численных значений фаз.

Таким образом, построена диаграмма фазового состава системы Ni-B-Si, создана её математическая модель и на её основе компьютерная программа. Её работоспособность показана сопоставлением рассчитанных и полученных экспериментально данных по фазовому составу сплавов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Словари и энциклопедии на академике [Электронный ресурс]. – https://metallurgicheskiy.academic.ru/11082 (Дата обращения 11.12.2023).

2 **Стогней, О. В.** Физика аморфных металлических сплавов [Текст]. // – Воронеж – 2007. – 139 с.

3 **Мильман, Ю. В., Чугунова, С. И., Гончарова, И. В.** Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования [Текст]. – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение – 2011. – № 4. – С. 182–187.

4 **Heath, D. L.** Mathematical treatment of multicomponent system. – J. Amer. Ceram. Soc. – 1957. – Vol. 40. – № 2. – P. 50.

5 **Zhai, Q.Y., Xu, J.F., Lu, T.Y. and Xu, Y.** Research on Interlayer Alloys for Transient Liquid Phase Diffusion Bonding of Single Crystal Nickel Base Superalloy DD6. // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2014. – № 2. – P. 12–19.

6 **Теппа, О., Таскинен, П.** Термодинамическая оценка фазовой диаграммы Ni-B [Текст]. – Материаловедение и технология. – 1993. – Т. 9. – № 3. – С. 205–212.

7 Справочник по фазовым диаграммам бинарных сплавов (компакт-диск, версия 1.0). – ASM International, ISBN PC-0-87170-562-1, (1996).

8 **Connétable, D., Olivier, T.** First-principles study of nickelsilicides ordered phases. // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – № 6. – P. 2639–2644.

9 **Cadirh, E., Herlach, D. M., Davydov, E.** Microstructural mechanical, electrical and thermal characterization of arc-melted Ni-Si and Co-Si alloys // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2010. – № 356. – P. 1735–1741.

10 Термодинамическая оценка возможности осаждения боридов кремния из их галогенидов [Текст]. – Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2017. – № 1. – С. 58–63.

11 **Tokunaga, T., Nishio, K., Ohtani, H., Hasebe, M.** Phase Equilibria in the Ni-S-B System // Materials Transactions. – 2003. – Vol. 44. – № 9. – P. 1651–1654.

12 FactSage. [Электронный ресурс]. – https://www.factsage.com (дата обращения 08.01.2024).

13 **Моисеев, Г. К., Ильиных, Н. И., Куликова, Т. В.** Определение термодинамических свойств конденсированных фаз NiB, $Ni_2B$, $Ni_3B$ и $Ni4B_3$ расчетными методами // Металлы. – 2005. – № 1. – С. 28–33.

14 Termo-Calc Software. [Электронный ресурс]. – http://www.thermocalc.com (дата обращения 11.10.2023).

15 Scientific Group Thermodata Europe. [Электронный ресурс]. – https://www.sgte.net (дата обращения 08.01.2024).

16 **Моисеев, Г. К, Ватолин, Н. А., Маршук, Л. А., Ильиных, Н. И.** Температурные зависимости приведенной энергии Гиббса некоторых неорганических веществ (альтернативный банк данных АСТРА OWN). – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 230 с.

17 **Лаптев, А. А., Беломытцев М. Ю., Лаптев, А. И.** Механические свойства кремниевых сплавов [Текст]. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – № 5. – С. 47–50.

18 **Akberdin, A. A., Kim, A. S., Sultangaziev, R. B., Orlov, A. S.** The method of mathematical description of the phase composition diagrams // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – Vol. 25. – P. 79–84.

19 **Kim, A. S., Akberdin, A. A., Lu, N. Y. U., Sultangaziyev, R. B., Orlov, A. S.** Diagram of the equilibrium phase composition of the fe – cr – si – b system / Metalurgija. – 2022. – Vol. 61. – № 2. – P. 305–308.

20 **Akberdin, A. A., Kim, A. S., Sultangaziev, R. B., Orlov A. S.** The method of mathematical description of the phase composition diagrams // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – Vol. 25. – P. 79–84.

REFERENCES

1 Slovari i e`nciklopedii na akademike Rezhim dostupa: https [Dictionaries and encyclopedias on the academician Access mode] [Text]: // [Electronic resource]. – www.metallurgicheskiy.academic.ru/11082 (Date of access 11.12.2023).

2 **Stognej, O. V.** Fizika amorfny`x metallicheskix splavov [Physics of amorphous metal alloys] [Text]. – Voronezh – 2007. – 139 p.

3 **Mil`man, Yu. V., Chugunova, S. I., Goncharova, I. V.** Xarakteristika plastichnosti, opredelyaemaya metodom indentirovaniya [Plasticity characteristic determined by the indentation method] [Text]. – Issues of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science. – 2011. – № 4. – P. 182–187.

4 **Heath, D. L.** Mathematical treatment of multicomponent system // J. Amer. Ceram. Soc. – 1957. – Vol. 40. – № 2. – P. 50.

5 **Zhai, Q.Y., Xu, J.F., Lu, T.Y. and Xu, Y.** Research on Interlayer Alloys for Transient Liquid Phase Diffusion Bonding of Single Crystal Nickel Base Superalloy DD6. // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2014. – № 2. – P. 12–19.

6 **Teppa, O., Taskinen, P.** Termodinamicheskaya ocenka fazovoj diagrammy` Ni-B [Thermodynamic evaluation of the Ni-B phase diagram] [Text]. // Materials science and technology. – 1993. – Vol. 9. – № 3. – P. 205–212.

7 Spravochnik po fazovy`m diagrammam binarny`x splavov (kompakt-disk, versiya 1.0) [Handbook of Phase Diagrams of Binary Alloys (CD-ROM, version 1.0)], ASM International, ISBN PC-0-87170-562-1, (1996).

8 **Connétable, D., Olivier, T.** First-principles study of nickelsilicides ordered phases. // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – № 6. – P. 2639–2644.

9 **Cadirh, E., Herlach, D. M., Davydov, E.** Microstructural mechanical, electrical and thermal characterization of arc-melted Ni-Si and Co-Si alloys // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2010. – № 356. – P. 1735–1741.

10 Termodinamicheskaya ocenka vozmozhnosti osazhdeniya boridov kremniya iz ix galogenidov [Thermodynamic assessment of the possibility of deposition of silicon borides from their halides] [Text]. – News of universities. Powder metallurgy and functional coatings. – 2017. – № 1. – P. 58–63.

11 **Tokunaga, T., Nishio, K., Ohtani, H., Hasebe, M.** Phase Equilibria in the Ni-S-B System // Materials Transactions. – 2003. – Vol. 44. – № 9. – P. 1651–1654.

12 FactSage. [Electronic resource]. – https://www.factsage.com (Data access 08.01.2024).

13 **Moiseev, G. K., Il`iny`x, N. I., Kulikova, T. V.** Opredelenie termodinamicheskix svojstv kondensirovanny`x faz NiB, $Ni_2B$, $Ni_3B$ i Ni4$B_3$ raschetny`mi metodami [Determination of thermodynamic properties of condensed phases NiB, $Ni_2B$, $Ni_3B$ and $Ni_4B3$ by calculation methods] // Metals. – 2005. – № 1. – P. 28–33.

14 Termo-Calc Software. [Electronic resource]. – http://www.thermocalc.com (Date access 11.10.2023).

15 Scientific Group Thermodata Europe. [Electronic resource]. – https://www.sgte.net (Date access 08.01.2024).

16 **Moiseev, G. K., Vatolin, N. A., Marshuk, L. A., Il`iny`x, N. I.** Temperaturny`e zavisimosti privedennoj e`nergii Gibbsa nekotory`x neorganicheskix veshhestv (al`ternativny`j bank danny`x ASTRA OWN) [Temperature dependences of the reduced Gibbs energy of some inorganic substances (alternative data bank ASTRA OWN)]. – Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997. – 230 p.

17 **Laptev, A. A., Belomy`tcev M. Yu., Laptev, A. I.** Mexanicheskie svojstva kremnievy`x splavov [Mechanical properties of silicon alloys] [Text]. // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. – 2014. – № 5. – P. 47–50.

18 **Akberdin, A. A., Kim, A. S., Sultangaziev, R. B., Orlov, A. S.** The method of mathematical description of the phase composition diagrams // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – Vol. 25. – P. 79–84.

19 **Kim, A. S., Akberdin, A. A., Lu, N. Y. U., Sultangaziyev, R. B., Orlov, A. S.** Diagram of the equilibrium phase composition of the fe – cr – si – b system / Metalurgija. – 2022. – Vol. 61. – № 2. – P. 305–308.

20 **Akberdin, A. A., Kim, A. S., Sultangaziev, R. B., Orlov, A. S.** The method of mathematical description of the phase composition diagrams // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – Vol. 25. – P. 79–84.

Поступило в редакцию 10.06.25.
Поступило с исправлениями 02.07.25.
Принято в печать 05.08.25.

***А. А. Акбердин[1], А. С. Ким[2], Р. Б. Султангазиев[3],***
***А. С. Орлов[4], *Г. Х. Адамова[5]***
[1,2,4]Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3,5]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
10.06.25 ж. баспаға түсті.
02.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
05.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

# NI-B-SI ЖҮЙЕСІНІҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМ ДИАГРАММАСЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

*Ni-B-SI жүйесінің фазалық құрамының диаграммасы жасалды. Онда $Ni_3B$, $Ni_2B$, $Ni_4B_3$, NiB боридтерінің және $Ni_3Si$, $Ni_5Si_2$, $Ni_2Si$, $Ni_3Si_2$, NiSi, NiSi никель силицидтерінің, сондай - ақ $SiB_6$, $SiB_4$ бор силицидтерінің және екі үштік қосылыстардың- $Ni_{11}Si_5B_4$ және $Ni_6Si_2B$ болуы ескерілді. Диаграмма қарапайым үшбұрыштардың жиынтығы болып табылады тепе-теңдік қатар өмір сүретін фазалар. Триангуляция зерттелетін жүйеде 17 қарапайым үшбұрыштың болуын анықтады. Өзіндік әдісті қолдана отырып, заттың (металдың) бастапқы элементтері мен түзілетін фазалар арасындағы байланыс теңдеулері болып табылатын диаграмманың математикалық моделі құрылды. Алынған теңдеулер бойынша компьютерлік бағдарлама жасалды. Ол қашықтан басқару пультінен металдың химиялық құрамы мен іске қосу кезінде металл орналасқан қарапайым үшбұрышты тауып, барлық фазалардың мазмұнын массалық пайызбен береді. Модельді қолдану мысалы көрсетілген. Металдардың есептелген және эксперименталды түрде анықталған фазалық құрамының сәйкес келуі қанағаттанарлық. Ni-B-si жүйесінің фазалық құрамының диаграммасы жасалды, оның математикалық моделі және оның негізінде компьютерлік бағдарлама жасалды. Оның өнімділігі қорытпалардың фазалық құрамы бойынша есептелген және эксперименталды алынған деректерді салыстыру арқылы көрсетіледі.*

*Кілтті сөздер: фаза, триангуляция, диаграмма, математикалық модель, компьютерлік бағдарлама.*

***A. A. Akberdin[1], A. S. Kim[2], R. B. Sultangaziev[3],***
***A. S. Orlov[4], *G. H. Adamova[5]***
[1,2,4]Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3,5]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 10.06.25.
Received in revised form 02.07.25.
Accepted for publication 05.08.25.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE NI-B-SI SYSTEM PHASE COMPOSITION DIAGRAM

*A diagram of the phase composition of the Ni-B-Si system is constructed. The presence of borides $Ni_3B$, $Ni_2B$, $Ni_4B_3$, NiB and nickel silicides $Ni_3Si$, $Ni_5Si_2$, $Ni_2Si$, $Ni_3Si_2$, NiSi, NiSi, as well as boron silicides $SiB_6$, $SiB_4$ and two ternary compounds $Ni_{11}Si_5B_4$ and $Ni_6Si_2B$ is taken into account. The diagram is a set of elementary triangles of harmoniously coexisting phases. Triangulation revealed the presence of 17 elementary triangles in the studied system. Using our own method, a mathematical model of the diagram has been created, representing the equations of the relationship between the initial elements of a substance (metal) and the resulting phases. A computer program has been created based on the obtained equations. When set from the remote control of the chemical composition of the metal and the trigger, it finds the elementary triangle where the metal is located and outputs the content of all phases in mass percentages. An example of using the model is shown. The coincidence of the calculated and experimentally determined phase composition of metals is satisfactory. A diagram of the phase composition of the Ni-B-Si system has been constructed, its mathematical model and a computer program based on it have been created. Its operability is shown by comparing calculated and experimentally obtained data on the phase composition of alloys.*

*Keywords: phase, triangulation, diagram, mathematical model, computer program.*

МРНТИ 53.43.33

https://doi.org/10.48081/APSR7381

***А. В. Богомолов[1], А. К. Жунусов[2], Ж. Б. Кажмухамбетов[3], С. С. Спанов[4], А. К. Жунусова[5]**

[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

*e-mail: bogomolov71@mail.ru

# *СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТНОГО ПЕРЕДЕЛА ПОМОЛЬНЫХ ШАРОВ ДИАМЕТРОМ 125 ММ*

*Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований по совершенствованию технологического процесса получения мелющих шаров диаметром 125 мм с повышенным уровнем эксплуатационных свойств для горнодобывающей отрасли Казахстана и металлургического комплекса.*

*Потребность в мелющих шарах различного сортамента и твердости постоянно увеличивается. В настоящий момент шары диаметром 125 мм импортируются из Китая. В связи с этим актуальной тенденцией является расширение номенклатуры производимых мелющих тел в Республике Казахстан.*

*Одним из определяющих подходов при обосновании оптимального технологического процесса производства шаров является расчет калибровки технологического инструмента шаропрокатного стана. В работе приведен расчет калибровки прокатных валков для прокатки шара диаметром 125 мм, при этом диаметр валков составлял 440–460 мм.*

*По результатам компьютерного моделирования был получен график зависимости интенсивности деформаций в зависимости от изменения радиуса перемычки деформируемой заготовки при прокатке шаров.*

*Сравнительный анализ механических характеристик, а именно твердости полученных шаров по сечению показал, что твердость на поверхности шара и на глубине до 20 мм составляет порядка 55–58 HRC. Внутренние слои металла имеют сниженную, но относительно равномерную по распределению твердость, что подтверждает хорошее качество структуры металла. Дефектов металла в центральной зоне не обнаружено.*

*Ключевые слова: шар, прокат, сталь, калибровка, интенсивность деформаций, твердость.*

**Введение**

Одной из основных отраслей экономики Республики Казахстан является горно-металлургическая отрасль. Использование новых рудных месторождений, в том числе прочных и упорных полиметаллических руд, повышает потребность горно-обогатительных предприятий в мелющих телах [1, с.36].

Каждое рудное месторождение имеет свои индивидуальные особенности материалов. Современные технологии измельчения рекомендуют для грубого помола рудных материалов использовать крупные шары диаметром 110–125 мм. Потребность в мелющих шарах различного сортамента и твердости постоянно увеличивается. В настоящий момент шары диаметром 125 мм импортируются из Китая. В связи с этим актуальной тенденцией является расширение номенклатуры производимых мелющих тел в Республике Казахстан.

Анализ зарубежных источников [2, с.152], также показывает, что для повышения качества и производительности процесса измельчения рудных материалов в шаровых мельницах на первоначальном этапе дробления рекомендуется использовать мелющие тела диаметра не менее 100–125 мм.

На рынке Казахстана постепенно происходит освоение производства новых видов помольных шаров большого диаметра, что требует проведения теоретических и экспериментальных исследований для разработки и совершенствования технологии их прокатки и дальнейшей термической обработки с обеспечением эксплуатационных характеристик [3, с. 130].

Известно [4; 5; 6; 7; 8], что существующие подходы к обоснованию оптимального технологического процесса производства шаров базируются на различных этапах, основными из которых являются: выбор марки материала, технология выплавки и непрерывной разливки, рациональное проектирование инструмента и разработка технологии обработки давлением, термическая обработка и контроль качества продукции.

Целью исследования является разработка эффективной калибровки для совершенствования технологического процесса получения мелющих шаров диаметров 125 мм в условиях павлодарских предприятий.

**Материалы и методы**

В таблице 1 указана марка стали, рекомендуемая базовым предприятием для производства шаров диаметром 125 мм. Химический состав исходных непрерывнолитых заготовок должен соответствовать указанным пределам.

Таблица 1 –Требования к химическому составу стали для шаров

| Химические элементы, % | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Требуемый состав | min | 0,57 | 0,25 | 0,75 | - | - | 0,20 | - | - |
| для шара Ø125 мм | max | 0,63 | 0,32 | 0,90 | 0,025 | 0,025 | 0,30 | 0,2 | 0,2 |

При проведении исследований использовались действующие стандартные методы исследования химического состава стали (ГОСТ 12344, ГОСТ 12345, ГОСТ 12346, ГОСТ 12347, ГОСТ 12348, ГОСТ 12350, ГОСТ 12351, ГОСТ 12355),

методы определения твердости помольных шаров (ГОСТ 9013, ГОСТ 9012), современное лабораторное оборудование, установленное в лабораториях кафедры «Металлургия» Торайгыров университета: Портативный рентгенофлуоресцентный анализатор, твердомер ТК (по Роквеллу), лупа Бринеля МПБ-2, принятые в науке математические методы обработки результатов экспериментов. Шлифы образцов из стали перед визуальным контролем протравливали 1 мин в 4 %-ном растворе азотной кислоты.

При разработке калибровки в качестве исходных данных учитывали геометрические размеры валков, применяемых в данной конструкции шаропрокатного стана. Для расчета использовали номинальный диаметр шара с учетом максимальных допускаемых отклонений по ГОСТ 7524-89 «Шары стальные горячекатаные для шаровых мельниц». При проектировании рабочего профиля технологического инструмента учитывали постоянство объема металла в процессе деформирования; соответствие калибра значению коэффициента вытяжки прокатываемой заготовки. С учетом особенностей поперечно-винтовой прокатки для исключения разрыхления структуры металла в осевой зоне заготовки обжатие планировали узкими участками [9].

Компьютерное моделирование выполняли с помощью модулей пакета прикладных программ «Компас-3D».

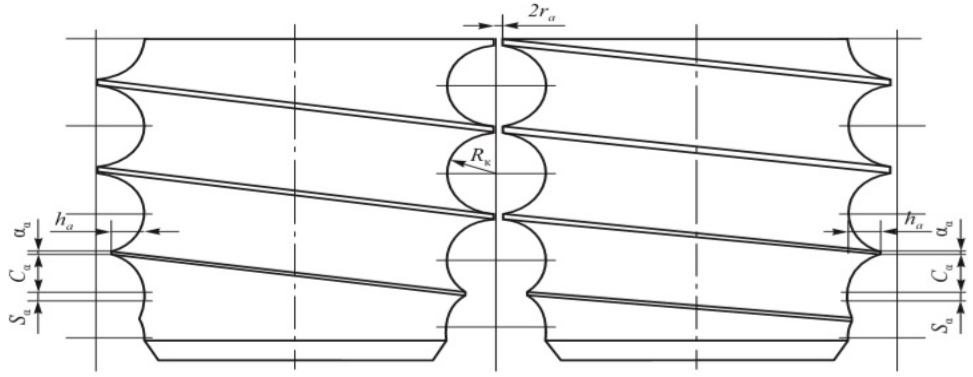
Результаты и обсуждение

Выполнен расчет калибровки валков шаропрокатного стана для прокатки шара номинальным диаметром $d_{ш}$ = 125 мм. В таблице 2 приведены основные исходные данные для проектирования калибров прокатных валков.

На рисунке 1 приведена схема с указанием основных геометрических размеров калибра шаропрокатных валков.

Таблица 2 – Исходные данные для калибровки

| Диаметр $d_m$, мм | $d_в$, мм | Протяженность участков калибра, α° | | Зазор 2r, мм | Геометрические размеры реборды, мм | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $α_{общ}$ | $α_{отд}$ | | Высота на участке захвата заготовки | Ширина на отделочном участке | Ширина на участке 270 ° от захвата |
| 100-125 | 180-310 | 900-1080 | 540-720 | 2,9-3,1 | 2,4-3,7 | 3,6-5,3 | 2,1-2,5 |




Основные размеры, мм, прокатных валков:
$h_a$ и $a_a$ – высота и ширина реборды валка; $C_a$ и $S_a$ – ширина сферического и цилиндрического участков калибра;
$r_a$ и $R_к$ – радиусы перемычки и калибра

Рисунок 1 – Основные размеры прокатных валков

Расчетный диаметр калибра с учетом температурного расширения металла при температуре деформирования составит:

$$d_к = d_ш \cdot \eta_t = 123,6 \cdot 1,013 = 125,2 \text{ мм}$$

где $\eta_t = 1,013$ – коэффициент, учитывающий линейное расширение металла при температуре прокатки;

Результаты расчета геометрических параметров реборды приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетные данные геометрических параметров реборды

| Параметр | Обозначение | Значение, мм |
|---|---|---|
| Минимальная ширина | a | 3,8 |
| Начальная высота | $h_0$ | 5,2 |
| Минимальный радиус перемычки | r | 3,1 |
| Ширина реборды перед отрезкой | $a_{отр}$ | 11,2 |

В соответствии с технологическим процессом прокатки в технологическим инструменте выделяют формовочный участок, где выполняется основное деформирование заготовки и формирование профиля шара, и отделочный участок, где происходит окончательная отделка сформированной поверхности шара.

Для определения участков протяженности калибра валков шаропрокатного стана величина поверхности рассматривается как развертка винтовой линии в градусах угла поворота валков. При определении радиусов перемычки использовали рекомендации [10].

Результаты расчета предварительной калибровки валков показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета предварительной калибровки

| Угол поворота валка α, ° | Высота реборды $h_{\alpha-90}$, мм | Радиус $R_{\alpha-90}$, мм | Параметр $C_{\alpha}$, мм |
|---|---|---|---|
| 1260 | 5,22 | 57,45 | 25,00 |
| 1170 | 14,27 | 48,40 | 39,82 |
| 1080 | 23,32 | 39,35 | 48,80 |
| 990 | 32,37 | 30,30 | 54,85 |
| 900 | 41,42 | 21,25 | 58,95 |
| 810 | 50,47 | 12,20 | 61,45 |
| 720 | 59,55 | 3,20 | 62,58 |
| 630 | 59,55 | 3,20 | – |
| 540 | 59,55 | 3,20 | – |

Далее было выполнено компьютерное моделирование процесса прокатки шаров, причем рабочий профиль деформирующего инструмента соответствовал разработанной калибровке для шара диаметром 125 мм.

На рисунке 2 показано значение интенсивности пластических деформаций при поперечно-винтовой прокатке шара. Максимальное значение интенсивности деформаций имеется на формующем участке калибра в зоне внедрения реборды шаропрокатного валка в область заготовки.

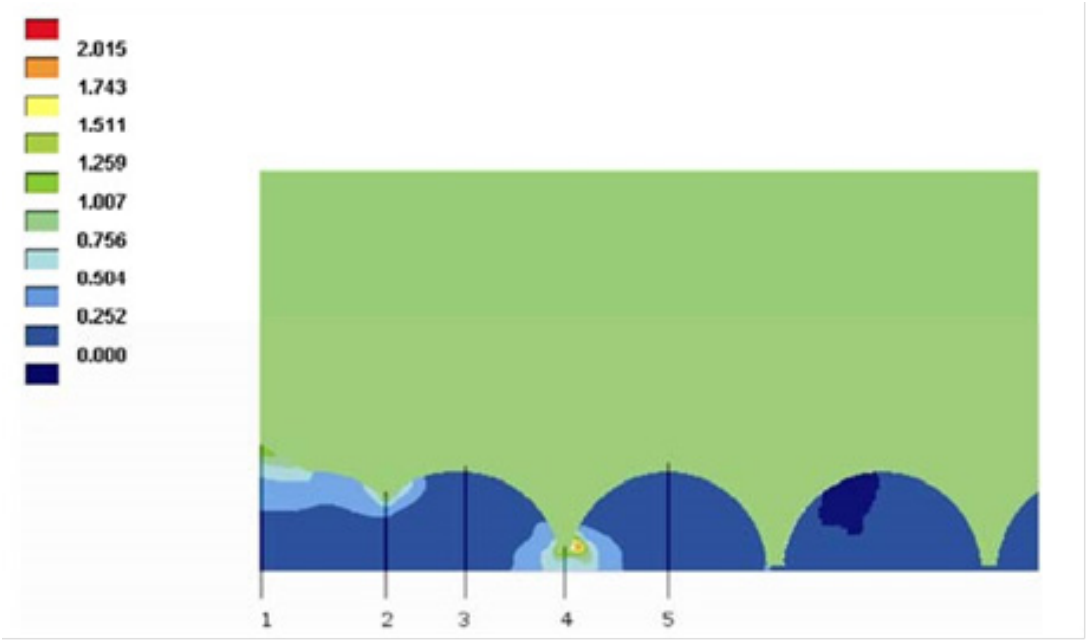



Рисунок 2 – Интенсивность пластических деформаций в области верхней половины шара

По разработанной технологии прокатки была получена опытная партия шаров диаметром 125 мм, которые после стандартной термообработки исследовали в лабораторных условиях на продольных и поперечных темплетах. Проведенный визуальный осмотр показал отсутствие видимых дефектов в центральной области

шара. После этого было произведено измерение твердости по Роквеллу. На рисунке 3 приведены гистограммы результатов распределения твердости шара диаметром 125 мм.

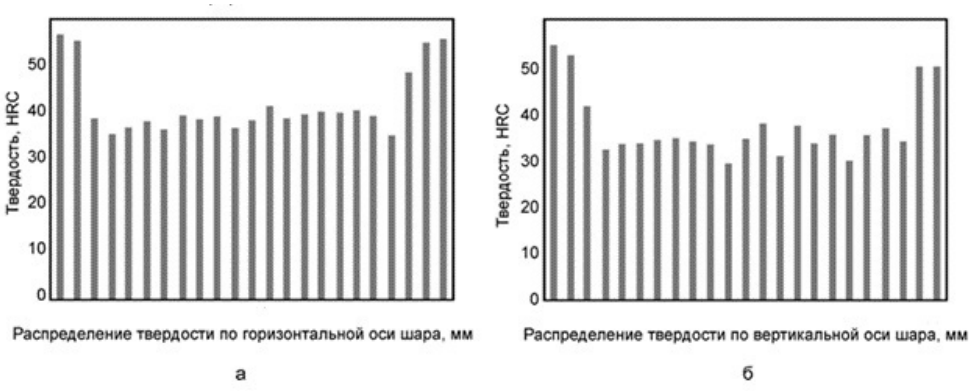



Рисунок 3 – Распределение твердости HRC по осям шара

По результатам термообработки в линии шаропрокатного стана получился поверхностный износостойкий слой толщиной примерно 20 мм, с твердостью порядка 55–58 HRC (среднее значение 55,6). При этом за счет неполной прокаливаемости в средней зоне шара получена более низкая твердость порядка 35–42 HRC (среднее значение 38,5). Такой уровень твердости подтверждает отсутствие раковин и пористости металла в средней части шара.

Следует отметить, что такой уровень твердости обеспечивает готовым шарам повышенный уровень потребительских свойств. Повышенная твердость поверхности обеспечивает стабильную работу на истирание и устойчивость к абразивному износу. Вязкая сердцевина предохраняет шары от хрупкого разрушения при ударных нагрузках [11, с.21].

**Выводы**

1 Разработана калибровка прокатных валков для получения мелющего шара диаметром 125мм.

2 Получена картина распределения интенсивности деформации в процессе прокатки шаровой заготовки, наибольшее значение 1,62 она достигает на формующем участке калибра в зоне внедрения реборды шаропрокатного валка в область заготовки.

3 Полученный уровень твердости обеспечивает готовым шарам повышенный уровень потребительских свойств. Повышенная твердость поверхности порядка 55–58 HRC обеспечивает стабильную работу на истирание и устойчивость к абразивному износу.

**Информация о финансировании**

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту AP26198363 «Повышение потребительских свойств стали и ферросплавов на этапе комплексного металлургического передела в условиях замкнутого цикла производства».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Сембаев, Н. С.** Основные способы механического измельчения и дисперсионного анализа твердых тел / Н. С. Сембаев, Г. Д. Бозымбаев [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2008. – № 2. – С. 35–45.

2 **Xiao-min, S.** Numerical simulation of Al ball forming process in skew rolling / Shi Xiao-min, Wang Bao-yu [Текст] // Materials Science Forum. – 2011. – P. 151–154. – [Электронный ресурс]. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.151

3 **Сержанов, Р. И.** Формирование прокатного производства в павлодарском регионе: проблемы и перспективы / Р. И. Сержанов, А. В. Богомолов [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2005. – № 3. – С. 128–134.

4 **Pater, Z.** A helical wedge rolling process for producing a ball pin / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, S. Martyniuk [Текст] // Procedia Manufacturing 27. – 2019. – P. 27–32. – https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.039

5 **Pater, Z.** Analysis of the helicall-wedge rolling process for producing a workholding bolt / Zbigniew Pater [Текст] // METABK 53(4). – 2014. – P. 653–656. – [Электронный ресурс]. – https://hrcak.srce.hr/file/180694

6 **Sokhan, D.** Modeling ball rolling in spiral rolls / D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko [Текст] // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – Vol 83. – № 2. – P. 24–30. – https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.117012

7 **Рубцов, В. Ю.** Обзор зарубежных исследований в области поперечно-винтовой прокатки при производстве стальных мелющих шаров и осесимметричных профилей / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко [Текст] // Калибровочное бюро. – 2019. – № 15. – С. 24–36.

8 **Найзабеков А. Б.** Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства А. Б. Найзабеков, Б. С. Мухаметкалиев, А. С. Арбуз, С. Н. Лежнев. – [Текст] // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2016. – № 4 (46). – С. 78–86.

9 **Котенок В. И.** Развитие теории формообразования профилей винтовых калибрах и создание высокоэффективных процессов и оборудования для прокатки деталей машин: Дис. на соиск. степени д-ра техн. наук: 05.03.05 Процессы и технологии обработки материалов давлением/ Котенок Владимир Иванович [Текст]. – Москва. – 2005. – 342 с.

10 **Протасьев В. Б.** Проектирование валков для горячей поперечно винтовой прокатки заготовок без дефектов в осевой зоне / В. Б. Протасьев, Н. Н. Батова [Текст] // Черные металлы. – 2020. – № 3 (1059). – С. 42–47.

11 **Шведов, К. Н.** Получение мелющих шаров с высокой поверхностной и нормированной объемной твердостью / К. Н. Шведов, И. К. Галимьянов, М. А. Казаковцев [Текст]// Металлург. – 2020. – № 6. – С. 16–22.

REFERENCES

1 **Sembaev, N. S.** Osnovny`e sposoby` mexanicheskogo izmel`cheniya i dispersionnogo analiza tverdy`x tel / N. S. Sembaev, G. D. Bozy`mbaev [The main methods of mechanical crushing and dispersion analysis of solids][Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2008. – № 2. – P. 35–45.

2 **Xiao-min, S.** Numerical simulation of Al ball forming process in skew rolling / Shi Xiao-min, Wang Bao-yu [Text] // Materials Science Forum. – 2011. – P. 151–154. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.151

3 **Serzhanov, R. I.** Formirovanie prokatnogo proizvodstva v pavlodarskom regione: problemy` i perspektivy` / R. I. Serzhanov, A. V. Bogomolov [The formation of rolling production in the pavlodar region: problems and prospects] [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2005. – № 3. – P. 128–134.

4 **Pater, Z.** A helical wedge rolling process for producing a ball pin / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, S. Martyniuk [Текст] // Procedia Manufacturing 27. – 2019. – P. 27–32. – https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.039

5 **Pater, Z.** Analysis of the helicall-wedge rolling process for producing a workholding bolt / Zbigniew Pater [Текст] // METABK 53(4). – 2014. – P. 653–656. – [Электронный ресурс]. – https://hrcak.srce.hr/file/180694

6 **Sokhan, D.** Modeling ball rolling in spiral rolls / D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko [Текст] // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – Vol 83. – № 2. – P. 24–30. – https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.117012

7 **Rubczov, V. Yu.** Obzor zarubezhny`x issledovanij v oblasti poperechno-vintovoj prokatki pri proizvodstve stal`ny`x melyushhix sharov i osesimmetrichny`x profilej / V.Yu. Rubczov, O.I. Shevchenko [Review of foreign research in the field of transverse screw rolling in the production of steel grinding balls and axisymmetric profiles] [Text] // Calibration Bureau. – 2019. – № 15. – P. 24–36.

8 **Najzabekov A. B.** Snizhenie rasxoda stal`ny`x melyushhix sharov putem uluchsheniya texnologii ix proizvodstva A. B. Najzabekov, B. S. Muxametkaliev, A. S. Arbuz, S. N. Lezhnev. [Reducing the consumption of steel grinding balls by improving their production technology] [Text] // Vesti vy`sshix uchebny`x zavedenij Chernozem`ya. – 2016. – № 4(46). – P. 78–86.

9 **Kotenok V. I.** Razvitie teorii formoobrazovaniya profilej vintovy`x kalibrax i sozdanie vy`sokoe`ffektivny`x processov i oborudovaniya dlya prokatki detalej mashin: Dis. na soisk. stepeni d-ra texn. nauk: 05.03.05 Processy` i texnologii obrabotki materialov davleniem/ Kotenok Vladimir Ivanovich [Development of the theory of profile shaping in screw calibers and creation of highly efficient processes and equipment for rolling machine parts] [Text]. – Moscow. – 2005. – 342 p.

10 **Protas`ev V. B.** Proektirovanie valkov dlya goryachej poperechno vintovoj prokatki zagotovok bez defektov v osevoj zone / V. B. Protas`ev, N. N. Batova [Design of rolls for hot cross-helical rolling of billets without defects in the axial zone] [Text] // Cherny`e metally`. – 2020. – № 3 (1059). – P. 42–47.

11 **Shvedov, K. N.** Poluchenie melyushhix sharov s vy`sokoj poverxnostnoj i normirovannoj ob``emnoj tverdost`yu / K. N. Shvedov, I. K. Galim`yanov, M. A. Kazakovcev [Production of grinding balls with high surface and normalized volume hardness] [Text] // Metallurgist. – 2020. – № 6. – P. 16–22.

Поступило в редакцию 28.07.25.
Поступило с исправлениями 31.07.25.
Принято в печать 13.08.25.

***А. В. Богомолов[1], А. Қ. Жүнісов[2], Ж. Б. Қажмұхамбетов[3],***
***С. С. Спанов[4], А. Қ. Жүнісова[5]***
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
28.07.25 ж. баспаға түсті.
31.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
13.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ДИАМЕТРІ 125 ММ ҰНТАҚТАУ ШАРЛАРДЫ ИЛЕМДЕУ АРҚЫЛЫ ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ

*Қазақстанның тау-кен металлургиялық кешені үшін пайдалану қасиеттерінің деңгейі жоғарылатылған, диаметрі 125 мм ұнтақтау шарларды алудың технологиялық процесін жетілдіру бойынша компьютерлік модельдеу мен эксперименттік зерттеулердің нәтижелері ұсынылған.*

*Әртүрлі сұрыптамадағы және қаттылықтағы ұнтақтау шарларға деген қажеттілік үнемі артып келеді. Қазіргі уақытта диаметрі 125 мм шарлар Қытайдан импортталады. Осыған байланысты Қазақстан Республикасында өндірілетін ұнтақтайтын денелердің номенклатурасын кеңейту өзекті үрдіс болып табылады.*

*Шарларды өндірудің оңтайлы технологиялық процесін негіздеу кезіндегі айқындаушы тәсілдердің бірі шар илемдеу стан технологиялық құралының калибрленуін есептеу болып табылады. Жұмыста диаметрі 125 мм шарды илемдеуге арналған илемдеу біліктерінің калибрленуінің есебі келтірілген, бұл ретте біліктердің диаметрі 440–460 мм құрады. Компьютерлік модельдеу нәтижелері бойынша шарларды илемдеу кезінде деформациялар қарқындылығының аралықтың радиусына тәуелділігі анықталды.*

*Алынған шарлардың қимасы бойынша механикалық сипаттамаларын, атап айтқанда қаттылығын салыстырмалы талдау қалыңдығы 20 мм негізгі беткі қабаттарының едәуір жоғары 55–58 HRC қаттылығы бар екенін көрсетті. Зерттеу нәтижелері бойынша шардың тікелей орталық аймағында қаттылықтың төмендеуі байқалмады, бұл ішкі ақаулардың жоқтығын және ішкі қабаттар металының жақсы сапасын көрсетеді.*

*Кілтті сөздер: шар, илем, болат, калибрлеу, деформация қарқындылығы, қаттылық.*

***A. V. Bogomolov[4], A. K. Zhunussov[2], Zh. B. Kazhmukhambetov[3], S. S. Spanov[4], A. K. Zhunusova[5]***
[1,2,3,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 28.07.25.
Received in revised form 31.07.25.
Accepted for publication 13.08.25.

## IMPROVING THE TECHNOLOGY OF ROLLING GRINDING BALLS WITH A DIAMETER OF 125 MM

*The results of computer simulations and experimental studies aimed at improving the technological process for manufacturing grinding balls with a diameter of 125 millimeters and enhanced operational properties for use in the mining industry in Kazakhstan and the metallurgical sector are presented.*

*The demand for grinding balls of different grades and hardness is constantly growing. At the moment, balls with a diameter of 125 millimeters are imported from China. Therefore, the current trend is to increase the range of grinding media manufactured in the Republic of Kazakhstan.*

*One of the key aspects in determining the optimal technological process for producing balls is the calculation of the sizing of the equipment used in a ball rolling mill. This paper presents a calculation of the sizing for rolling rolls used to produce a ball with a diameter of 125 millimeters, while the rolls have a diameter of between 440 and 460 millimeters.*

*Based on the results of computer simulations, the relationship between the intensity of deformations and the radius of the bridge while the ball is rolling has been determined.*

*A comparative analysis of the mechanical properties, specifically the hardness of the resulting balls in cross-section, revealed that the main subsurface layers, with a thickness of approximately 20 millimeters, have a significantly increased hardness ranging from 55 to 58 HRC. Based on the findings of the study, there were no hardness failures directly in the center of the ball, indicating the absence of internal flaws and the good quality of the metal in the inner layers.*

*Keywords: ball, rolled products, steel, calibration, strain intensity, hardness.*

***МЕТАЛЛУРГИЯ***

SRSTI 53.31.21

https://doi.org/10.48081/HDZN1113

***A. Burumbayev[1], A. Akhmetov[2], A. Zhakan[3],***
***Ye. Myngzhassar[4], O. Yucel[5]***
[1]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;
[1,2,3,4]Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[5]Istambul Technical University, Turkey, Istanbul.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5276-2259
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1606-838X
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3810-0528
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4268-5664
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3879-0410
*e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru

## *RESEARCH OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF CHARGE MATERIALS FOR THE SYNTHESIS OF SILICON CARBIDE*

*This article discusses the results of determining the specific electrical resistance (SER) of charge materials consisting of highly dispersed silica and petroleum coke, as well as the pyrolysis product of rice husks for the synthesis of silicon carbide. The high proportion of the formation of highly dispersed silica in the production of high-silicon grades of ferroalloys and metallurgical silicon requires the development of new technologies for the further disposal of man-made dust waste containing from 86 to 95.8 % $SiO^2$. A similar solution is required by the by-product of rice production – rice husk, which almost does not burn, does not rot and is mainly sent to the dump, polluting the environment. A promising solution to these problems is the production of silicon carbide using these materials. For this purpose, in this work, work has been carried out to determine their SER in the Tamman laboratory furnace on a special pilot plant in the temperature range of 20 – 1700 °C at a heating rate of 15 degrees/min The electrical resistance of charge materials at specified temperatures determines the possibilities of synthesis of silicon carbide.*

*Keywords: electrical resistanse, microsilicon, microsilica, petroleum coke, pyrolysis, rice husk, silicon carbide, waste, recycling.*

### Introduction

Currently, there is a significant demand for silicon carbide (SiC), as it has chemical stability, high resistance to elevated temperatures, and a number of other special properties. Significant progress has been made both in the technology of abrasive and semiconductor SiC, as well as in the technology of devices based on it, high-temperature heaters, refractory ceramics, etc. There is a rapid modernization of the technology for obtaining SiC, increasing its production and improving their parameters. The method of

producing SiC proposed and patented by Acheson is the basis of industrial production. According to the Acheson method, low-ash carbon reducing agents are added to quartz sand and heat treatment is performed by passing current through carbon electrodes. The temperature with this method reaches 2500 – 2600 °C. Usually obtaining SiC in this way is a laborious and lengthy process that lasts about 40 hours. SiC synthesized by the Acheson method is used for the manufacture of abrasive tools [1, p. 31].

There are two main modifications of SiC: cubic β(3C)-SiC and hexagonal α-SiC. The α-SiC modification combines a large number of similar structural forms of structure – polytypes, the number of which is known to science is more than 200, and apparently their number is unlimited [2, p. 19]. To describe the existing SiC polytypes, Ramsdel designations are used, which consist of a number indicating the number of layers in the period of recurrence, and the letters H, R or C, depending on the elementary lattice of polytypes [3, p. 9].

On an industrial scale, SiC is produced in electric furnaces using a charge consisting of carbonaceous reducing agent and quartz sand. The furnace is a self-propelled platform, at the ends of which there are current-carrying carbon electrodes.

A typical production process looks like this. A return, quartz sand is poured onto the bottom of the platform, and then a core is laid out from a lump of petroleum coke, which is the working resistance in the initial period of the process. A reaction charge is poured on top of the core. Only low-ash carbonaceous materials can be used as a reducing agent: anthracite (3 % ash, 93 % Csolid); petroleum coke (0.8 % ash, 94 % Csolid, 5 % volatile substances, 3 % moisture). 50–65 tons of charge and 3,200 – 4,500 kg of core are loaded into the furnace, then it is connected to a furnace transformer. The process of obtaining SiC is controlled mainly by electricity consumption. The share of electric energy in the cost structure of silicon carbide of abrasive quality is 50 – 60 %, when loading charge materials 60 – 70 tons, the yield of marketable products is 10.5 – 11.5 tons (15 – 19 %). Therefore, ensuring maximum product yield with rational consumption of electrical energy is an important production task. The main criterion for controlling the energy regime is the characteristic of charge materials and the type of SiC obtained [4, p. 606].

The possibility of reducing the cost of SiC synthesis lies in the use of man–made waste as the initial charge - microsilicon (microsilica), rice husk and petroleum coke. Microsilicon and rice husks are sufficiently dispersed materials with a high content of SiO2, and petroleum coke is a fairly clean source of carbon.

According to research data, when processing 1 ton of rice grain, about 160 – 170 kg of rice husk is formed. It is a fibrous substance, it contains moisture, cellulose, lignin and some minerals consisting of 90 – 97 % silicon dioxide [5, p. 12]. Pyrolysis of rice husks makes it possible to obtain raw materials with a high carbon content from it, which makes it an attractive low-cost material for use as a carbon-containing component in the SiC synthesis process.

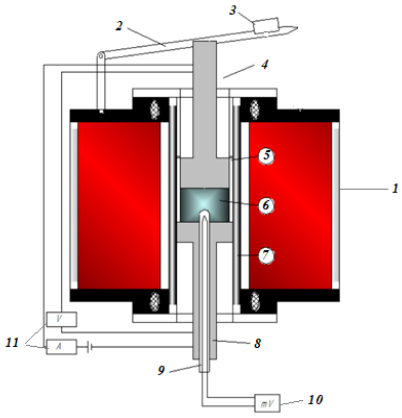
Initially, the dispersed state of the proposed charge materials requires a thorough study of their physico-chemical properties, in particular, SER, which mainly reflects their suitability for synthesis by the Acheson method.

**Materials and methods**

The study of the electrophysical properties of charge materials makes it possible to determine the effectiveness of obtaining the finished product. It is known that the SER value of charge materials depends on temperature.

Figure 1 shows the scheme of the installation for determining the SER according to the method of V. Zhuchkov, used in the work.

A lot of work has been devoted to measuring the SER of carbonaceous reductants, but in experimental work the V. Zhuchkov method has become widely used, which allows determining the SER at high temperatures together with simultaneous determination of the softening of the studied materials [6;7].




1 – Tamman furnace; 2 – load holder; 3 – load; 4 – asbestos cover; 5 – corundum tube; 6 – test material; 7 – graphite tube 8 – electrode; 9 – thermocouple connector; 10 – VR 5/20; 11 – SER installation

Figure 1 – Installation for determining the SER

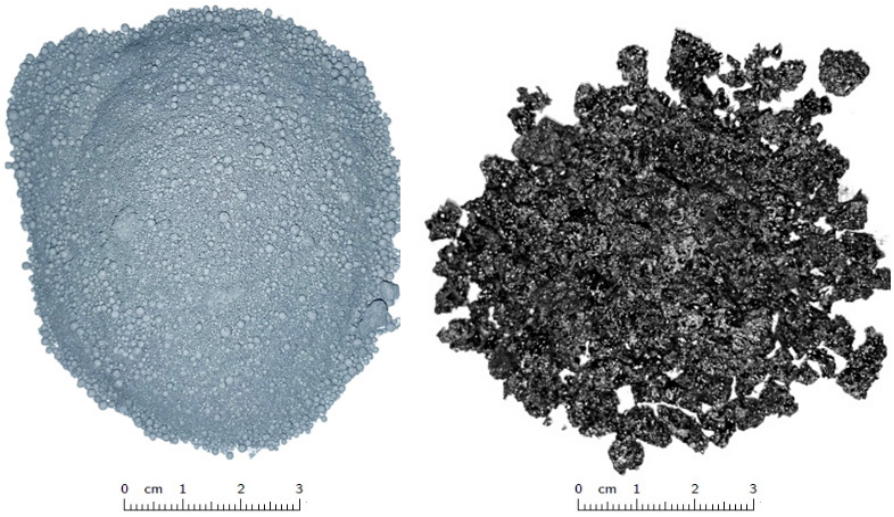
The installation shown in Figure 1 is based on the Tamman furnace.

In this work, the basic object of the ore part of the charge is microsilicon with petroleum coke, and the pyrolysis product of rice husks. A sample of microsilicon was selected for experimental work. Table 1 shows the chemical composition of microsilicon.

Table 1 – Chemical composition of microsilicon, %

| $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | Fecommon | MgO | Pcommon | C. L. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 94.35 | 0.35 | 4.94 | 0.13 | 0.02 | 0.025 | 2.72 |

Figure 2 shows the appearance of microsilicon and petroleum coke.




a) microsilicon b) petroleum coke

Figure 2 – Charge materials for synthesis

As can be seen from Figure 2, microsilicon is a powdered material consisting of dispersed particles that are formed during the production of high-silicon grades of ferroalloys and metallurgical silicon and accumulate in filters during the gas purification process of technological electric arc furnaces. The main component of the material is amorphous silicon dioxide [8;9].

Table 2 shows the technical composition of the used petroleum coke.

Table 2 – Technical composition of the petroleum coke

| Component | A | W | V | Ccommon | S |
|---|---|---|---|---|---|
| Content, % | 0.12 | 0.70 | 8.08 | 91.17 | 3.27 |

From Table 2, it can be noted the low degree of ash content of the petroleum coke.

The production of a charge mixture consisting of microsilicon and petroleum coke was carried out by mechanical processing in a high-energy Retsch Emax ball mill at a speed of 1200 rpm for 30 minutes. The ratio of the mass of grinding balls to the charge mixture was 2/1.

The resulting mixture was dipped by briquetting on a hydraulic press with a force of 10 tons with the introduction of 5 % liquid glass.

Figure 3 shows the appearance of the rice husk in its original form and after pyrolysis. Pyrolysis of rice husks was carried out at 900 °C with an isothermal exposure of 30 minutes without oxygen access.

a) the original view b) view after pyrolysis

Figure 3 – The appearance of rice husks

From Figure 3, it can be noticed that a significant change in the appearance of rice husks appear associated with the carburization of particles and their grinding as a result of loss of structural strength due to heating.

Rice husks after pyrolysis form silicocarbon, a homogeneous mixture of amorphized silica and carbon containing, %:55 $SiO_2$ and 45 $C_{solid}$ [10, p. 66].

**Research and discussion**

The obtained charge materials were studied using a scanning electron microscope (SEM). Figures 4 and 5 show the SEM images \ of their particles.

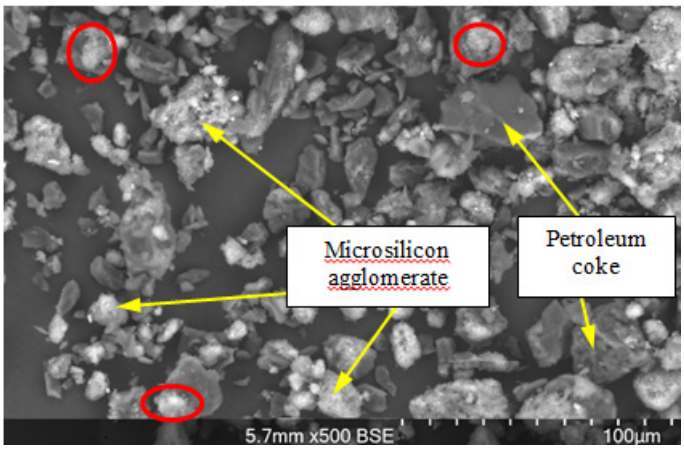



Figure 4 – SEM morphology of charge mixture particles

It can be seen from Figure 4 that, in their initial form, microsilicon particles are characterized by high dispersion and a high degree of agglomeration. The particles of

the petroleum coke are represented by a fragmented morphology, in some areas (circled in red) it can be seen that the silica is smeared on the petroleum coke.

The briquette for the determination of SER was placed in a crucible and heated in the temperature range of 20–1700 °C. A briquette with a mass ratio of $C/SiO_2$ equal to 1/1.5 was chosen for the study of SER.

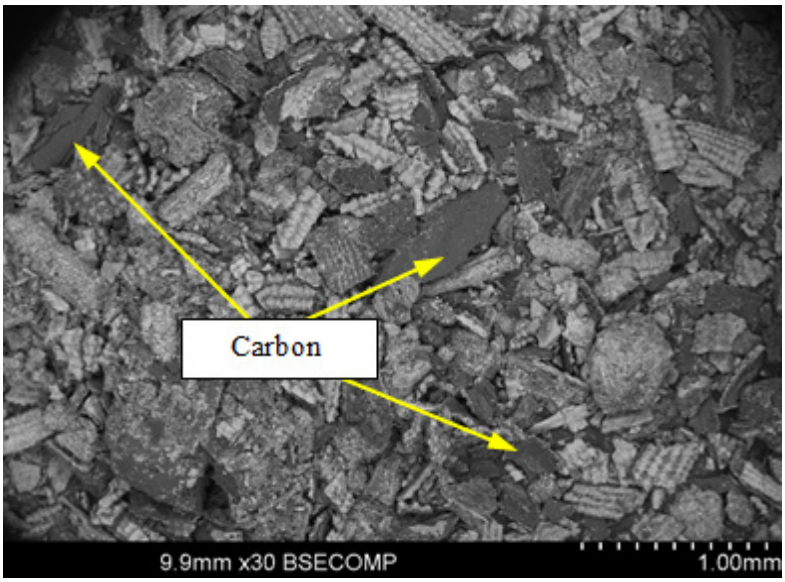



Figure 5 – SEM-drawing of rice husk particles after pyrolysis

Figure 5 shows that after pyrolysis, the carbon formed on the surface of rice husk particles is fairly uniformly distributed in the charge volume. It can be noted that the particle size varies on average in the range of 3–5 microns.

The SER measurement was carried out according to a voltamper circuit. From the power supply, a direct current passed through the electrodes into the material layer. The voltage drop at the ends of the conductor was measured and, according to Ohm's law, we calculate the resistance of the layer. The installation made it possible to measure the electrical resistance of lump materials and charges at temperatures up to 1700 °C. The pressure on the upper electrode was 0.4 kg/cm$^2$, the height of the layer of the test material was 40 mm. The heating rate is 15 degrees/min, the inner diameter of the reaction corumdum tube is 50 mm. The value of the SER was recorded every 20 °C.

The results of the study of the briquette and rice husk after pyrolysis are shown in Figures 6 and 7, respectively.

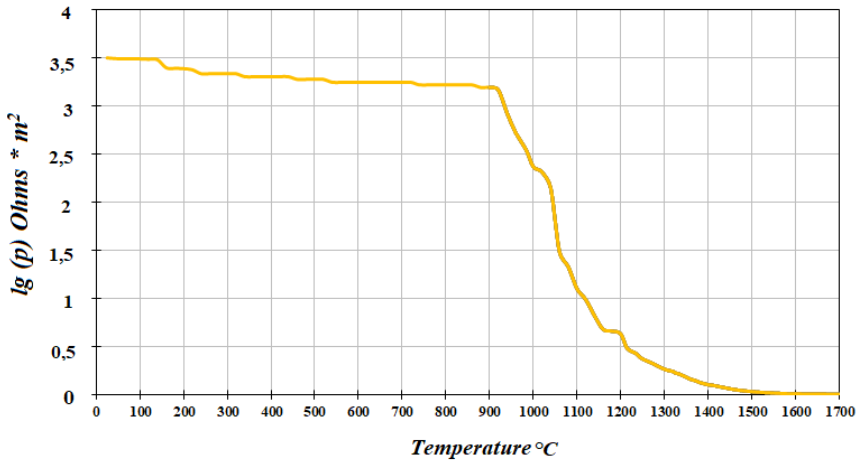



Figure 6 – Dependence of the SER of a briquette made of microsilicon and petroleum coke on temperature

It can be seen from Figure 6 that the SER of the briquetted charge for the synthesis of SiC practically does not change to 900 °C with an increase in temperature and is 3.5 – 3.36 Ohms * m$^2$. When the temperature reaches 960–984 °C, a sharp decrease in SER to 2.4 Ohms * m$^2$ is observed. The electrical resistance of the sample from 984 °C 2.4 Ohms * m$^2$ decreases to 1040 °C had almost the same value of 1.5 Ohms * m$^2$. At a temperature of 1060 °C, the resistance value drops sharply for the second time to 1.28 Ohms * m$^2$. In the range of 1080 – 1200 °C, the electrical resistivity index decreases from 0.9 Ohms * m$^2$ to 0.5 Ohms * m$^2$. The value of the electrical resistivity from 1200 °C as a result of a uniform slow decrease at 1700 °C shows 0.0012 Ohms * m$^2$.

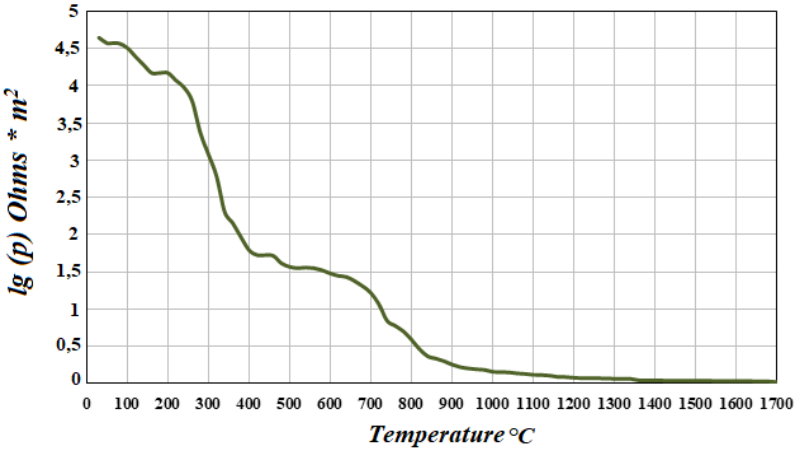



Figure 7 – Dependence of the SER of rice husks after pyrolysis on temperature

With increasing temperature, the electrical resistivity of silicon carbon decreases from 30 °C to 220 °C from 4.64 Ohms * m$^2$ to 4.06 Ohms * m$^2$. At temperatures above

220 °C, the electrical resistivity index drops sharply from 4.06 Ohms * $m^2$ to 1.79 Ohms * $m^2$ at a temperature of 400 °C. Subsequently, with an increase in temperature, the electrical resistivity index drops from 400 to 780 °C from 1.79 to 0.75 Ohms * $m^2$. With a further increase in temperature, the electrical resistivity index gradually decreases at a slow linear level to 0.02 Ohms * $m^2$ at a temperature of 1700 °C.

**Information about financing**

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP27510125)

**Conclusions**

As a result of laboratory work, the indicators of the electrical resistivity of the charge materials were determined. Since during the synthesis of silicon carbide by the Acheson method, formation begins above a temperature of 1700 °C, the research results show that the electrical resistivity of charge materials requires additional preparation to obtain the product.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Семейко, К. В., Малиновский, А. И., Гребеньков, А. Ж., Саенко, С. Ю., Лобач, К. В., Кустовская, А. Д., Ляпощенко, А. А., Склабинский, В. И.** Разработки технологий получения карбида кремния // Обзор Национального исследовательского центра Республики Казахстан. 2021. – №2. – С. 30–41.

2 **Лебедев, А. С., Еремяшев, В. Е., Суздальцев, А. В., Анфилогов, В. Н.** Упрочнение легких металлов и сплавов ультрадисперсным волокнистым карбидом кремния β-модификации // Электро Металлургия. – 2020 – № 1.– С. 17–24.

3 **Агеев, О. А., Беляев, А. Е., Болтовец, Н. С., Кисилев, В. С., Конакова, Р. В., Лебедев, А. А., Миленин, В. В., Орхименко, О. Б., Поляков, В. В., Светличный, А. М., Чередниченко, Д. И.** Карбид кремния: технология, свойства, применение // Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – 2010. – С. 9–10.

4 **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 – Vol. 59. – № 3. – P. 605–611.

5 **Andresen, B.** The metallurgical silicon process revisited. Silicon for the chemical and solar industry // Materials International conference. Norwegian University of Science and technology. – 2010. – P. 11–23.

6 **Махамбетов, Е. Н.** Разработка технологии выплавки комплексных кальцийсодержащих ферросплавов из отвальных металлургических шлаков и высокозольных углей: дис. ... док. PhD : 6D070900. – Караганда, 2021. – 23 с.

7 **Жақан, А. М.** Хром және марганец құрамдас кешенді қорытпаларды балқытуға арналған шикізатты зерттеу және талдау: маг. ... дисс. 7М07203. – Актобе, 2024. – 19 Б.

8 **Жуковский, Т. Ф. Проценко, Е. Л.** Брикетирование отходов производства ферросилиция // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 1.– Р. 4–8.

9 **Rohani, A. B., Rosiyah, N. G.** Production of high purity amorphous silica from rice husk // Procedia Chemistry. – 2016. –V. 19. – P. 189 – 195.

10 **Нгуен Мань Хиен.** Процессы термической переработки рисовой оболочки при получении активированного углеродного сырья и аппаратное обеспечение. Дис. … к.т.н: 05.17.18. – Томск, 2018. – С. 66.

REFERENCES

1 **Semeiko, K. V., Malinovski, A. I., Grebenkov, A. Zh., Saenko, S. Yu., Lobach, K. V., Kustovskaya, A. D., Lyaposhhenko, A. A., Sklabinskij, V. I.** Razrabotki texnologi polucheniya karbida kremniya [Development of technologies for the production of silicon carbide] // Review of the National Research Center of the Republic of Kazakhstan. 2021. – № 2. – P. 30–41. (In Russian)

2 **Lebedev, A. S., Eremyashev, V. E., Suzdalcev, A. V., Anfilogov, V. E.** Uprochnenie legkix metallov i splavov ultradispersnym voloknistym karbidom kremniya β-modifikacii [Hardening of light metals and alloys with ultrafine fibrous silicon carbide β-modification] // Elektro Metallurgiya. 2020. – № 1. – P. 17–24. (In Russian)

3 **Ageev, O. A., Belyaev, A. E., Boltovec, N. S., Kisilev, V. S., Konakova, R. V., Lebedev, A. A., Milenin, V. V., Orximenko, O. B., Polyakov, V. V., Svetlichny`j, A. M., Cherednichenko, D. I.** Karbid kremniya: texnologiya, svoistva, primenenie [Silicon carbide: technology, properties, application] // The state and prospects of development of functional materials for science and technology. 2010. – P. 9–10. (In Russian)

4 **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. – Vol. 59. – № 3. – P. 605–611.

5 **Andresen, B.** The metallurgical silicon process revisited. Silicon for the chemical and solar industry // Materials International conference. Norwegian University of Science and technology. – 2010. – P. 11–23.

6 **Makhambetov, E. N.** Razrabotka texnologii vyplavki kompleksnyx kalcisoderzhashhix ferrosplavov iz otvalnyx metallurgicheskix shlakov i vysokozolnyx uglei [Development of technology for smelting complex calcium-containing ferroalloys from landfill metallurgical slags and high-ash coals]: dis. ... dok. PhD: 6D070900. - Karaganda, 2021. – 23 p. (In Russian)

7 **Zhakan, A. M.** Hrom jäne marganes qūramdas keşendı qorytpalardy balqytuğa arnalğan şikızatty zertteu jäne taldau [Research and analysis of raw materials for smelting complex chromium and manganese Alloys]: mag. ... diss. 7M07203. – Aktobe, 2024. – 19 P. (in Kazakh)

8 **Zhukovskij, T. F. Procenko, E. L.** Briketirovanie otxodov proizvodstva ferrosiliciya [Briquetting of ferrosilicon production waste] // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovy`x texnologij. 2013. – № 1.– P. 4–8. (In Russian)

9 **Rohani, A. B., Rosiyah, N. G.** Production of high purity amorphous silica from rice husk // Procedia Chemistry. – 2016. –V. 19. – P. 189 – 195.

10 **Nguen Man` Xieu.** Processy termicheskoi pererabotki risovoi sheluxi pri poluchenii aktivirovannogo uglerodnogo materiala i ix apparaturnoe obespechenie. [The processes of thermal processing of rice husks in the production of activated carbon raw materials and hardware]: Dis. k.t.n: 05.17.18. – Tomsk, 2018. – P. 66. (In Russian)

Received 06.01.25.
Received in revised form 10.01.25.
Accepted for publication 19.02.25.

***А. Г. Бурумбаев[1], А. С. Ахметов[2], А. М. Жақан[3], Е. А. Мыңжасар[4], O. Yucel[5]***
[1]Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.
[1,2,3,4]Ж.Әбішев атындағы Химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[5]Istambul Technical University, Түркия, Стамбул қ.
06.01.25 ж. баспаға түсті.
10.01.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.02.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## КРЕМНИЙ КАРБИДІН СИНТЕЗДЕУ ҮШІН ШИКІҚҰРАМ МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ МЕНШІКТІ ЭЛЕКТР КЕДЕРГІСІН ЗЕРТТЕУ

*Бұл мақалада жоғары дисперсті микрокремнезем мен нефтекоксынан, сондай-ақ кремний карбидін синтездеуге арналған күріш қабығының пиролиз өнімінен тұратын шикіқұрам материалдарының меншікті электр кедергісін (МЭК) анықтау нәтижелері қарастырылады. Ферроқорытпалардың және металлургиялық кремнийдің жоғары кремний маркаларының өндірістерінде жоғары дисперсті микрокремнеземнің түзілуінің жоғары үлесі құрамында 86-дан 95,8 % – ға дейін $SiO_2$ бар техногендік шаң қалдықтарын одан әрі кәдеге жарату үшін жаңа технологияларды әзірлеуді талап етеді. Күріш өндірісінің жанама өнімі де осындай шешімді қажет етеді – күріш қабығы, ол жанбайды, шірімейді және негізінен қоршаған ортаны ластайтын қалдық үйіндіге жіберіледі. Бұл мәселелердің оңтайлы шешімі - аталған материалдарды қолдана отырып кремний карбидін алу. Осы мақсатта зерттеу 15 градус/мин қыздыру жылдамдығымен 20–1700 °С температура аралығындағы арнайы тәжірибелік қондырғы Тамман зертханалық пешінде олардың МЭК анықтау бойынша жұмыстар жүргізілді. Шикіқұрам материалдарының берілген температуралардағы меншікті электр кедергісі кремний карбидін синтездеу мүмкіндіктерін анықтайды.*

*Кілтті сөздер: меншікті электр кедергісі, микрокремнезем, микросилика, нефтекокс, пиролиз, күріш қабығы, кремний карбиді, қалдықтар, кәдеге жарату, қайта өңдеу.*

***А. Г. Бурумбаев[1], А. С. Ахметов[2], А. М. Жақан[3], Е. А. Мыңжасар[4], O. Yucel[5]***
[1]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау;
[1,2,3,4]Химико-металлургический институт имени Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[5]Istambul Technical University, Турция, г. Стамбул.
Поступило в редакцию 06.01.25.
Поступило с исправлениями 10.01.25.
Принято в печать 19.02.25.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИНТЕЗА КАРБИДА КРЕМНИЯ

*В данной статье рассматриваются результаты определения удельного электросопротивления (УЭС) шихтовых материалов состоящих из высокодисперсного микрокремнезема и нефтекокса, а также продукта термоокислительного пиролиза рисовой шелухи для синтезирования карбида кремния. Высокая доля образования высокодисперсного микрокремнезема на производствах высококремнистых марок ферросплавов и металлургического кремния требует разработки новых технологий для дальнейшей утилизации техногенных пылевых отходов, содержащих от 86 до 95,8 % $SiO_2$. Похожего решения требует и побочный продукт производства риса – рисовой шелухи, которая почти не горит, не гниет и в основном направляется на отвал, загрязняя окружающую среду. Перспективным решением этих проблем является получение карбида кремния с использованием перечисленных материалов. С этой целью в данной работе проведены работы по определению их УЭС в лабораторной печи Таммана на специальной опытной установке в интервале температур 20 – 1700 °С при скорости нагрева 15 град/мин. Удельное электрическое сопротивление шихтовых материалов при заданных температурах определяет возможности синтеза карбида кремния.*

*Ключевые слова: удельное электросопротивление, микрокремнезем, микросилика, нефтекокс, пиролиз, рисовая шелуха, карбид кремния, отходы, утилизация, переработка.*

SRSTI 53.39.29

https://doi.org/10.48081/DUYX2087

***A. Yerzhan[1], D. A. Issagulova[2], K. Yu. Okishev[3], T. V. Kovaleva[4]***

[1,2,4]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3]Ural Federal University (UrFU), Russian Federation, Yekaterinburg.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6942-2020
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0166-0225
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6331-3050
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1186-1805
*e-mail: aidana_kartu@mail.ru

## *APPLICATION OF FERROALLOY PRODUCTION WASTE AS DEOXIDISING AGENT IN STEEL PRODUCTION*

*The object of study was 30KhGS steel melted with briquettes made from fine-dispersed dust (FDD) of ferroalloy production. The samples melted with FS50-7 were used for reference. Experimental briquettes were made from fine-dispersed dust of ferrosilicon production with the addition of iron ore concentrate, and bentonite clay was used as a binder. The chemical composition, mechanical properties, and microstructure of 30KhGS steel melted with the briquettes were studied. Mechanical tests, hardness measurements, and microstructural analysis were carried out to evaluate the performance of the steel produced. The results showed that during deoxidation with the experimental briquettes, the chemical composition and mechanical properties of steel corresponded to GOST standards for this grade. The use of such briquettes led to improved resource efficiency, reduced production costs, and minimized environmental footprint. Moreover, the briquetted product obtained via this technique can be further utilized in industrial-scale metallurgical operations. The findings suggest a promising approach for sustainable steel production through waste recycling in the ferroalloy industry.*

*Keywords: steel, bentonite clay, Off-grade fine ferrosilicon (FFS), iron ore concentrate, fine-dispersed dust (FDD), deoxidation.*

### Introduction

The processes of deoxidation and alloying play a crucial role in improving the structure, purity, and the set of mechanical properties of steel, including strength, ductility, and impact toughness. Recent studies [1, p. 22] [2; 3; 4; 5] have shown that the use of various deoxidizers – such as ferrosilicon, aluminum, manganese, and calcium-containing compounds – has differing effects, ultimately influencing the hardenability, weldability, and corrosion resistance of steel.

In study [1, p. 22], the combined use of ferroalloys with rare-earth and alkaline-earth metals for steel alloying was investigated. The use of such a mixture as alloying additives resulted in improved corrosion resistance, strength, and ductility of the steel.

The authors of study [2] consider the replacement of traditional deoxidizers (such as ferrosilicon) with silicon carbide. The research results demonstrated that silicon carbide is a more effective material for steel deoxidation and alloying due to its chemical properties and can serve as a substitute for conventional deoxidizers. However, the use of silicon carbide is not suitable for steels with low manganese content (<0.8 %), as it may lead to a deterioration of the metal's ductility.

In study [3], deoxidation processes of killed steel grades were carried out. In study [4], the combined deoxidation of steel using aluminum and silicon was investigated. It was shown that the presence of silicon enhances the deoxidizing ability of aluminum, especially at low aluminum concentrations (0.001–0.1 %). This effect is attributed to silicon's ability to reduce the activity of oxygen in the molten metal.

In study [5], a comparative investigation was conducted on the effects of pure silicon (Si) and ferrosilicon (FeSi) on the formation of oxide inclusions in spring steel. It was found that FeSi is more effective in reducing the oxygen content (down to 0.0012%); however, it leads to the growth of inclusions (up to 3.64 өm) and the formation of calcium- and magnesium-containing phases with low deformability. In contrast, deoxidation with pure Si results in the formation of fine silicate and aluminosilicate inclusions with improved plasticity. These results can be used to optimize deoxidation regimes and control non-metallic inclusions in spring steels.

Deoxidation and alloying of silicon-containing steels are traditionally carried out using ferrosilicon; however, in recent years, there has been a growing trend towards the use of various ferroalloy production wastes as additives to commercial ferroalloys. This approach enables the recycling of ferroalloy waste, improves the environmental situation, and reduces steel production costs by lowering the price of deoxidizers.

The use of such wastes also makes it possible to vary the chemical composition of the introduced additives, tailoring them to the specific requirements of the steel. This opens up new opportunities for modifying the structure and properties of the metal without additional costs for expensive alloying components.

Studies [6, p. 455] [7] present the results of investigations on the influence of iron-containing additives on the properties of briquettes produced from fine-dispersed dust (FDD), which is a by-product of ferrosilicon production. The results showed that the use of iron ore concentrate as one of the components of the briquetting mixture improves the density and mechanical properties of the briquettes [8].

The aim of this study is to investigate the possibility of using briquettes produced from fine-dispersed dust (FDD) of ferroalloy production with the addition of iron ore concentrate for the deoxidation and alloying of silicon-containing steel.

**Materials and methods**

Steel grade 30KhGS (GOST 4543-2016) was used as the object of the study. Steel 30KhGS is a heat-treatable steel widely used for the manufacture of components operating under complex stress conditions. The chemical composition of steel grade 30KhGS (GOST 4543-2016) is presented in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of steel grade 30KhGS (GOST 4543-2016)

| Element | C | Si | Mn | Cr | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Element content | 0.28–0.35 | 0.9–1.2 | 0.8–1.1 | 0.8–1.1 | up to 0.035 | up to 0.035 |

Briquettes produced from fine-dispersed dust (FDD) of ferroalloy production with the addition of iron ore concentrate were used as a deoxidizer and silicon alloying agent.

The following components were used for briquette fabrication: fine-dispersed dust (FDD) from ferrosilicon production, off-grade fine ferrosilicon (FFS) (particles smaller than 3 mm), iron ore concentrate (IOC) [9], and bentonite clay as a binder. The chemical and particle size compositions of the main charge components are presented in Tables 2 and 3.

Table 2 – Chemical composition of the main charge components

| Component | Si | Fe | O | S | P | Al | Mn | Cr | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fine-dispersed dust (FDD) | 71,5 | 26,7 | 0,06 | 0,002 | 0,042 | 1,104 | 0,251 | 0,05 | – |
| Iron ore concentrate (IOC) | 12,25 | 49,4 | 32,44 | 0,038 | 0,064 | 3,3 | 2,285 | 0,021 | 0,222 |
| Off-grade fine ferrosilicon (FFS) | 47,0 | 44,58 | 0,2 | 0,1 | 0,02 | 2,0 | 0,6 | 0,5 | – |
| Bentonite clay | 65,2 | 23,73 | 0,5 | 0,476 | 0,51 | 9,364 | 0,166 | – | 0,054 |

Table 3 – Particle size distribution of the components

| Particle size | ≤ 0,05 mm | 0,05-0,2 mm | 0,2-1,0 mm | 1,0-3,0 mm | ≥3,0 mm |
|---|---|---|---|---|---|
| Fine-dispersed dust (FDD) | 14% | 16% | 55% | 13% | 2% |
| Iron ore concentrate (IOC) | – | 82,3% | 6% | 6% | 5,7% |
| Off-grade fine ferrosilicon (FFS) | 14,5% | 20,25% | 10% | 46,86% | 7,89% |
| Bentonite clay | 25% | 51,5% | 16% | 5% | 2% |
| FS50-7 | – | – | 3% | 92% | 5% |

Experimental briquettes were produced for further research. The composition of the experimental briquettes is presented in Table 4.

Table 4 – Composition of the experimental briquettes

| Sample grade | FDD, % | IOC,% | FFS, % | Bentonite clay,% | Water,% |
|---|---|---|---|---|---|
| Briquettes | 50 | 15 | 30 | 3 | 2 |

The briquette fabrication process included the following stages. All components were thoroughly mixed in a laboratory mixer in the specified proportions until a homogeneous charge was obtained. The prepared mixture was then pressed using an RP-50 press. Briquetting was carried out under a constant pressure of 40 kN, resulting in samples with a diameter of 40 mm and a height of 10 mm. After pressing, the samples were dried in a Snol-67/350 drying oven at 400 °C for 2 hours to remove excess moisture and improve the strength characteristics of the briquettes. The produced briquettes (Fig. 1) were used for further investigations.

Figure 1 – Experimental briquettes

The melting of 30KhGS steel (GOST 4543-2016) was carried out in a UIP-25 induction furnace. The charge consisted of steel scrap, ferrochrome, ferromanganese, and either FS50 ferrosilicon (reference sample) or experimental briquettes. The molten metal was poured into sand molds, and after complete cooling, the samples were subjected to normalization at 900 °C with air cooling, as a more cost-effective alternative to quenching and tempering.

The chemical composition of the samples was determined using a Niton XL2 X-ray fluorescence spectrometer, while the carbon content was measured with a SPAS-05 emission spectrometer. The microstructure was examined using a Magus Metal V700/ V700 BD metallographic microscope.

To investigate the mechanical properties of the experimental samples, the following tests were performed:

– Compressive strength was measured using an INSTRON 5982 universal testing machine;

– Hardness was measured with a Wilson VH-1150 hardness tester;

– Impact toughness was determined using an IP20 pendulum impact tester. All measurements were carried out in triplicate, and the averaged results are presented.

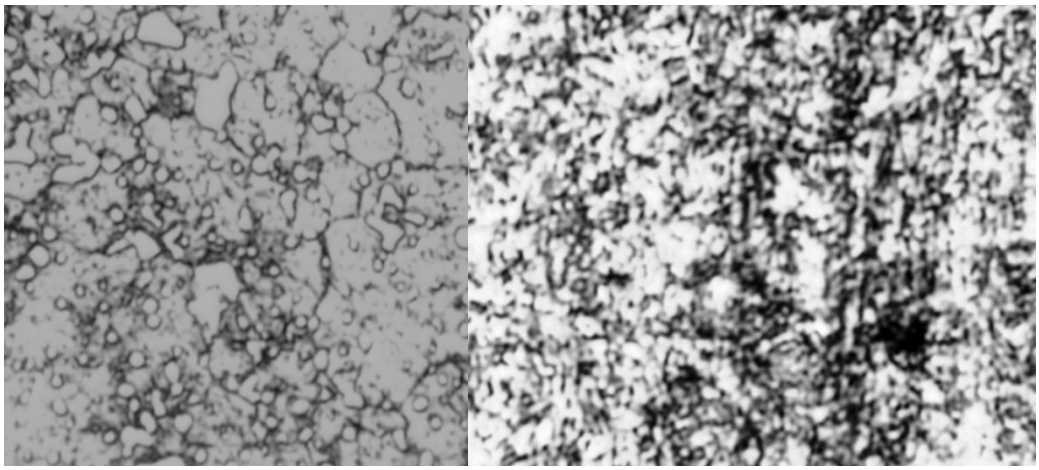
**Results and discussion**

The chemical composition of the experimental samples is presented in Table 5.

Table 5 – Chemical composition of the experimental samples

| Sample number | Grade | C | Si | Mn | Cr | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 30KhGS (GOST 4543-2016) | 0,28 – 0,35 | 0,9 – 1,2 | 0,8 – 1,1 | 0,8 – 1,1 | up to 0,035 | up to 0,035 |
| 1 | Steel deoxidized and alloyed with FS50-7 | 0,30 | 1,3 | 0,8 | 1,1 | up to 0,037 | up to 0,035 |
| 2 | Steel deoxidized and alloyed with experimental briquettes | 0,32 | 1,2 | 0,8 | 1,1 | up to 0,033 | up to 0,033 |

The data in Table 5 show that after deoxidation and alloying with the experimental briquettes, the steel composition meets the requirements of GOST and is almost identical to the chemical composition of the steel deoxidized with commercial FS50-7 [10].



a b

Figure 2 – Microstructure of 30CrH steel (magnification ×300):
(a) Sample № 1; (b) Sample № 2

The microstructures of the experimental samples are shown in Figure 2. After normalization, the structure of the samples consists of a pearlite-ferrite mixture and a carbide phase. Visual comparison of the structures shows that Sample No. 1 (Fig. 2a) is characterized by a coarse grain size and a well-defined carbide phase. Sample No. 2 (Fig. 2b) exhibits a more homogeneous structure, with the dispersed phase (carbides) being less distinctly pronouncedA more detailed investigation of the structure was not carried out; however, the conducted comparison allows the assumption that Sample No. 2 will exhibit superior mechanical properties.

To verify this assumption, the mechanical properties of the samples were investigated. The obtained results are presented in Table 6 and Figure 3.

Table 6 – Mechanical properties of the experimental samples

| Parameter | Compressive strength, MPa | Hardness (HV) | Impact toughness (J/cm²) |
|---|---|---|---|
| Sample No. 1 | 430 | 220 | 41 |
| Sample No. 2 | 439 | 227 | 42 |

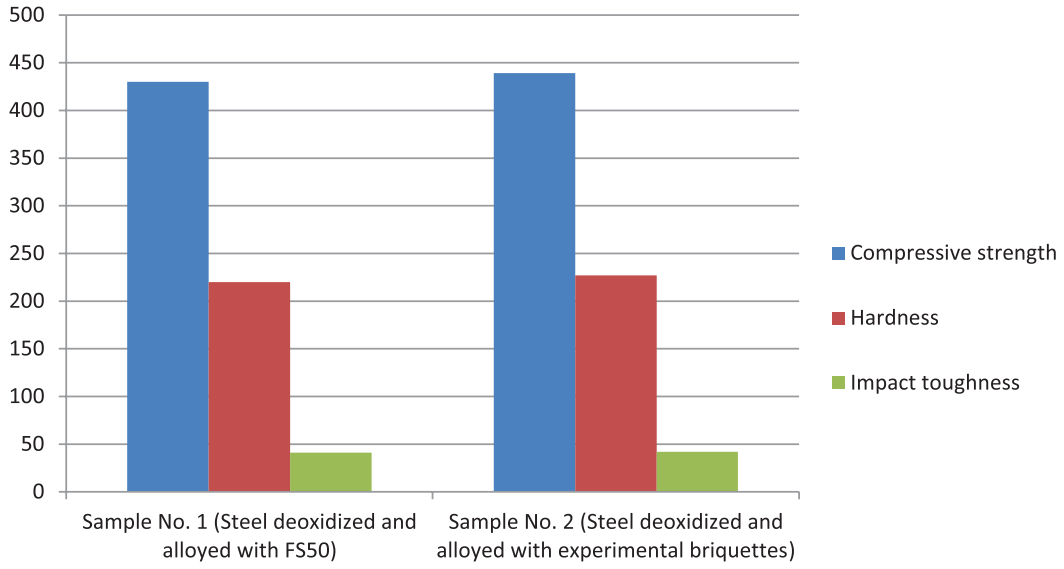



Figure 3 – Mechanical properties of the experimental samples

The data in Table 6 and the diagram in Figure 3 show that the steel deoxidized and alloyed with experimental FDD briquettes demonstrates slightly higher mechanical properties compared to the sample deoxidized with commercial FS50-7. This can be attributed to the better assimilation of the briquettes due to their finer particle size distribution, which leads to the formation of a more dispersed steel structure.

**Financing information**

This study was conducted as part of the research project AP19576811, «Development of technology for producing standard-grade products from fine-dispersed dust of ferroalloy production».

**Conclusions**

The conducted research has shown that the experimental briquettes are a promising alternative to FS50 for the deoxidation and alloying of 30KhGS steel, and potentially other silicon-containing steels. Steel deoxidized and alloyed with experimental briquettes made from fine-dispersed dust (FDD) of ferroalloy production with the addition of iron ore concentrate exhibits a chemical composition and mechanical properties that meet the requirements of the relevant GOST standard for this steel grade.

The use of such briquettes can replace commercial FS50 with a more cost-effective product and contribute to environmental improvement in the region, as briquette production is based on the recycling of industrial waste.

REFERENCES

1 **Рябчиков, И. В., Мизин, В. Г., Бакин, И. В., Усманов, Р. Г.** О производстве и применении ферросплавов с редкоземельными и щелочноземельными металлами для модифицирования и микролегирования стали // Сталь. – 2020. – № 6. – С. 21–25.

2 **Бондарь, В. И.** Особенности применения карбида кремния при производстве конвертерной стали // Литейное производство и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 55–60. – https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-55-60.

3 **Харлашин, П. С., Носенко, О. А., Яценко, А. Н.** Разработка рациональной технологии раскисления спокойных марок стали // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2011. – № 2(23). – С. 52–55.

4 **Григорович, К. В., Гарбер, А. К.** Анализ процессов комплексного раскисления расплавов углеродистой стали // Металлы. – 2011. – № 5. – С. 171.

5 **Ma, S., Li, Y., Jiang, Z., et al.** Effect of ferrosilicon deoxidation on the evolution and removal of oxide inclusions in 55SiCr spring steel // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2024. – Vol. 55. – P. 4302–4320. – https://doi.org/10.1007/s11663-024-03196-x.

6 **Erzhan, A. (Yerzhan), Kvon, Sv. S., Issagulova, D. A., Kulikov, V. Yu., Kovaleva, T. V.** The possibility of using iron ore concentrate as a binder when briquetting waste of ferroalloy production // Metalurgija. – 2024. – Vol. 63. – № 3–4. – P. 454–456. (Croatia).

7 Патент № 9155 от 24.05.2024. Способ брикетирования пылевидных отходов, образующихся при производстве ферросилиция.

8 **Issagulova, D. A., Kvon, Sv. S., Omarova, A. E. (Erzhan), Kovaleva, T. V., Kulikov, V. Yu., Alina, A. A.** Studying the binder effect on the properties of briquettes of ferroalloy production waste // Metalurgija. – 2024. – Vol. 63. – № 1. – P. 143–145. – ISSN 0543-5846.

9 WebMineral. Mineral deposits. Deposit ID 455. [Электронный ресурс]. – https://webmineral.ru/deposits/item.php?id=455 (Дата обращения: 17.06.2025).

10 Патент RU 2156814 C1. Способ получения брикетов из дисперсных и порошкообразных отходов производства ферросплавов.

REFERENCES

1 **Ryabchikov, I. V., Mizin, V. G., Bakin, I. V., Usmanov, R. G.** O proizvodstve i primenenii ferrosplavov s redkozemelnymi i schelochnozemelnymi metallami dlya modifitsirovaniya i mikrolegirovaniya stali [On the production and application of ferroalloys with rare-earth and alkaline-earth metals for steel modification and microalloying] // Stal'. – 2020. – № 6. – P. 21–25.

2 **Bondar, V. I.** Osobennosti primeneniya karbida kremniya pri proizvodstve konverternoy stali [Features of using silicon carbide in converter steel production] // Liteynoye proizvodstvo i metallurgiya. – 2023. – № 2. – P. 55–60. – https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-55-60.

3 **Kharlashin, P. S., Nosenko, O. A., Yatsenko, A. N.** Razrabotka ratsional'noy tekhnologii raskisleniya spokoynykh marok stali [Development of a rational technology for deoxidizing killed grades of steel] // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2011. – № 2(23). – P. 52–55.

4 **Grigorovich, K. V., Garber, A. K.** Analiz protsessov kompleksnogo raskisleniya rasplavov uglerodistoy stali [Analysis of the processes of complex deoxidation of carbon steel melts] // Metally. – 2011. – № 5. – P. 171.

5 **Ma, S., Li, Y., Jiang, Z., et al.** Effect of ferrosilicon deoxidation on the evolution and removal of oxide inclusions in 55SiCr spring steel // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2024. – Vol. 55. – P. 4302–4320. – https://doi.org/10.1007/s11663-024-03196-x.

6 **Erzhan, A. (Yerzhan), Kvon, Sv. S., Issagulova, D. A., Kulikov, V. Yu., Kovaleva, T. V.** The possibility of using iron ore concentrate as a binder when briquetting waste of ferroalloy production // Metalurgija. – 2024. – Vol. 63. – № 3–4. – P. 454–456. (Croatia).

7 Patent No. 9155 from 24.05.2024. Sposob briketirovaniya pylevidnykh otkhodov, obrazuyushchikhsya pri proizvodstve ferrosilitsiya [Method for briquetting dust-like wastes from ferrosilicon production].

8 **Issagulova, D. A., Kvon, Sv. S., Omarova, A. E. (Erzhan), Kovaleva, T. V., Kulikov, V. Yu., Alina, A. A.** Studying the binder effect on the properties of briquettes of ferroalloy production waste // Metalurgija. – 2024. – Vol. 63. – № 1. – P. 143–145. – ISSN 0543-5846.

9. WebMineral. Mineral deposits. Deposit ID 455. [Electronic resource]. – https://webmineral.ru/deposits/item.php?id=455 (accessed: 17.06.2025).

10. Patent RU 2156814 C1. Sposob polucheniya briketov iz dispersnykh i poroshkoobraznykh otkhodov proizvodstva ferrosplavov [Method of obtaining briquettes from dispersed and powdery ferroalloy production waste].

Received 19.06.25.
Received in revised form 02.07.25.
Accepted for publication 07.08.25.

***А. Ержан[1], Д. А. Исагулова[2], К. Ю. Окишев[3], Т. В. Ковалева[4]***
[1,2,4]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3]Орал федералды университеті (УрФУ), Ресей Федерациясы, Екатеринбург қ.
19.06.25 ж. баспаға түсті.
02.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
07.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ФЕРРОҚОРЫТПА ӨНДІРІСІНІҢ ҚАЛДЫҚТАРЫН БОЛАТ ӨНДІРІСІНДЕ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРҒЫШ РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ

*Зерттеу нысаны ретінде ферроқорытпа өндірісінің жоғары дисперсті шаңынан (ЖДШ) жасалған брикеттермен балқытылған 30ХГС болаты алынды. Салыстыру үшін FS50-7 ферросилицийімен балқытылған үлгілер пайдаланылды. Эксперименттік брикеттер ферросилиций өндірісінің ұнтақ тәрізді шаңынан жасалып, құрамына теміркенді концентрат қосылды, ал бентонитті саз байланыстырғыш ретінде қолданылды. Брикеттермен балқытылған 30ХГС болатының химиялық құрамы, механикалық қасиеттері және микрокұрылымы зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, эксперименттік брикеттерді қолдану кезінде болаттың химиялық құрамы мен механикалық қасиеттері осы маркаға арналған ГОСТ талаптарына толық сәйкес келеді. Бұл эксперименттік брикеттерді тотықсыздандырғыш және легирлеуші қоспа ретінде қолдануға мүмкіндік береді, нәтижесінде болат өндірісінің құнын арзандатып, шихтаның құнын төмендету есебінен өңірдегі экологиялық жағдайды жақсартуға ықпал етеді, себебі брикеттер техногендік қалдықтарды қайта өңдеу арқылы дайындалады.*

*Кілтті сөздер: болат, бентонитті саз, ұсақ ферросилиций, теміркенді концентрат, жоғары дисперсті шаң (ЖДШ), тотықсыздандырғыш.*

***А. Ержан[1], Д. А. Исагулова[2], К. Ю. Окишев[3], Т. В. Ковалева[4]***
[1,2,4]Карагандинский технический университет имени
Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.;
[3]Уральский федеральный университет (УрФУ),
Российская Федерация, г. Екатеринбург.
Поступило в редакцию 19.06.25.
Поступило с исправлениями 02.07.25.
Принято в печать 07.08.25.

## ПРИМЕНЕНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ В КАЧЕСТВЕ РАСКИСЛИТЕЛЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ

*Объектом исследования являлась сталь марки 30ХГС, выплавленная с использованием брикетов, изготовленных из высокодисперсной пыли (ВДП) ферросплавного производства. В качестве контрольных использовались образцы, выплавленные с применением стандартного ферросилиция ФС50-7.*

*Экспериментальные брикеты были изготовлены из высокодисперсной пыли производства ферросилиция с добавлением железорудного концентрата; в качестве связующего использовалась бентонитовая глина. Изучены химический состав, механические свойства и микроструктура стали 30ХГС, выплавленной с использованием указанных брикетов. Результаты показали, что при раскислении экспериментальными брикетами химический состав и механические свойства стали соответствуют требованиям ГОСТ для данной марки. Это позволяет использовать экспериментальные брикеты для раскисления и легирования, что снижает себестоимость стали за счет удешевления шихты и улучшает экологическую ситуацию в регионе за счёт переработки техногенных отходов.*

*Ключевые слова: сталь, бентонитовая глина, мелкий ферросилиций, железорудный концентрат, высокодисперсная пыль (ВДП), раскисление.*

SRSTI 53.37.33

https://doi.org/10.48081/WDQW8381

***D. B. Kassymova[1], *R. V. Sapinov[2], M. A. Adilkanova[3]***

[1,2,3]D. Serikbayev EKTU, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[2]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[1]VNIItsvetmet, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0937-8477
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9334-5806
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8193-116X
*e-mail: sapinov.r@teachers.tou.edu.kz

# *SELECTION OF OPTIMAL CYANIDE LEACHING MODES FOR GOLD FROM ORE DEPOSITS IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN*

*The processing of gold-copper ores with high copper and gold content embedded in sulfide minerals using cyanide solutions is associated with a number of difficulties. Copper, when reacting with cyanide, causes its increased consumption, and the embedding of gold in sulfide minerals causes gold losses with tailings. Therefore, selecting the optimal leaching conditions is necessary for the rational use of reagents, which leads to a reduction in the cost of hydrometallurgical processes for cyanide leaching of gold-copper ores and a reduction in environmental risks. The paper investigates the possibility of processing gold-copper ore with a high copper content and gold incorporated into sulfide minerals (pyrite, chalcopyrite). The aim of the work is to establish the optimal parameters for cyanide leaching by conducting tests in bottle agitators. As a result of the experiments, it was found that as the degree of ore grinding increases, gold extraction increases and cyanide consumption decreases slightly. The addition of coal during leaching significantly increases gold recovery, up to 7 %. It was noted that high sodium cyanide consumption cannot be reduced without a significant decrease in gold recovery. Au ≈ 20 % reduction in sodium cyanide consumption also reduces gold recovery by ≈ 20 %. A laboratory-industrial experiment showed that after 16 hours of ore leaching, 85.8% of the gold is transferred into solution, and after 18 hours, 86.7 %. Further prolongation of the process does not increase the gold recovery rate.*

*Keywords: gold-copper ore, optimal parameters, cyanide leaching, gold, copper.*

## Introduction

The selection of optimal leaching modes is necessary for the rational use of resources, which leads to a reduction in the cost of hydrometallurgical processes [1;2] and a decrease in environmental risks [3;4]. Increased cyanide consumption is known to be mainly associated with the presence of impurities in the raw material. For example, the presence of copper in the raw material leads to cyanide overspending [5] due to reactions between cyanide and copper [6] according to reaction (1).

$$Cu_2O + 6CN^- + H_2O \rightarrow 2Cu(CN)_3^{2-} + 2OH^- \quad (1)$$

There are various approaches to the economic optimization of cyanide leaching. Some researchers suggest precipitating copper in order to obtain an additional commercial product [7;8] with subsequent regeneration of the solution [9]. One of the most difficult types of raw materials in terms of gold extraction by cyanidation is raw materials in which gold is embedded in copper-containing minerals. Gold particles are included in sulfide ore (pyrite, arsenopyrite, and chalcopyrite) or embedded in it. As a result, gold is difficult to extract even after fine grinding [10]. This article explores the possibility of processing gold-copper ore with a high copper content and gold embedded in sulfide minerals (pyrite, chalcopyrite).

The aim of the work is:

– to establish the optimal parameters for cyanide leaching of gold-copper ore by conducting tests in bottle agitators in an open cycle on a sample with a total weight of 30 kg;

– laboratory-industrial leaching of ore at the VNIItsvetmet pilot plant to verify and refine process parameters and obtain the required volumes of intermediate products from an industrial sample with a total weight of 2070 kg.

**Materials and methods**

All experiments were carried out in D. Serikbayev "and 'Eastern Research Mining and Metallurgical Institute of Nonferrous Metals 'VNIItsvetmet", located in the Republic of Kazakhstan, in the city of Ust-Kamenogorsk. The object of the study - gold-copper ores of the deposit of Kazakhstan (2070 kg). Mass-spectrometer ICP-MS 7500cx of "Agilent technologies" (USA) was used to study the chemical composition of raw materials. To study the material composition of the material under study, X-ray diffractometer BRUKERD8 ADVANCE was also used to analyze the X-ray diffractometer, which is a common method for determining the qualitative composition of the material. In order to achieve the objectives of the study, the chemical and phase chemical compositions of the incoming sample were determined. Further to study the material composition of the investigated material, XRD was also carried out. Particle size analysis was performed using a FRITCH ANALYSETTE 22 laser analyzer. Tap water was used in the studies, the chemical composition of which is shown in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of the source water used in the studies

| Indicator | Contents |
|---|---|
| Na, mg/dm$^3$ | 13 |
| K, mg/dm$^3$ | <10 |
| Al, mg/dm$^3$ | 0.0097 |
| Sulfates, mmol/dm$^3$ | 25.28 |
| chloride ion, mmol/dm$^3$ | 24.68 |
| Ca, mg/dm$^3$ | 28 |
| Mg, mg/dm$^3$ | 7.88 |
| Insoluble residue, mg/dm$^3$ | 0.017 |

| | |
|---|---|
| Total alkalinity, mg/dm$^3$ | 2.5 |
| Overall stiffness, mg-eq/dm$^3$ | 2.12 |
| pH | 7.25 |
| Dry residue, mg/dm$^3$ | 0.2782 |
| Nitrites, mg/dm$^3$ | <0.002 |
| Ammonium chloride, mg/dm$^3$ | <0.05 |

Testing methodology in bottle agitators. The ore was ground for leaching in a batch ball mill. The ball mill was loaded with 50 kg of 40 mm and 25 mm diameter balls and 150 kg of 20 mm diameter balls. The sample weight was 30 kg. S/L = 1/1. The tests were conducted on samples ground to a size of 80 %, 85 %, and 90 % of the minus 0.071 mm class, with a sodium cyanide concentration of 0.05 % in the leaching solution, with and without the addition of coal to the process. The crushed ore was leached for 24 hours. The main parameters of the bottle leaching process were: pulp density – 40 %; pulp pH 10.0-10.5; sodium cyanide concentration in the initial solution 0.05%. Ore leaching tests were carried out with and without activated carbon. Activated carbon (NORIT) was used at a rate of 10 % of the weight of the initial sample. Before the start of the tests, the carbon was washed to remove sludge. Samples of the product solutions were taken every 2, 4, 6, and 24 hours after the start of the tests. The pH and sodium cyanide concentration were determined in each solution sample. The pH of the product solution was maintained at 10.5. When the sodium cyanide concentration in the leaching solution fell below 50 % of the initial content, sodium cyanide was added to the pulp in the form of a 10 % solution, the consumption of which was recorded. After the tests were completed, the pulp was filtered. The final volume of the solutions was measured, and samples were taken to determine the pH, gold, silver, and copper content, and sodium cyanide concentration. The coal and solid residues from the leaching process were washed with water, dried, and subjected to chemical analysis for gold, silver, and copper content.

Methodology for laboratory-industrial ore leaching at the VNIItsvetmet pilot plant. The grinding stage is similar to that described above for tests conducted in bottle agitators. After unloading the mill into an intermediate collection tank, the pulp was pumped into a 1.5 m3 agitator tank, where it was adjusted to the required density by adding water. The agitator tank, in which the cyanide leaching of the crushed ore from the Yubileynoye deposit was carried out at the pilot plant, is equipped with dispersers for air supply and a mixer for stirring. The initial concentration of sodium cyanide in the leaching solution was 0.05 %, and the solution was replenished to the initial concentration of sodium cyanide 2, 4, 6, and 8 hours after the start of the process. The total leaching time was 24 hours. Activated carbon was not added to the process. To determine the optimal leaching time, samples were taken to determine the gold, silver, and copper content in the cake after 16, 18, 20, and 24 hours. At the end of leaching, the leaching pulp was fed to a Nutsch filter for filtration. Samples were taken to determine the content of gold, silver, copper, and sodium cyanide. The solid residues from leaching

were washed with water, dried, and subjected to chemical analysis for gold, silver, and copper content.

**Results and discussion**

1 Study of the composition and physical properties of ore

The particle size distribution of the ore at the selected optimal grinding time (60 min) for leaching is shown in Table 2.

Table 2 – Results of sieve analysis of crushed ore

| Size class, mm | Class exit, % |
|---|---|
| +0.140 | 0.8 |
| -0.140+0.100 | 3.6 |
| -0.100+0.071 | 5.1 |
| -0.071 | 90.5 |
| Total: | 100.0 |

The summary results of the particle size analysis of the initial ore sample of minus 0.071 mm are presented in Table 3.

Table 3 – The summary results of the particle size analysis of the initial ore sample of minus 0.071 mm

| Size class, mm | Class exit, % |
|---|---|
| +0.140 | 0.8 |
| -0.140+0.100 | 3.6 |
| -0.100+0.071 | 5.1 |
| -0.071+0.045 | 5.6 |
| -0.045+0.038 | 5.3 |
| -0.038+0.020 | 31.3 |
| -0.020+0.010 | 22.9 |
| -0.010+0.005 | 8.4 |
| -0.005 | 17.0 |
| Total: | 100.0 |

Content of gold in the sample amounted to – 1.2 g/t. The content of silver also amounted to – 1.2g/t. The total amount of copper amounted to 0.15 %. Iron content amounted to 5.10 %. The total amount of sulfur was 0.34 %. The main ore mineral in the sample is magnetite. Secondary ore minerals are pyrite, chalcopyrite, single grains of bornite, chalcosine, and covellite. The main ore mineral in the sample is magnetite. Secondary ore minerals include pyrite, chalcopyrite, and isolated grains of bornite, chalcocite, and covellite. Magnetite is represented by irregularly shaped grains. It accounts for 53.3 % of the sample (of 100 % of all ore minerals) and forms aggregates with pyrite and non-metallic substances. Chalcopyrite is represented by amoeboid, irregularly shaped grains. It accounts for 10.2 % of the sample. It forms aggregates with pyrite, bornite, and chalcocite. Pyrite is represented by irregularly shaped grains. It accounts for 27.9% of the sample. It forms aggregates with chalcopyrite and magnetite. The composition of the ore is described in more detail in the work [11]. The results of

studying the material composition of the material under study using X-ray structural analysis showed the presence of the following non-metallic minerals: quartz, albite, magnetite, clinochlore, orthoclase and calcite.

2 Results of tests conducted in bottle agitators

The main summary results of each of the bottle cyanide leaching tests performed are presented in Table 4. The data presented in Table 4 were previously reported in a study on the sacred problem of copper precipitation from cyanide solution [8, p.4].

Table 4 – Main results of leaching a sample of gold-bearing ore in bottle shakers [8, p.4]

| № | Ore Size | Coal | Composition of the Cake | | | Leaching Rate, % | | | NaCN Consumption, kg/t Ore |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Au, g/t | Ag, g/t | Cu, % | Au | Ag | Cu | |
| 1 | $P_{80}$=0.071 mm | - | 0.26 | 0.75 | 0.1088 | 78.3 | 37.5 | 27.5 | 1.98 |
| 2 | | + | 0.18 | 0.44 | 0.1138 | 85.0 | 63.3 | 24.1 | 2.40 |
| 3 | $P_{80}$=0.067 mm | - | 0.19 | 0.60 | 0.1086 | 84.2 | 50.0 | 27.6 | 2.16 |
| 4 | | + | 0.17 | 0.48 | 0.1102 | 85.8 | 60.0 | 26.5 | 2.53 |
| 5 | $P_{80}$=0.057 mm | - | 0.20 | 0.72 | 0.1096 | 83.3 | 40.0 | 26.9 | 2.44 |
| 6 | | + | 0.16 | 0.46 | 0.1084 | 86.7 | 61.7 | 27.7 | 2.57 |
| 7 | | +* | 0.15 | 0.49 | 0.1104 | 87.5 | 59.2 | 26.4 | 2.45 |
| Note: * denotes that in experiment No. 7, coal entered the process 6 h after leaching began. | | | | | | | | | |

In experiment №. 6, the distribution of gold by size class was determined. The results are shown in Table 5.

Table 5 – Distribution of gold by size class in the residues from leaching of gold-bearing ore (test 6, Table 2)

| Size class, mm | Class exit, % | Au content in cake, g/t | Au distribution, % |
|---|---|---|---|
| +0.071 | 5.3 | 0.24 | 7.8 |
| -0.071; +0.045 | 18.8 | 0.23 | 26.7 |
| -0.045 | 75.9 | 0.14 | 65.5 |
| Total: | 100.0 | 0.16 | 100.0 |

Table 6 shows the chemical composition of the final solutions obtained by leaching ore with a particle size of $P_{90}$ = 0.071 mm with and without the addition of coal in the bottle cyanide leaching process (cakes from tests 5 and 6 shown in Table 4).

Table 6– Gold, silver, and impurity content in final solutions of bottle cyanide leaching of gold-bearing ore sample with a particle size of P90 = 0.071 mm

| Solution from exp. (Table 2) | Content, g/dm$^3$ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Au, mg/dm$^3$ | Ag, mg/dm$^3$ | Cu | Fe | S | As | Ca | Mg | Al | Mn | Zn |
| №5 | 1.1 | 0.20 | 0.18 | 0.08 | 0.2 | <0.001 | <0.001 | 0.0015 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| №6 | 0.016 | <0.05 | 0.17 | 0.01 | 0.2 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

A series of experiments was also conducted to determine the dependence of gold extraction into solution on sodium cyanide consumption. The tests were carried out without the addition of activated carbon, at a pulp density of 40%, a sodium cyanide concentration in the initial solution of 0.05%, and a leaching time of 20 hours. The test results are presented in Table 7. The data presented in Table 7 were previously reported in a study on the sacred problem of copper precipitation from cyanide solution [8, p.5].

Table 7 – Ore leaching results [8, p.5]

| № | Supply NaCN, kg/t | | | | | NaCN content in the final solution, % | Leaching content in cake | | | Extraction into solution, % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 h | 2 h | 4 h | 6 h | Total | | Au, g/t | Ag, g/t | Cu, % | Au | Ag | Cu |
| 1 | 0.75 | - | - | - | 0.75 | <0.01 | 1 | 1.2 | 0.12 | 16.7 | - | 20.0 |
| 2 | 0.75 | 0.67 | - | - | 1.42 | <0.01 | 0.7 | 1.0 | 0.12 | 45.0 | 16.7 | 20.0 |
| 3 | 0.75 | 0.67 | 0.59 | - | 2.01 | <0.01 | 0.4 | 0.8 | 0.11 | 66.7 | 36.7 | 26.7 |
| 4 | 0.75 | 0.67 | 0.59 | 0.56 | 2.57 | 0.01 | 0.2 | 0.7 | 0.11 | 83.3 | 40.0 | 26.7 |

3 Conducting laboratory-industrial ore leaching at the VNIItsvetmet pilot industrial plant

The results of the study of the dependence of the degree of extraction of gold, silver, and copper into the leaching solution on the duration are shown in Table 8.

Table 8 – Dependence of the degree of extraction of gold, silver, and copper into the leaching solution on duration

| Duration, h | Leaching content in cake | | | Extraction into solution, % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Au, g/t | Ag, g/t | Cu, % | Au | Ag | Cu |
| 16 | 0.17 | 0.9 | 0.12 | 85.8 | 25.0 | 20.0 |
| 18 | 0.16 | 0.8 | 0.13 | 86.7 | 33.3 | 13.3 |
| 20 | 0.17 | 0.8 | 0.11 | 85.8 | 33.3 | 26.7 |
| 24 | 0.26 | 0.9 | 0.11 | 78.3 | 25.0 | 26.7 |

The results of the particle size distribution of the second cycle leaching cake, performed using sieve analysis and analysis on a laser particle size analyzer, are shown in Table 9.

Table 9 – Summary results of particle size analysis of the leaching cake from the ore sample

| Size class, mm | Class exit, % |
|---|---|
| +0.140 | 0.2 |
| -0.140+0.100 | 1.9 |
| -0.100+0.071 | 3.0 |
| -0.071+0.045 | 23.0 |
| -0.045+0.038 | 9.0 |
| -0.038+0.020 | 30.4 |
| -0.020+0.010 | 15.6 |
| -0.010+0.005 | 5.3 |

| | |
|---|---|
| -0.005 | 11.6 |
| Total: | 100.0 |

The main results of ore leaching at the pilot plant are shown in Table 10.

Table 10 – Results of ore leaching at the VNIItsvetmet pilot plant

| Loaded ore, kg | Pulp density,% | Contents in the cake | | | Extraction into solution by cake, % | | | Content in solution | | | NaCN consumption, kg/t of ore |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Au, g/t | Ag, g/t | Cu, % | Au | Ag | Cu | Au, mg/dm$^3$ | Ag, mg/dm$^3$ | Cu, g/dm$^3$ | |
| 720 | 39.8 | 0.19 | 0.92 | 0.101 | 84.2 | 23.3 | 27.7 | 0.65 | 0.40 | 0.28 | 2.72 |
| 870 | 39.8 | 0.26 | 0.90 | 0.101 | 78.3 | 25.0 | 27.5 | 0.70 | 0.49 | 0.34 | 2.40 |
| 480 | 41.0 | 0.21 | 0.94 | 0.101 | 80.0 | 21.7 | 27.6 | 0.78 | 0.24 | 0.59 | 2.49 |

**Conclusions**

As the degree of ore grinding increases, gold recovery increases: at an ore size of $P_{80}$=0.071 mm, gold recovery in solution is 85.0 %; at a size of $P_{80}$=0.067 mm (85 % class minus 0.071 mm) – 85.8 %; with a particle size of $P_{80}$=0.057 mm (90 % class minus 0.071 mm), gold extraction into the solution is 86.7%. Cyanide consumption during ore leaching depends to a lesser extent on the degree of grinding and is 2.4; 2.53 and 2.57 kg/t for ore sizes of 80, 85, and 90 % class minus 0.071 mm, respectively. The difference in gold extraction during ore leaching without and with the addition of angle was 6.7; 1.6 and 3.4 % for ore sizes of 80, 85, and 90 % minus 0.071 mm, respectively. Silver extraction also depends on the size of the ore and the presence of coal in the leaching pulp and varied depending on the leaching conditions from 37.5 to 61.7 %. Copper recovery is practically independent of ore size under the studied conditions and ranges from 24.1 % to 27.7 %. The distribution of gold by size class in the leaching cake of ore with a size of 90 % of the minus 0.071 mm class showed an increased gold content in the large classes (in the plus 0.071 mm class, the gold content was 0.24 g/t, with an average gold content in the cake of 0.16 g/t), which indicates the possibility of increasing gold recovery with even finer grinding. The leaching solutions showed elevated copper (0.17–0.18 g/dm$^3$), iron (0.010–0.084 g/dm$^3$), and sulfur (0.2 g/dm$^3$) content, which may have a negative impact on closed-cycle ore processing. The high consumption of sodium cyanide cannot be reduced without a significant decrease in gold extraction: when the consumption of sodium cyanide is reduced from 2.5 to 2.01 kg/t, gold extraction decreases from 83.3 to 66.7 %, while the residual content of sodium cyanide does not exceed 0.01 %.

During ore leaching tests conducted at the VNIItsvetmet pilot plant, the following results were achieved:

– When studying the dependence of gold extraction into solution on duration, it was noted that after 16 hours of ore leaching, 85.8 % of the gold had been transferred into solution, and after 18 hours, 86.7 %. Further increases in the duration of the process did not result in any increase in gold extraction.

– The maximum gold extraction into the solution was 84.2 % with a sodium cyanide consumption of 2.72 kg/t of ore.

– Copper extraction into the solution in three cyanide leaching operations was 27.5–27.7 %.

During the tests, the required number of samples of grinding and leaching pulps were selected. The entire volume of leaching solutions was preserved for further sorption studies.

REFERENCES

1 **Han, J., Dai, S., Deng, J., Que, S., Zhou, Y.** Technology for Aiding the Cyanide Leaching of Gold Ores // Separations. – 2024. – № 11. – P. 228.

2 **Kameda, M.** Fundamental Studies on Dissolution of Gold in Cyanide Solutions. II: On Equations of Reactions and Effects of Cyanide Strength and Other Variables on Dissolution Rate : Ph.D. Thesis, Tohoku University. – Miyagi, Japan, 1949. – P. 223–230.

3 **Donato, D. B., Nichols, O., Possingham, H., Moore, M., Ricci, P. F., Noller, B. N.** A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife // Environ. Int. – 2007. – № 33. – P. 974–984.

4 **Ya, X., Weishi, L., Qifei, H., Yuqiang, L., Jingcai, L., Li, L., Dahai, Y.** Long-term degradation characteristics of cyanide in closed monofills and its effects on the environment and human health: Evidence from nine landfill sites in northen China // Science of The Total Environment. – 2022. – № 839. – P. 156269

5 **Yilmaz, E., Yazici, E.Y., Ahlatci, F., Celep, O., Deveci, H.** Precipitation of copper from cyanide leach solutions using sodium dimethyldithiocarbamate (SDDC) // Hydrometallurgy. – 2021. – № 202. – P.105610.

6 **Dai, X., Simons, A., Breuer, P.** A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores // Minerals Engineering. – 2012. – № 25. – P. 1–13.

7 **Estay, H.** Designing the SART process – A review // Hydrometallurgy. – 2018. – № 176. – P.147–165

8 **Kassymova, D., Sapinov, R., Kushakova, L., Kulenova, N., Shoshay, Z., Adylkanova, M.** Optimization of Copper Recovery from Cyanide Leaching Solutions Used in Gold–Copper Ore Processing Using Probabilistic–Deterministic Experimental Design // Processes. – 2025. – № 13. – P.61.

9 **Estaya, H., Gim-Krumma, M., Serichea, G., Quilaqueoa, M., Barrosa L., Ruby-Figueroad R., Romeroc J., Troncoso E.** Optimizing the SART process: A critical assessment of its design criteria // Minerals Engineering. – 2020. – № 146. – P.106116.

10 **Lin, Y., Hu, X., Zi, F., Chen, Y., Chen, S., Li, X., Li, J., Jiang, Y., Zhang, Y.** Rapid gold cyanidation from a sulfur-high and arsenic-high micro-fine concentrate via facile two-stage roasting pre-treatment // Minerals Engineering. – 2022. – № 190. – P. 107938.

11 **Kassymova, D.B., Sapinov, R.V., Kulenova, N.A., Adilkanova, M. A.** Study of the material composition of gold-copper ores from kazakhstani deposits // Science and technology of Kazakhstan. – 2025– № 1. – P. 248–258.

Received 28.07.25.
Received in revised form 31.07.25.
Accepted for publication 13.08.25.

***Д. Б. Касымова[1],*Р. В. Сапинов[2], М. А. Адильканова[3]***
[1,3,4]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[3]ШҒЗТКМИтүсмет, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
28.07.25 ж. баспаға түсті.
31.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
13.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ КЕНІНЕН, КЕН ОРНЫНАН ЦИАНИДПЕН АЛТЫНДЫ ШАЙМАЛАУДЫҢ ОҢТАЙЛЫ РЕЖИМДЕРІН ТАҢДАУ

*Цианид ерітінділерімен сульфидті минералдарға шашыраған мыс пен алтынның көп мөлшері бар алтын мыс кендерін өңдеу бірқатар қиындықтармен байланысты. Сонымен, мыс цианидпен әрекеттесіп, оның шығынын жоғарылатады, ал алтынның сульфидті минералдарға қосылуы алтынның құйрығымен жоғалуына әкеледі. Осылайша, оңтайлы шаймалау режимдерін таңдау реагенттерді ұтымды пайдалану үшін қажет, бұл алтын мыс кендерін цианидті шаймалаудың гидрометаллургиялық процестерінің арзандауына және экологиялық қауіптердің төмендеуіне әкеледі. Жұмыста құрамында мыс мөлшері жоғары алтын кенін және сульфидті минералдарға (пирит, халькопирит) ендірілген алтынды қайта өңдеу мүмкіндігі зерттеледі. Жұмыстың мақсаты-бөтелке агитаторларында сынақтар жүргізу арқылы цианидті шаймалаудың оңтайлы параметрлерін анықтау. Жүргізілген тәжірибелер нәтижесінде кенді ұнтақтау дәрежесі жоғарылаған сайын алтын алу артып, цианидтің шығыны біршама төмендейтіні анықталды. Шаймалау кезінде көмір қосу арқылы алтын алу айтарлықтай артады, 7 % дейін. Натрий цианидінің жоғары шығынын алтын өндірудің айтарлықтай төмендеуінсіз төмендетуге болмайтындығы атап өтілді. Натрий цианидінің шығынын ≈ 20 %-га төмендету алтынның өндірілуін ≈ 20 %-га төмендетеді. Зертханалық-өнеркәсіптік тәжірибе көрсеткендей, 16 сағат кенді шаймалағаннан кейін алтынның ерітіндіге ауысуы 85,8 %-га, 18 сағаттан кейін-86,7 %-га жетеді. Процесс ұзақтығының одан әрі ұлғаюымен ерітіндіге алтын алудың ұлғаюы байқалмайды.*

*Кілтті сөздер: алтын мыс кендері, оңтайлы параметрлер, цианидті шаймалау, алтын, мыс.*

***Д. Б. Касымова[1],*Р. В. Сапинов[2], М. А. Адильканова[3]***
[1,3,4]ВКТУ имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[2]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[3]«ВНИИцветмет», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
Поступило в редакцию 28.07.25.
Поступило с исправлениями 31.07.25.
Принято в печать 13.08.25.

# ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЦИАНИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

*Переработка золотомедных руд с повышенным содержанием меди и золота вкрапленного в сульфидные минералы цианидными растворами, связана с рядом трудностей. Так медь, вступая в реакцию с цианидом вызывает его повышенный расход, а вкрапление золота в сульфидные минералы вызывает потери золота с хвостами. Таким образом подбор оптимальных режимов выщелачивания необходим для рационального использования реагентов, что ведет к удешевлению гидрометаллургических процессов цианидного выщелачивания золотомедных руд и уменьшению экологических рисков. В работе исследуется возможность переработки золотомедной руды с высоким содержанием меди, и золота внедренного в сульфидные минералы (пирит, халькопирит). Целью работы является установление оптимальных параметров цианидного выщелачивания путем проведения тестов в бутылочных агитаторах. В результате проведанных экспериментов было уставлено что при увеличении степени измельчения руды извлечение золота возрастает, а расход цианида несколько снижается. Добавлением угля при выщелачивании существенно увеличивает извлечение золота, до 7%. Отмечено что высокий расход цианида натрия не может быть снижен без существенного снижения извлечения золота. Снижение расхода цианида натрия на ≈ 20% также снижает извлечение золота на ≈ 20%. Лабораторно-промышленный эксперимент показал что уже после 16 часов выщелачивания руды достигается переход золота в раствор на 85,8%, через 18 часов – на 86,7 %. При дальнейшем увеличении продолжительности процесса повышения излечения золота не происходит.*

*Ключевые слова: золотомедные руды, оптимальные параметры, цианидное выщелачивание, золото, медь.*

SRSTI 53.37.35

https://doi.org/10.48081/WMDV7314

***V. Yu. Kulikov[1], *Y. A. Baiseitova[2], Sh. N. Tulegenova[3], P. V. Kovalev[4]***

[1,2,3]Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Kazakhstan, Karaganda;
[4]NRU Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russian Federation, St. Petersburg
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6191-8569
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8412-6627
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0750-1233
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-3812
*e-mail: aglanovna@mail.ru

# *STUDY OF ENERGY ASPECTS OF COLD BRIQUETTING FOR SHH15 STEEL DUST UNDER VARYING PRESS CONDITIONS*

*The article reports the outcomes of a practical study into the cold briquetting of powdered residue ShH15 steel cutting debris. Through the analysis of compaction behavior, three sequential stages were identified: an initial elastic compression phase, followed by fragmentation and densification, and concluding with plastic consolidation forming a solid briquette structure. The pressing procedure was conducted at ambient temperature using equipment equipped with an adjustable matrix configuration. Resultant compacts achieved relative densities in the range of 90–91 % of theoretical values under forces up to 850 kN and corresponding pressures of 450–500 MPa. The specific energy input required for material deformation was estimated at 2.6–2.8 kJ/g. The results validate the feasibility of utilizing unprocessed steel waste through energy-efficient compaction, eliminating the need for thermal pretreatment.*

*In addition to improving material utilization efficiency, the proposed method supports broader sustainability goals by enabling low-cost, low-energy recycling of industrial residues. These findings may serve as a foundation for scaling cold briquetting processes to industrial applications, especially in contexts where thermal methods are economically or environmentally impractical.*

*Keywords: briquetting, ShH15 steel, steel dust, energy efficiency, deformation diagram, recycling, pressing pressure, compaction behavior.*

## Introduction

Accurate assessment of energy demand and pressing force when compacting ferrous metal machining waste is essential for selecting appropriate briquetting technologies and equipment. According to prior studies [1, p. 43; 2, p. 70], a more energy-efficient method involves the application of press tools with movable matrices, which substantially reduce deformation resistance, minimize wear on the tooling, and improve the structural integrity of the resulting briquettes.

However, most existing research on briquetting of steel and cast iron residues [3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10] has been carried out using dies with fixed matrices, where the

frictional interaction between the pressing walls and the work piece contributes to higher forming loads and increased wear on the components.

The primary goal of this study is to examine how various pressing modes and mold designs affect the energy flow and compaction characteristics during low-temperature compaction ShH15 steel particles. An additional objective is to enhance the operational efficiency of the process by selecting optimal design parameters that reduce tool degradation and improve the mechanical performance of the briquetted products, thereby supporting sustainable reuse of metallurgical waste [11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18].

**Materials and methods**

The research focused on cold briquetting of finely dispersed ShH15 steel waste, generated during the machining of bearing components. The raw material, in the form of powder-like chips, was used without prior removal of lubricants or oil-based residues, thereby simulating real-world production conditions as closely as possible. To ensure a relatively uniform particle size distribution, the chips were sieved through a 1 mm mesh prior to blending.

To facilitate particle adhesion during compaction, a binder system consisting of bentonite clay, sodium silicate (commonly referred to as liquid glass), and a small amount of water was employed. These components were selected due to their low cost, environmental safety, and capacity to enhance the structural stability of the resulting briquettes. The proportion of binders varied between 10% and 20% relative to the steel base mass, depending on the experimental series. The mixtures were prepared manually to achieve a homogeneous distribution of binder throughout the metal matrix.

Table 1 – Composition of experimental samples of briquettes with varying binding components

| Sample | Mass of ShH15, g | Bentonite, % | Liquid glass, % | Water, % | Total mass of binders, r | Briquette mass, g |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1A | 17 | 5 | 5 | 5 | 15 | 20 |
| 2A | 16 | 10 | 5 | 5 | 20 | 20 |
| 3A | 16 | 5 | 10 | 5 | 20 | 20 |
| 4A | 16 | 5 | 5 | 10 | 20 | 20 |
| 5A | 16 | 7 | 7 | 6 | 20 | 20 |
| 6A | 18 | 3 | 4 | 3 | 10 | 20 |

The mass of pulverized steel chip ShH15 is 20 g in all series. The mass proportions of additives are given as a percentage of the mass of the chip.

The compaction of specimens was performed using a vertical hydraulic press of the RP-50 model. The die assembly was mounted on the worktable, with the lower punch rigidly fixed and connected to a hydraulic ejector mechanism. The design geometry of the mold was selected to provide a uniform distribution of pressure across the cross-section of the briquette, while also minimizing potential heat loss during further processing stages. The external view of the forming assembly is presented in Figure 2.

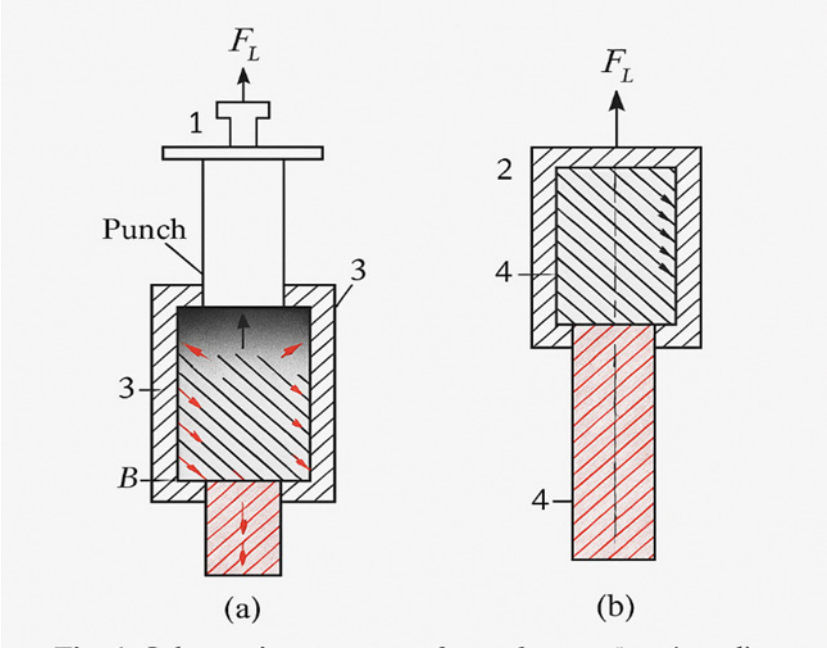



Figure 1 – Schematic structure of metal extrusion in a die:
a – RP50 press; b – extrudate

The RP-50 hydraulic press was utilized to simulate the pressure conditions required for the formation of a dense metallic structure, replicating real-world compaction scenarios for fine and powdered ferrous materials. The compaction tooling consisted of a cylindrical die with a fixed matrix, creating standard deformation conditions under applied axial load. The feed material – a homogeneous mixture of SHH15 steel dust, bentonite clay, liquid glass, and water – was manually prepared and dosed before being introduced into the die cavity.

The inner diameter of the die was 20 mm, giving a base area of approximately 0.0007065 m². Pressure during compaction was determined using the formula P=F/SP = F/SP=F/S, where force FFF is calculated as the product of pressure and base area. Under standard loading and fill weight conditions, the compaction pressure was estimated at 45 MPa, equivalent to an applied force of roughly 317 N. Across the experimental series, the actual applied pressure ranged from 100 to 300 MPa, depending on the formulation and processing mode.

After placing the mixture into the mold, pressure was applied using a manual hydraulic drive and maintained for 10 seconds to allow the formation of a cohesive, high-strength briquette. Upon completion of the pressing cycle, the sample was removed for post-processing.

To stabilize the internal structure and remove residual moisture, the formed briquettes were subjected to thermal treatment in a chamber-type SPLL-1.6.2.5.1/11-I2M muffle furnace. Drying was conducted at 350 °C for 1.5–2 hours, which was selected as the upper thermal limit for removing physically bound water while avoiding decomposition of the binders. This drying regime helped preserve the structural integrity provided by

bentonite and liquid glass, while minimizing oxidation of the steel particles. The samples were placed in thermally stable metallic containers to ensure uniform heat distribution and prevent oxidation from atmospheric exposure.

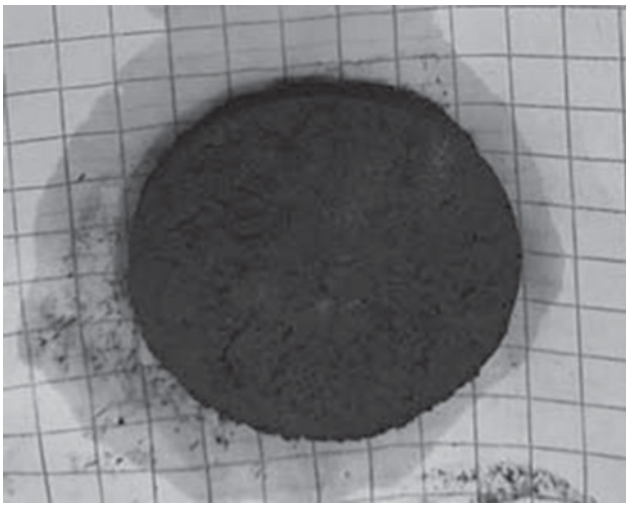


Figure 2 – Briquettes after pressing on the press RP50

The final stage of the experiment involved mechanical testing of the fabricated samples to evaluate their compressive strength and actual density. These measurements were taken only after complete cooling and structural stabilization of the briquettes. The data collected at this stage made it possible to assess both the technological viability and the effectiveness of the applied compaction regime, as well as to determine how the pressure and binder composition affected the resulting material quality.

**Results and discussion**

The adopted cold compaction approach using the RP-50 press demonstrated high reproducibility of outcomes. It also enabled the observation of direct relationships between key processing parameters – such as compaction pressure and binder content –and the resulting physical properties, including strength and density of the briquettes.

To quantify the energy demand during pressing, force readings from the hydraulic system were monitored throughout the process. Using the known cross-sectional area of the mold and the displacement of the punch, both the applied force and the specific energy input were calculated. These calculations allowed for identifying a working range of parameters that ensures an optimal trade-off between energy consumption and mechanical performance.

Figure 3 illustrates a representative deformation diagram obtained from a staged compression of ShH15 steel dust briquettes formed in a movable-matrix die system. The graph plots the relationship between the pressing force and the vertical displacement of the pressing punch, allowing for detailed analysis of compaction behavior under cold forming conditions.

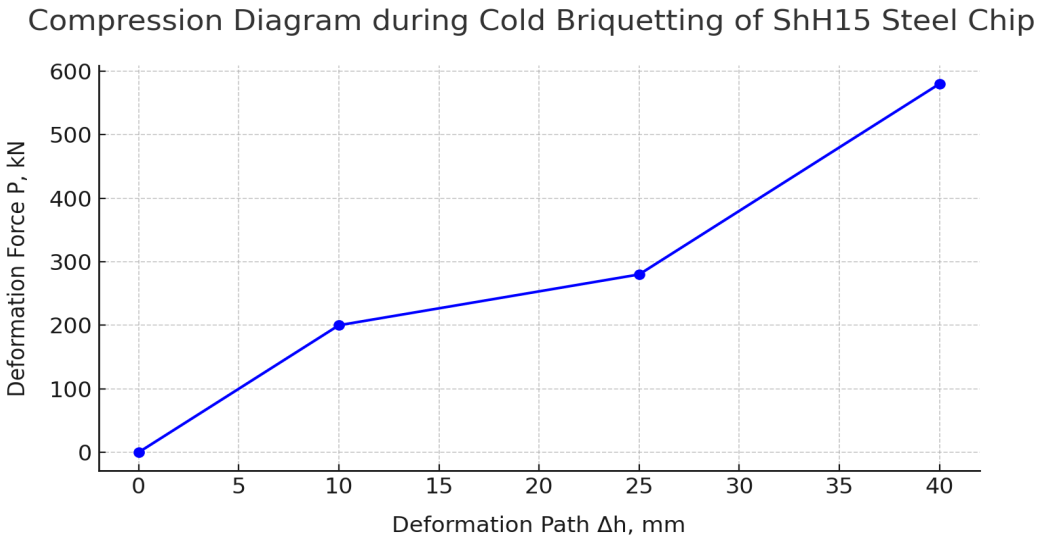



Figure 3 – Dependence of deformation force on the deformation path in cold pressing of ShH15 steel chips. Forming hole diameter 20 mm; fill height 150 mm; fill mass 20 g; temperature 20 °C.

Analysis of the diagram allows to highlight three characteristic stages of pressing:

Elastic compression and structural compaction (up to 10 mm stroke): At the initial stage, the chip is redistributed and compressed, which is accompanied by a rapid increase in force to around 200 kN, table 2.

Table 2 – Effect of binder composition and pressure on strength and density characteristics of ShH15 steel chip briquettes

| Sample | Binder Content (%) | Pressing Pressure (MPa) | Compressive Strength (MPa) | Density (g/cm³) | Density (% of theoretical) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1A | 15 | 150 | 48 | 6.3 | 82.9 |
| 2A | 20 | 200 | 56 | 6.55 | 86.3 |
| 3A | 20 | 200 | 58 | 6.6 | 87.0 |
| 4A | 20 | 200 | 52 | 6.48 | 85.4 |
| 5A | 20 | 250 | 61 | 6.75 | 89.0 |
| 6A | 10 | 300 | 63 | 6.9 | 91.1 |

Fragmentation and Dense Compaction (10–25 mm):At this intermediate stage, the rate of force increase becomes more gradual. This behavior is attributed to the breakdown of protruding particle edges and the progressive filling of internal voids. The material begins transitioning toward a continuous contact structure, which marks the onset of more stable compaction.

Plastic Flow and Maximum Densification (25–40 mm): As the particles come into close contact, a sharp rise in compaction force is observed–reaching up to 850 kN.

During this phase, intense plastic deformation takes place, resulting in the consolidation of the particulate mass into a dense, cohesive structure.

At the conclusion of the compaction cycle, the briquettes demonstrate a theoretical density level of 90–91 %, which corresponds to industry standards for secondary metal products. The applied pressure at this point ranges between 450 and 500 MPa. The specific energy required for deformation falls within 2.6–2.8 kJ/g, which exceeds that typically recorded during hot pressing operations.

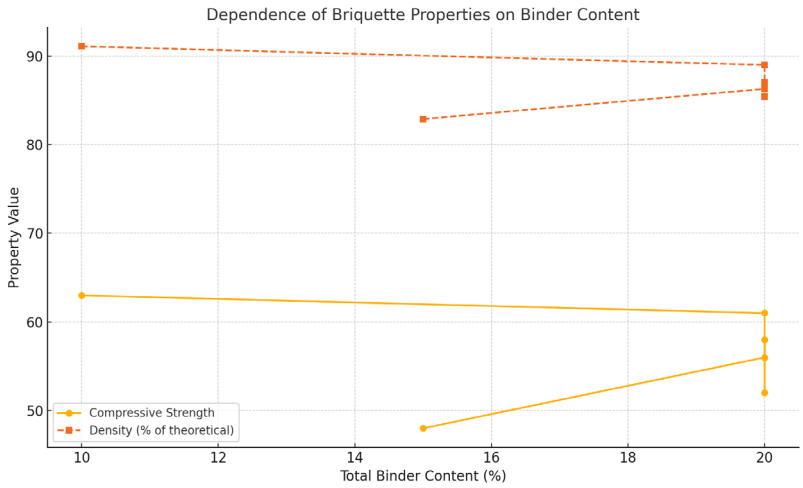



Figure 4 – Dependence of compressive strength and density on binder content in ShH15 steel chip briquettes

Figure 4 shows the dependence of the compressive strength and relative density of the briquettes on the total content of the binding components (bentonite, liquid glass and water) in the composition of the briquettes. According to the data obtained, there is a steady trend of increasing both strength and density of briquettes with an increase in the total proportion of binder from 10 % to 20 %. The minimum values of strength (48 MPa) and density (6.30 g/cm$^3$, which is about 83 % of theoretical) are observed at 15 % binding content (sample 1A). The best performance is achieved with 20 % binder content (samples 3A and 5A), where strength increases to 61 MPa and density reaches 6.75-6.90 g/cm$^3$, which is up to 91 % of theoretical steel density ShH15.

It was also observed that increasing the compaction pressure from 150 MPa to 300 MPa led to a corresponding improvement in both strength and density characteristics of the briquettes. Nevertheless, the rate of enhancement diminished at higher pressure levels, indicating that a saturation threshold of structural compaction had been reached. Notably, Sample 6A – containing only 10 % binder – demonstrated strong mechanical properties, which can be attributed to the applied high pressure of 300 MPa. This result confirms that high-density briquettes can be achieved even with minimal binder content, provided the compaction force is sufficiently elevated. Therefore, the most influential parameters affecting briquette quality are the proportion of binder components and the magnitude of pressing pressure. A balanced formulation combined with a minimum

pressure of 250 MPa appears to be optimal for achieving both structural integrity and economic efficiency.

**Conclusion**

The efficiency of densification during cold compaction of ShH15 steel dust is primarily influenced by the initial material properties, particularly its density and plasticity. Materials with higher bulk density and limited plastic deformation require substantially greater compaction forces to achieve desired densification levels. The inclusion of fine additives – such as bentonite clay and sodium silicate – facilitates the filling of voids between metal particles, thereby enhancing initial packing density and enabling more uniform stress distribution during pressing.

In the case of ShH15 steel chips with inherently low plasticity, both theoretical calculations and experimental data reveal the presence of a defined flow zone during compaction. The extent of this zone is determined by the volumetric strain and residual deformation parameters of the system. The use of a pressing setup with a movable matrix significantly reduces deformation resistance in comparison with traditional fixed-die configurations. For ShH15-type high-carbon steels, this design modification allows for a reduction in pressing force by approximately 30–35 %, ultimately contributing to reduced energy input and extended tool life.

The close agreement between experimental results and theoretical predictions – within a deviation margin of 12 % – confirms the validity of the employed physical and mathematical model for describing compaction behavior in particulate metal systems.

**Funding information**

This research was carried out within the framework of the grant of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan BR24993020 «Development and implementation of technology for manufacture of complex alloyed steels with homogeneous structure due to synergistic effects on the melt».

REFERENCES

1 **Anas, N. S., Daud, R., Hussain, S. R., Shah, S. Z.** Vliyanie davleniya na kholodnoe uplotnenie struzhki AA2024, obrazovannoy pri frezerovanii [Effect of compaction pressure on cold compaction of AA2024 swarf generated during milling operation] // Materials Today: Proceedings. – 2023. – https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.106

2 **Golvaskar, M., Ojo, S. A., Kannan, M.** Sovremennye dostizheniya v oblasti pererabotki othodov materialov: traditsionnye metody, pryamaya pererabotka i tekhnologii additivnogo proizvodstva [Recent advancements in material waste recycling: Conventional, direct conversion, and additive manufacturing techniques] // Recycling. – 2024. – Vol. 9. – № 3. – P. 43. – https://doi.org/10.3390/recycling9030043

3 **Kubon, Z., Kucerka, M., Marsalek, P., Kyncl, M.** Parametry proektirovaniya i ekspluatatsii pressov dlya briketirowaniya [The selected design and operating parameters of briquetting presses] // Metal. – 2024. – https://doi.org/10.37904/metal.2024.4926

4 **Khan, M. M. A., Joshi, S. S., Rahman, M.** Obzor printsipov i variantov povtornogo ispol'zovaniya struzhki [A review of principles and options for the re-use of machining chips] // Journal Review Article. – 2024. – (DOI: sm. istochnik)

5 **Chamakos, N., Vallejo Olivares, M., Hausberger, R., Uggowitzer, P. J.** Vliyanie uplotneniya i termicheskoy obrabotki na obrazovanie produktov [Effects of compaction and thermal pre-treatments on generation of byproducts] // SpringerLink. – 2023. – https://doi.org/10.1007/s10973-023-12670-6

6 **Grigoriev, S., Volosova, M., Milman, Y., Panchenko, S.** Metod kholodnogo pressovaniya s osovym i sdvigovym potokom poroshkov [A cold pressing method combining axial and shear flow of powder compaction] // Technologies. – 2019. – Vol 7. – № 4. – Art. 70. – https://doi.org/10.3390/technologies7040070

7 **Montes Martos, L., Corpas-Iglesias, F. A., García-Ten, J., Orts, M. J.** Zakon pressovaniya poroshkov pri kholodnoy shtampovke [Powder compaction law for cold die pressing] // Granular Matter. – 2010. – https://doi.org/10.1007/s10035-010-0203-x

8 **Cislo, P., Szafran, M., Homa, M.** Tverdo faznaya pererabotka alyuminievoy struzhki metodom sinterizatsii s impul'snym tokom [Solid state recycling of aluminum alloy chips via pulsed electric current sintering]. – 2020. – (DOI: sm. istochnik)

9 **Wan, Z., Liu, G., Liu, B., Li, H.** Obzor tverdo faznoy pererabotki alyuminievoy struzhki [Review of solid state recycling of aluminum chips] // Resources, Conservation and Recycling. – 2017. – (DOI: sm. istochnik)

10 **Puga, H., Costa, S., Barbosa, J.** Pererabotka alyuminievoy struzhki putem pryamogo vklyucheniya v rasplavy [Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts] // Foundry Study. – 2009. – (DOI: sm. istochnik)

11 **Stern, M., Kumar, A., Deivanayagam, A.** Evolyutsiya tverdo faznykh tekhnologiy pererabotki alyuminiya: obzor [Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminium: A review] // Procedia CIRP. – 2016. – https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.117

12 **Gronostajski, J., Matuszak, A.** Novye metody pererabotki struzhki alyuminiya i ego splavov [New methods of aluminium and aluminium alloy chips recycling] // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00634-8

13 **Mascarenhas, J.** Stali, poluchennye poroshkovoy metallurgiey iz struzhki chuguna [P/M steels manufactured from cast iron swarf powder] // Academia.edu. – 1990-e. – (DOI: sm. istochnik)

14 **Zhang, Y., Li, J., Wang, S.** Optimizatsiya upsayklinga struzhki Ti–6Al–4V [Optimization of upcycling of Ti–6Al–4V swarf] // Scopus Journal. – 2018. – (DOI: sm. istochnik)

15 **Vallejo Olivares, M., Chamakos, N., Hausberger, R.** Vliyanie uplotneniya i termicheskoy obrabotki na obrazovanie shlaka i gazov [Effects of compaction and thermal pre-treatments on generation of dross and off gases] // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2023. – https://doi.org/10.1007/s40831-023-00773-3

16 **Ghimire, B., Sharma, A., Thakur, A.** Obzor po tverdo faznoy pererabotke alyuminievoy struzhki [A review on solid state recycling of aluminum machining

chips] // Science of the Total Environment. – 2024. – https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.104641.1

17 **Mohamed, A. A., El-Sayed, A. A., El-Morsy, A. M.** Innovatsionnaya tverdofaznaya pererabotka alyuminiya AA6063 metodom goryachey prokatki [Innovative solid state recycling of aluminum alloy AA6063 chips through direct hot rolling] // Metals. – 2024. – T. 14. – № 12. – P. 1442. – https://doi.org/10.3390/metals14121442

18 **Schubert, D., Meyer, T., Jaeger, M.** Sovremennye dostizheniya v oblasti plavki i briketirowaniya alyuminiya [Recent advances in the remelting process for recycling aluminium with compaction effects] // Springer Journal. – 2025. – https://doi.org/10.1007/s12289-025-01904-9

Received 28.07.25.
Received in revised form 01.08.25.
Accepted for publication 07.08.25.

***В. Ю. Куликов[1], *Е. А. Байсеитова[2], Ш. Н. Тулегенова[3], П. В. Ковалев[4]***
[1,2,3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4]ҰЗУ Санкт-Петербург Ұлы Петр политехникалық университеті,
Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ.
28.07.25 ж. баспаға түсті.
01.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
07.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ТҮРЛІ ПРЕССТЕУ ЖАҒДАЙЫНДА ШХ15 БОЛАТ ШАҢЫН СУЫҚ БРИКЕТТЕУДІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ АСПЕКТІЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

*Бұл мақалада ұсақ дисперсті ШХ15 болат өңдеу қалдықтарын суық брикеттеу бойынша эксперименталды зерттеу нәтижелері берілген. Тығыздау әрекетін талдау арқылы үш дәйекті кезең анықталды: бастапқы серпімді қысу фазасы, содан кейін фрагментация және тығыздау және қатты брикет құрылымын құрайтын пластикалық консолидациямен аяқталу. Престеу процесі жылжымалы штамппен жабдықталған жабдықты пайдалана отырып, қоршаған орта температурасында жүргізілді. Нәтижелі ықшамдаулар 850кН дейінгі күштер мен 450–500МПа сәйкес қысымдар кезінде теориялық мәндердің 90–91 % диапазонында салыстырмалы тығыздыққа қол жеткізді. Материалдың деформациясы үшін қажетті меншікті энергия шығыны 2,6–2,8 кДж/г деп бағаланды. Нәтижелер термиялық алдын ала өңдеу қажеттілігін жоя отырып, энергияны үнемдейтін тығыздау арқылы өңделмеген болат қалдықтарын кәдеге жарату мүмкіндігін растайды.*

*Материалдарды тиімді пайдалану мүмкіндігін арттырумен қатар, ұсынылған әдіс өнеркәсіптік қалдықтарды төмен шығынмен және энергия үнемдеу арқылы қайта өңдеуге жол ашып, тұрақты даму мақсаттарына жетуге ықпал етеді. Бұл нәтижелер суық брикеттеу технологиясын*

*өнеркәсіпте кеңінен енгізуге негіз бола алады, әсіресе термиялық әдістер экономикалық немесе экологиялық тұрғыдан тиімсіз болған жағдайда.*

*Кілтті сөздер: брикеттеу, ШХ15 болат, болат шаңы, энергия тиімділігі, деформация диаграммасы, қайта өңдеу, престеу қысымы, тығыздау тәртібі.*

***В. Ю. Куликов[1], *Е. А. Байсеитова[2], Ш. Н. Тулегенова[3], П. В. Ковалев[4]***
[1,2,3]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[4]НИУ Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург.
Поступило в редакцию 28.07.25.
Поступило с исправлениями 01.08.25.
Принято в печать 07.08.25.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ХОЛОДНОГО БРИКЕТИРОВАНИЯ ПЫЛИ ИЗ СТАЛИ ШХ15 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРЕССОВАНИЯ

*В данной работе представлены результаты экспериментального исследования холодного брикетирования мелкодисперсных отходов механической обработки стали ШХ15. В ходе анализа процесса прессования были выделены три последовательные стадии: начальная фаза упругого сжатия, за которой следуют фрагментация и уплотнение, и завершающаяся пластической консолидацией с образованием прочной структуры брикета. Процесс прессования проводился при температуре окружающей среды на оборудовании с подвижной системой пресс-форм. Полученные прессовки достигали относительной плотности в диапазоне 90–91 % от теоретической при усилиях прессования до 850 кН и соответствующих давлениях 450–500 МПа. Удельная энергия, необходимая для деформации материала, оценивалась в 2,6–2,8 кДж/г. Результаты подтверждают возможность утилизации непереработанных стальных отходов путем энергоэффективного прессования, исключающего необходимость предварительной термической обработки.*

*Кроме повышения эффективности использования материалов, предложенный метод способствует достижению устойчивого развития за счёт недорогой и энергосберегающей переработки промышленных отходов. Полученные данные могут стать основой для масштабирования процессов холодного брикетирования в промышленности, особенно в тех случаях, когда применение термических методов экономически или экологически нецелесообразно.*

*Ключевые слова: брикетирование, сталь ШХ15, стальная пыль, энергоэффективность, диаграмма деформации, переработка, давление прессования, характеристики прессования.*

МРНТИ 53.37.29

https://doi.org/10.48081/GMBM5273

***Е. А. Қизатова[1],*А. С. Қизатов[2], М. Т. Айдарова[3], Ш. Р. Курбанбеков[4], Л. Б. Баятанова[5]***

[1,2,3,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

[4]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжа Ахмет Ясауи, Республика Казахстан, г. Туркестан.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8296-6355

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9200-8058

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5510-0568

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-4746

*e-mail: kizatov.aibar.sovetbekuly@gmail.com

# *ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА СТРУКТУРУ КОМПОЗИТОВ WC–FE И WC–NI*

*В работе исследовано влияние продолжительности механосинтеза на морфологические и структурные характеристики порошковых композитов на основе карбида вольфрама (WC), легированных железом (Fe) и никелем (Ni). Были синтезированы четыре состава: WC88–Fe12, WC95–Fe5, WC88–Ni12 и WC95–Ni5. Механическая активация проводилась в атмосфере аргона при скорости вращения 500 об/мин в течение 1, 2 и 4 часов. По результатам гранулометрического анализа определены значения среднего диаметра частиц ($D_{50}$) и прослежена динамика изменения распределения частиц в зависимости от времени измельчения. Установлено, что увеличение продолжительности механообработки приводит к укрупнению частиц, особенно выраженному в системах с высоким содержанием WC (95 мас.%), где после 4 часов обработки наблюдаются агрегация и налипание порошков на стенки контейнера и измельчающие шары мельницы.*

*Морфология частиц исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), результаты которой коррелируют с данными гранулометрии. На ранних стадиях механосинтеза наблюдается эффективное дробление исходных частиц, однако при длительной обработке происходит их агломерация: измельчённые частицы слипаются, формируя рыхлые конгломераты. Это приводит к укрупнению агрегатов за счёт механохимического взаимодействия и межчастичной адгезии.*

*Рентгенофазовый анализ (РФА) выявил снижение интенсивности и уширение дифракционных пиков фаз WC и металлических компонентов, что указывает на снижение кристалличности, уменьшение размеров кристаллитов и рост дефектности кристаллической решётки. Полученные результаты позволили определить оптимальные режимы механосинтеза, обеспечивающие*

*формирование однородных порошковых смесей, пригодных для последующего этапа спекания.*

*Ключевые слова: карбид вольфрама, железо, никель, механосинтез, порошковые композиты, морфология, структурные характеристики.*

**Введение**

Твердые сплавы на основе карбида вольфрама (WC) с металлической связующей фазой являются ключевыми материалами для изготовления режущего инструмента, штампов, деталей горного и бурового оборудования благодаря их высокой твёрдости, износостойкости и термической стабильности [1; 2; 3]. Наиболее широко применяемой связкой в таких сплавах традиционно выступает кобальт (Co), обеспечивающий хорошее смачивание WC-зёрен и высокие механические свойства конечного композита [4].

Тем не менее, широкое использование WC–Co сплавов сопряжено с рядом серьёзных проблем. Во-первых, кобальт отличается высокой стоимостью и нестабильностью поставок на глобальном рынке [5]. Во-вторых, WC–Co материалы обладают повышенной токсичностью и канцерогенностью, особенно в виде аэрозольных и пылевых форм, что подтверждено исследованиями IARC (International Agency for Research on Cancer) [6; 7]. В-третьих, под действием нейтронного облучения в составе WC–Co возможно образование радиоактивного изотопа ^60Co, ограничивающего их применение в ядерной технике и энергетике [8; 9].

Эти факторы способствуют активному поиску экологически безопасных и доступных альтернатив кобальту. Среди них особый интерес вызывают железо (Fe) и никель (Ni), которые продемонстрировали перспективные результаты как связующие компоненты в твердых сплавах [10; 11; 12]. Железо обладает высокой растворимостью углерода, благоприятными технологическими свойствами и невысокой стоимостью, тогда как никель обеспечивает хорошую пластичность, термостойкость и коррозионную стойкость [13; 14; 15]. Кроме того, сплавы WC–Fe и WC–Ni формируют металлическую γ-фазу, которая способствует эффективному связыванию зерен карбида вольфрама, обеспечивая высокую прочность и износостойкость [16].

Ранее проведённые исследования показали, что свойства порошковых смесей WC существенно зависят от характеристик металлической связки, её содержания и способа получения [17; 18]. Высокоэнергетическая механическая активация (механосинтез) зарекомендовала себя как эффективный метод формирования однородной ультрадисперсной структуры, повышения реакционной способности компонентов и накопления дефектов кристаллической решётки, способствующих последующему уплотнению и спеканию [19; 20]. Однако сравнительный анализ WC–Fe и WC–Ni порошков с различным содержанием после механоактивации остаётся недостаточно изученным.

В данной работе исследуются четыре состава порошковых смесей, которые предоставлены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав порошковых смесей для исследования

| Образец | WC,% | Fe,% | Ni,% |
|---|---|---|---|
| № 1 | 88 | 12 | - |
| № 2 | 95 | 5 | - |
| № 3 | 88 | - | 12 |
| № 4 | 95 | - | 5 |

В рамках настоящей работы планируется исследование порошков на основе WC с металлической связующей фазой Fe/Ni, полученные методом высокоэнергетической планетарной механообработки. Основное внимание уделено влиянию содержания и природы связующей фазы на гранулометрический состав, морфологию, фазовый состав, размеры кристаллитов и микродеформации WC-композитов. Работа направлена на получение научных основ для создания безкобальтовых порошков с регулируемыми свойствами, пригодных для последующей компактизации и использования в пресс-металлургии.

**Материалы и методы**

Исследование проводилось на микронных порошках монокарбида вольфрама WC производства Hebei Suoyi New Material Technology, Hebei Province, China. (согласно паспортным данным производителя исходные размеры частиц составляли менее 30 мкм и нанопорошки железа, никеля, полученные методом плазменного синтеза в дуге постоянного тока с восстановительным отжигом в среде водорода. Выбор микронных порошков карбида вольфрама был обусловлен задачей получения мелкозернистых твердых сплавов с улучшенными механическими свойствами.

Общий химический состав исследуемых порошков представлен в таблице 2. Химический состав заводских порошков WC и Fe, Ni приведен по данным сертификатов поставщика (Hebei Province).

Таблица 2 – Химический состав исходнных порошков

| Характеристика | Карбид вольфрама (WC) | Никелевый порошок (Ni) | Железный порошок (Fe) |
|---|---|---|---|
| Основной компонент | WC ≥99% | Ni 99.9% | Fe 99.9% |
| Al | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| C | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| Co | 0.004 | 0.025 | 0.003 |
| Cr | - | - | 0.002 |
| Cu | 0.003 | 0.001 | 0.001 |
| Fe | 0.003 | 0.001 | - |
| Ni | 0.002 | - | 0.002 |
| O | - | - | 0.0005 |
| S | 0.001 | - | 0.001 |
| Si | 0.001 | 0.003 | - |
| Zn | 0.001 | - | 0.002 |

Сравниваются 4 образца с различным химическим составом легирующих элементов.

Проведена серия экспериментов по механосинтезу порошковой системы на основе WC с различными легирующими компонентами (Fe, Ni,).

Загрузка компонентов в размольный стакан выполнялась в вакуумном перчаточном боксе VGB-3C, в инертной среде аргона. Механосинтез порошковых смесей системы WC с легирующими компонентами осуществлялся на планетарной шаровой мельнице Pulverisette 7 Premium line, Fritsch GmbH, Idar-Oberstein, Germany, где основными параметрами являлись ускорение, длительность и соотношение шаров к порошку.

В результате механосинтеза были получены порошковые смеси на основе WC с различными содержаниями металлической связки (Fe или Ni). После завершения процесса активации полученные смеси аккуратно сортировались по отдельным колбам и маркировались с указанием состава и параметров обработки (время, связка, режим). Все образцы направлялись на дальнейшее исследование методами лазерной дифракции (анализатор частиц), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА). Условия проведенных экспериментов по механосинтезу приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Режимы для механоактивации WC-FeNi, WC-Fe, WC-Ni и состав порошковой смеси

| Наименование образца | Время, мин | Скорость вращения, об/мин | Среда | Соотн. масс (шар/порошок) |
|---|---|---|---|---|
| Смешивание порошковых смесей | 20 | 200 | Аргон | 10:1 |
| Механосинтез | | | | |
| Образец 1 WC88-Fe12 | 60 | 500 | Аргон | 10:1 |
| | 120 | | | |
| | 240 | | | |
| Образец 2 WC95-Fe5 | 60 | | | |
| | 120 | | | |
| | 240 | | | |
| Образец 3 WC88-Ni12 | 60 | 500 | Аргон | 10:1 |
| | 120 | | | |
| | 240 | | | |
| Образец 4 WC95-Ni5 | 60 | | | |
| | 120 | | | |
| | 240 | | | |

Перед началом механической активации порошки WC и металлической связки (Fe или Ni), предварительно точно взвешенные, проходили стадию предварительного смешивания в течение 20 минут при скорости 200 об/мин в размольных стаканах с мелющими шарами из нержавеющей стали. После этого

размольные стаканы устанавливались в планетарную микромельницу Pulverisette 7 premium line. Соотношение массы шаров к массе порошка составляло 10:1, масса порошковой смеси 9 грамм, а скорость вращения при активации – 500 об/мин. Во все порошковые смеси добавлялся химический агент – стеариновая кислота в количестве 3 мас.% от массы порошка. Использование стеариновой кислоты предотвращало агломерацию частиц и повышало эффективность диспергирования в процессе высокоэнергетического измельчения.

Эволюция морфологии и структурных характеристик порошковых образцов исследовалась с использованием комплекса современных аналитических методов. Морфология частиц и их распределение на поверхности изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM, Tescan Mira) в режиме композиционного и топографического контраста, размер частиц определялся с помощью лазерного дифракционного анализатора (Analysette-22 NeXT Nano, Fritsch, Germany)а фазовый состав и структурные свойства порошков изучались с помощью рентгеновской дифракции (Рентгеновский дифрактометр Xpert X PertPRO (Malvern Panalytical Empyrean, Нидерланды). Анод-Cu, угол измерения 20 - 90°, напряжение рентгеновской трубки 45 кВ, ток 40 мА, шаг, 0,02 время измерения на каждом шаге 1,5 с.

**Результаты и обсуждение**

Ключевым этапом подготовки порошковых смесей для искрового плазменного спекания является механообработка, которая определяет размер частиц, их распределение и морфологические характеристики порошков, а следовательно – свойства конечного композита. Для оценки изменения морфологии порошков в зависимости от продолжительности механообработки выполнен гранулометрический анализ с использованием анализатора частиц. Значения среднего диаметра частиц D50, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Средний размер частиц (D50) WC–Fe и WC–Ni в зависимости от времени обработки

| Образец | D50 (средний размер частиц, мкм) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Смешивание | 1 час | 2 часа | 4 часа |
| WC88-Fe12 | 3,40 | 5,63 | 6,36 | 10,3 |
| WC95-Fe5 | 3,02 | 5,41 | 6,75 | — |
| WC88-Ni12 | 2,87 | 4,00 | 5,50 | 7,27 |
| WC95-Ni5 | 3,20 | 4,43 | 5,96 | — |

На примере образцов WC88-Fe12 и WC88-Ni12 видно, что характер измельчения и агрегации порошков меняется с увеличением времени механообработки. В исходных смесях (до обработки) средний размер частиц D50 составлял 2.17 мкм для WC88-Fe12 и 2.53 мкм для WC88-Ni12, что указывает на достаточно мелкодисперсные начальные материалы.

После 1 часа обработки частицы несколько увеличились в размере – D50 вырос до 4.42 мкм (WC88-Fe12) и 3.53 мкм (WC88-Ni12). Это, скорее всего,

связано с начальной агрегацией частиц, вызванной пластической деформацией и большой поверхностью порошка. При увеличении времени до 2 часов размер частиц продолжил расти: в системе WC88-Ni12 он достиг 6.71 мкм, а в WC88-Fe12 остался почти на том же уровне – 4.31 мкм. Это может означать, что процессы измельчения и слипания частиц идут одновременно.

После 4 часов обработки наблюдается резкий рост D50 – до 17.14 мкм для WC88-Fe12 и до 7.40 мкм для WC88-Ni12, что говорит о значительной агломерации или начале холодной сварки порошков.

В композитах с более высоким содержанием WC, таких как WC95-Fe5 и WC95-Ni5, при длительной (4 ч) механообработке наблюдались выраженные технологические сложности в виде налипания и спекания порошков. В этих смесях образцы удалось получить только после 1 и 2 часов обработки, на которых были определены значения D50: для WC95-Fe5 – 5.21 мкм (1 ч) и 4.89 мкм (2 ч), для WC95-Ni5 – соответственно 5.93 мкм и 5.34 мкм. На рисунке 1 приведены фото, иллюстрирующие характер налипания после длительной обработки.

WC95-Fe5 WC95-Ni5

Рисунок 1 – Налипание частиц на шары и стенки при 4-часовой обработке смесей с высоким содержанием WC

Это поведение связано с высокой хрупкостью WC и его массовой долей в системе. При превышении определённого времени механообработки происходит интенсивная холодная сварка, особенно на фоне низкой пластичности связующего (Fe или Ni в малой концентрации). Это создаёт условия для агрегации и образования спечённых агломератов, которые теряют дисперсность и становятся непригодными для дальнейшего спекания.

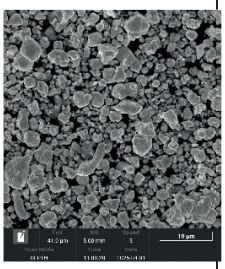
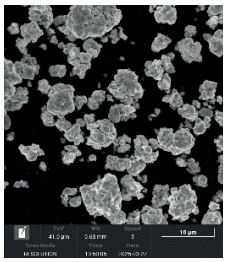
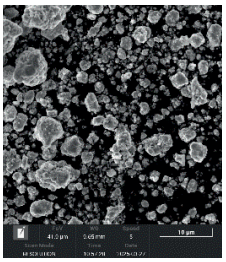
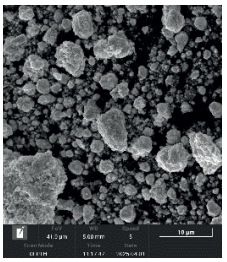
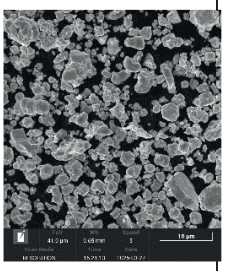
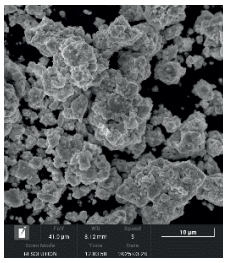
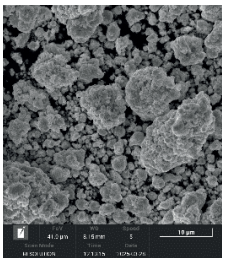
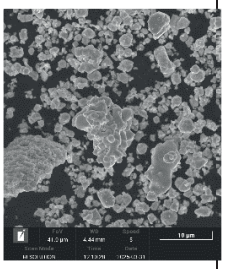
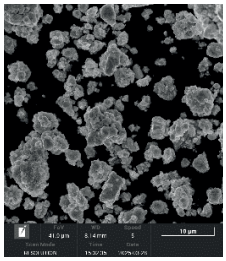
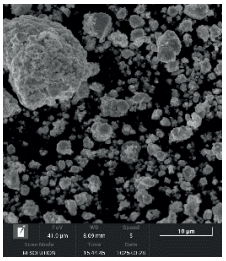
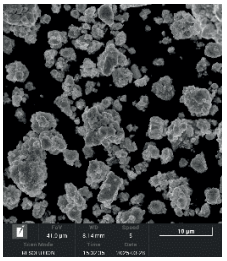
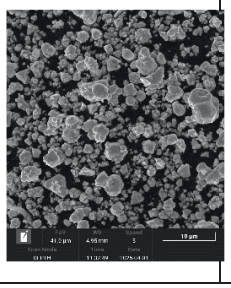
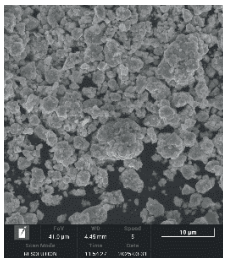
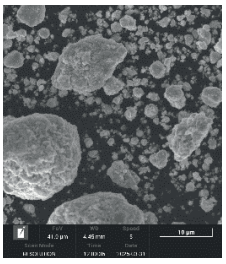
Результаты проведённого анализа показали, что наиболее стабильное поведение при механообработке демонстрируют смеси WC88-Fe12 и WC88-Ni12, тогда как системы WC95-Fe5 и WC95-Ni5 склонны к налипанию и агрегации при увеличении продолжительности измельчения свыше 2 часов. Установлено, что повышение содержания связующего компонента способствует более эффективному диспергированию частиц и предотвращению агломерации. В целом, оптимальной продолжительностью механообработки для получения однородных

порошков с минимальной тенденцией к укрупнению можно считать интервал 1–2 часа.

Изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при увеличении ×5000, приведенные в таблице 5, позволили визуализировать морфологические особенности порошковых частиц и подтвердить результаты гранулометрического анализа. В исходных смесях (до механоактивации) наблюдаются частицы с относительно гладкой поверхностью и произвольной формой. После 1 и 2 часов механического легирования частицы в системах WC88-Fe12 и WC88-Ni12 приобретают более шероховатую поверхность и мелкодисперсную структуру, что свидетельствует о деформации, разрушении и измельчении частиц в процессе механообработки. Также наблюдается частичное формирование агломератов, состоящих из более мелких фрагментов, прочно сцепленных за счёт пластической деформации и высокой энергии поверхностей.

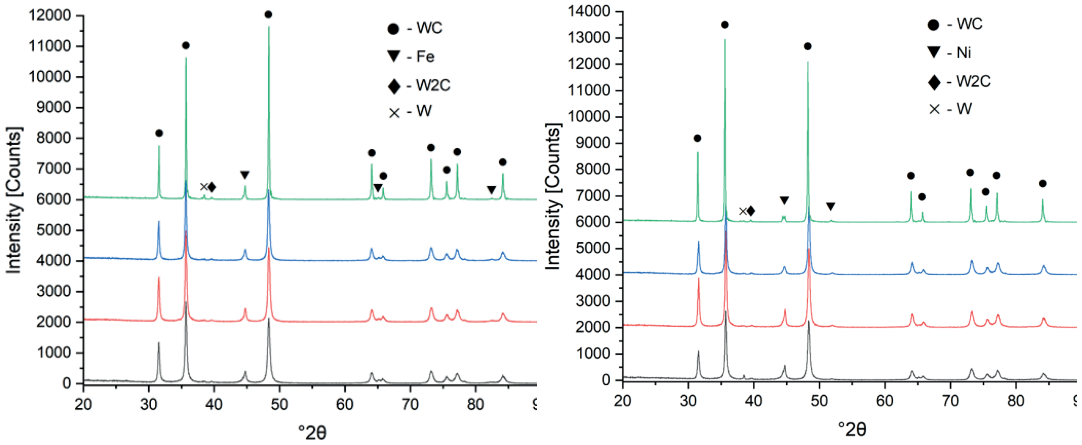
Особенно заметны различия между системами с различной массовой долей карбида вольфрама. Для WC88-систем характерна более однородная морфология с преобладанием отдельных частиц размером менее 5 мкм, тогда как WC95-системы после 2 часов обработки демонстрируют склонность к агломерации и локальному спеканию, что подтверждается появлением укрупнённых конгломератов и сглаженных переходов между частицами на микрофотографиях. Такие морфологические особенности могут негативно сказываться на прессуемости и равномерности уплотнения в последующем этапе спекания. Полученные микроструктурные данные находятся в хорошем соответствии с результатами лазерной дифракции, показывая, что оптимальное диспергирование и сохранение активности достигается при продолжительности механоактивации не более 2 часов, особенно для композиций с более низким содержанием WC.

Таблица 5 – СЭМ-изображения порошков WC–Fe и WC–Ni с разной продолжительностью механоактивации (×5000)

| Образец | Смешивание | 1 час | 2 часа | 4 часа |
|---|---|---|---|---|
| WC88-Fe12 |  |  |  |  |
| WC95-Fe5 |  |  |  | Образец не был получен из-за сильного налипания |
| WC88-Ni12 |  |  |  |  |
| WC95-Ni5 |  |  |  | Образец не был получен из-за сильного налипания |

Для определения фазового состава и оценки влияния продолжительности механообработки на структурные изменения порошков WC–Fe и WC–Ni систем был проведён рентгенофазовый анализ. На рисунках 2 и 3 представлены дифрактограммы для каждого из четырёх составов (WC88–Fe12, WC95–Fe5, WC88–Ni12, WC95–Ni5), полученные после различной продолжительности измельчения (1, 2 и 4 часа), а также после стадии начального смешивания. На графиках наблюдается снижение интенсивности и незначительное уширение рефлексов карбида вольфрама (WC) и металлической связующей фазы (Fe или

Ni), что свидетельствует о постепенном уменьшении размеров кристаллитов и накоплении микродеформаций в решётке вследствие интенсивного механического воздействия.

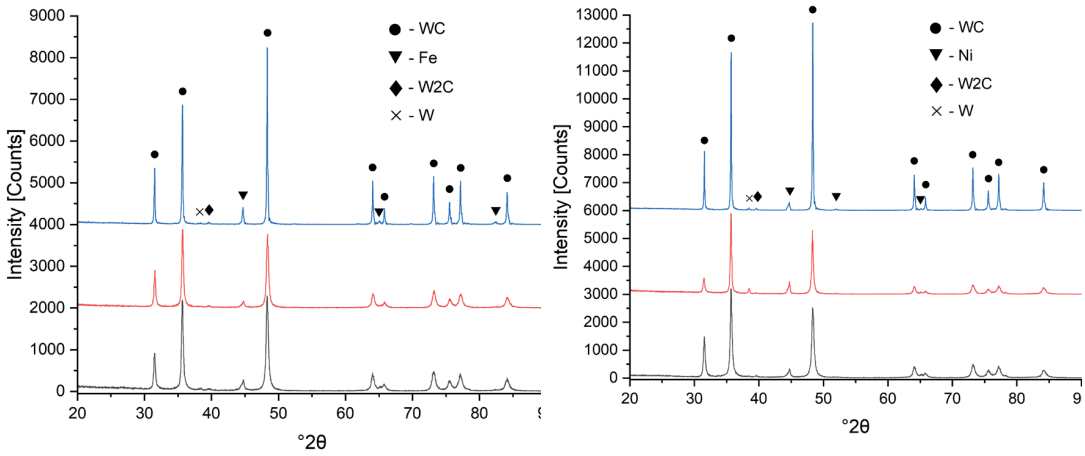



WC88-Fe12 WC88-Ni12

Рисунок 2 – Рентгенофазовые дифрактограммы порошков WC88–Ni12/Fe12 после механообработки разной продолжительности

Особенно выраженные изменения фиксируются в образцах WC88–Ni12, где после 4 часов обработки наблюдается заметное уменьшение интенсивности пиков металлического никеля и некоторая их дестабилизация, что может быть связано с более равномерным распределением связующей фазы в матрице WC. В то же время, характерные пики WC сохраняются во всех случаях, подтверждая стабильность основной фазы при выбранных режимах механообработки.

В случае композиций WC95–Fe5 и WC95–Ni5 проведение рентгенофазового анализа после 4 часов измельчения оказалось невозможным. Это связано с тем, что в процессе продолжительной механообработки наблюдалось интенсивное налипание порошков на стенки измельчительного стакана и поверхность измельчающих шаров, что препятствовало извлечению достаточного количества порошка для проведения измерений. Подобное явление может быть обусловлено высокой степенью активации системы, ведущей к локальному перегреву, агломерации, а также частичному спеканию или свариванию частиц за счёт пластической деформации и механохимического взаимодействия. Особенно это характерно для систем с высоким содержанием WC, где высокая твёрдость и абразивность усиливают контактное взаимодействие между частицами и стенками камеры.




WC95–Fe5 WC95–Ni5

Рисунок 3 – Рентгенофазовые дифрактограммы порошков WC95–Ni5/Fe5 после механообработки разной продолжительности

Для количественной оценки изменений в структуре материала в результате механоактивации были рассчитаны размеры кристаллитов основных фаз. Размер кристаллитов определялся с помощью математических расчетов на основе уравнения Шеррера:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta}$$

где D – размер кристаллита, K – коэффициент формы, λ – длина волны рентгеновского излучения, β – полная ширина пика на половине высоты (FWHM), θ – угол дифракции. Ширины пиков определялись путем подгонки функции Гаусса в программе HighScore. Полученные значения приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Размеры кристаллитов (Å) в зависимости от времени механообработки

| **Образцы** | **0 ч (смешивание)** | **1 ч** | **2 ч** | **4 ч** |
|---|---|---|---|---|
| WC88–Fe12 | 545,3 | 319,2 | 255,2 | 226,1 |
| WC88–Ni12 | 532,6 | 242,7 | 238,6 | 207,4 |
| WC95–Fe5 | 556,4 | 255,7 | 211,5 | – |
| WC95–Ni5 | 583,9 | 267,2 | 232,3 | – |

Как видно из таблицы, с увеличением времени измельчения наблюдается закономерное уменьшение размеров кристаллитов для всех исследованных систем. В исходном состоянии (после смешивания) размеры кристаллитов находятся в пределах 530–580 Å. Уже после одного часа активации они снижаются в 1,5–2 раза, что указывает на начало активного разрушения кристаллической решётки.

Максимальное снижение размеров наблюдается у образца WC88–Ni12: с 532,6 Å до 207,4 Å после 4 часов активации. Аналогичное поведение прослеживается и у системы WC88–Fe12. Такие изменения согласуются с наблюдаемым уширением дифракционных пиков и ростом микродеформаций, отражая увеличение степени дефектности и дисперсности фаз.

Примечательно, что во всех исследованных композициях наиболее выраженное снижение интенсивности дифракционных пиков наблюдается после 1 часа измельчения. Минимальные значения интенсивности на данном этапе указывают на наиболее активное разрушение кристаллической решётки, сопровождаемое накоплением дислокаций, микродеформаций и уменьшением размера кристаллитов. Это приводит к снижению степени дальнего порядка и, как следствие, к существенному ослаблению дифракционного сигнала. На более длительных стадиях измельчения (2 и 4 часа) снижение интенсивности пиков уже не столь выражено, а сами пики сохраняются на примерно одинаковом уровне. Подобное поведение может быть обусловлено частичной стабилизацией микроструктуры, перераспределением остаточных напряжений и укрупнением частиц вследствие агломерации.

Снижение размера кристаллитов подтверждает эффективность механохимического воздействия и является важным параметром для понимания структурной эволюции композиций на основе WC и металлических связующих при интенсифицированной обработке.

**Информация о финансировании**

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта ПЦФ BR24992925 «Разработка технологии и материалов для инновационного развития обрабатывающей промышленности Республики Казахстан»

**Выводы**

В результате проведенного исследования установлено влияние времени механической активации на морфологические и структурные характеристики композитных порошков на основе WC с различными металлическими связками (Fe и Ni). Гранулометрический анализ показал существенное увеличение среднего размера частиц после 1–2 часов измельчения. В течение первых 1–2 часов механообработки происходит одновременное протекание процессов измельчения и агрегации частиц. При увеличении времени обработки до 4 часов возрастает интенсивность агломерации и проявляется склонность к локальному спеканию, особенно в смесях с высоким содержанием WC (WC95), что затрудняет извлечение материала и проведение дальнейшего анализа. Эти тенденции подтверждены результатами СЭМ, демонстрирующими формирование плотных агрегатов и неоднородных участков.

Дифракционный анализ выявил характерные изменения: уширение и снижение интенсивности дифракционных пиков WC и металлических фаз при увеличении времени измельчения, что связано с уменьшением размеров кристаллитов, ростом микродеформаций и нарастанием напряжений в решетке. Минимальные

значения интенсивности пиков фиксируются уже после 1 часа активации, что связано с переходом структуры в высоко-дефектное состояние и разрушением упорядоченных областей. При дальнейшем увеличении времени обработки наблюдается стабилизация или умеренное восстановление дифракционных характеристик, вероятно связанное с агломерацией частиц.

С учетом полученных данных можно сделать вывод, что оптимальная продолжительность механической активации для достижения минимальных размеров частиц и кристаллитов при сохранении технологической пригодности порошков составляет от 1 до 2 часов. Более длительная обработка приводит к нежелательным эффектам агломерации и снижает качество порошков для последующего использования. Полученные результаты являются важной основой для дальнейшей оптимизации режимов механосинтеза твердых сплавов и композиционных материалов на основе WC.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Schubert, W. D., Lassner, E.** Cemented carbides-a success story. – 2010. – [Electronic resource]. – https://www.itia.info/assets/files/Newsletter_2010_06.pdf.

2 **García, J., Ciprés, V.C., Blomqvist, A., Kaplan B.** Cemented carbide microstructures: A review // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Vol. 80. – P. 40–68. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004.

3 **Zeiler, B.** Tungsten and cobalt, the two key elements of the hardmetal industry // In: 11th international conference on the science of hard materials. – Khao Lak. 2019.

4 **Fang, Z. Z., Koopman, M. C., Wang, H.** Cemented tungsten carbide hardmetal – An introduction // In D. Mari, L. Llanes, & V. K. Sarin (Eds.), Comprehensive Hard Materials. – 2014. – Vol. 1 – P. 123–137. – https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096527-7.00004-0.

5 **Sverdrup, H. U., Ragnarsdóttir, K. V., Koca, D.** Integrated modelling of the global cobalt extraction, supply, price and depletion of extractable resources using the WORLD6 model. Biophysical Economics and Resource Quality. – 2017. – Vol. 2(4) – P. 17. – https://doi.org/10.1007/s41247-017-0017-0.

6 International Agency for Research on Cancer (IARC). Cobalt in hard metals and cobalt sulfate, gallium arsenide, indium phosphide and vanadium pentoxide. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. – 2006. – p. 86.

7 **Krawitz A., Drake E.** Residual stresses in cemented carbides – an overview // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2015. – Vol. 49. – P. 27–35. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.07.018.

8 **Arato, P., Bartha, L., Porat, R., Berger, S., Rosen, A.** Sintering of nanocrystalline WC-Co composite powder. Nanostructured Materials. – 1998. – Vol. 10(2). – P. 245–254. – https://doi.org/10.1016/S0965-9773(98)00067-1

9 **Yang, Y., Zhang, C., Wang, D., et al.** Additive manufacturing of WC–Co hardmetals: A review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 108. – P. 1653–1673.

10 **Pan, Y., Wang, H., Fang, Z. Z.** Effects of metal binder content and carbide grain size on the microstructure and properties of SPS manufactured WC–Fe composites // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 784. – P. 519–526. – https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.126.

11 **Shichalin, O. O., Buravlev, I. Y., Papynov, E. K., Golub, A. V., Belov, A. A., Buravleva A. A., Sakhnevich, V. N., Dvornik M. I., Vlasova, N. M, Gerasimenko, A. V., Reva, V. P., Yudakov, A. A.** Comparative study of WC-based hard alloys fabrication via spark plasma sintering using Co, Fe, Ni, Cr, and Ti binders // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020. – Vol. 102 – https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105725

12 **Cramer, C. L., Preston, A.D., Ma, K., Nandwana, P.** In-situ metal binder-phase formation to make WC-FeNi Cermets with spark plasma sintering from WC, Fe, Ni, and carbon powders // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020. – Vol. 88. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105204.

13 **Chang, S. H., Chen, S. L.** Characterization and properties of sintered WC–Co and WC–Ni–Fe hard metal alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 585 – P. 407–413. – http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.188

14 **Fernandes, C., Silva, F. S.** Structure and mechanical properties of WC–Ni and WC–Ni–Cr cemented carbides // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. – Vol. 27(5). – P. 717–721. – https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.01.005.

15 **Dvornik, M. I., Zaitsev, A. V.** Variation in strength, hardness, and fracture toughness in transition from medium-grained to ultrafine hard alloy // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2018. – Vol. 59(5). – P. 563–569. – https://doi.org/10.3103/S1067821218050024

16 **Straumal, B. B., Konyashin, I.** WC-Based Cemented Carbides with High Entropy Alloyed Binders: A Review. – 2023. – Vol. 13(1). – P. 123. – https://doi.org/10.3390/met13010171.

17 **Papynov, E. K., Shichalin, O. O., Medkov, M. A., Grishchenko, D. N., Tkachenko, I. A., Fedorets, A. N., Pechnikov, V. S., Golub, A. V., Buravlev, I. Yu., Tananaev, I. G., Avramenko, V. A.** Spark Plasma Sintering of Special-Purpose Functional Ceramics Based on $UO_2$, $ZrO_2$, $Fe_3O_4$/α-$Fe_2O_3$ // Glass Physics and Chemistry. – 2018. – Vol. 44(6). – P. 632–640. – https://doi.org/10.1134/S1087659618060159.

18 **Siwak, P., Garbiec, D.** Microstructure and mechanical properties of WC–Co–$Cr_3C_2$ cermets obtained by spark plasma sintering. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26(10). – P. 2641–2646. – https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64390-X

19 **Munir, Z. A., Ohyanagi, M.** Perspectives on spark plasma sintering. Journal of Materials Science. – 2021. – Vol. 56(1). – P. 1–15. – https://doi.org/10.1007/s10853-020-05186-1.

20 **Konyashin, I., Lachmann, F., Ries, B., Mazilkin, A. A., Straumal, B. B., Kübel, C., Llanes, L., Baretzky, B.** Strengthening zones in the Co matrix of WC–Co cemented carbides // Scripta Materialia. – 2014. – V. 83. – P. 17–20. – https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.03.026.

Поступило в редакцию 03.06.25.
Поступило с исправлениями 15.07.25.
Принято в печать 25.07.25.

***Е. А. Қизатова[1], *А. С. Қизатов[2], М. Т. Айдарова[3], Ш. Р. Курбанбеков[4], Л. Б. Баятанова[5]***
[1,2,3,5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[4]Ходжа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.
03.06.25 ж. баспаға түсті.
15.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
25.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## WC-FE ЖӘНЕ WC-NI КОМПОЗИТТЕРІНІҢ ҚҰРЫЛЫМЫНА МЕХАНИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІКТІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

*Бұл жұмыста вольфрам карбиді (WC) негізіндегі, темір (Fe) және никельмен (Ni) легирленген ұнтақ композиттердің морфологиялық және құрылымдық сипаттамаларына механикалық синтез ұзақтығының әсері зерттелді. Зерттеу үшін төрт құрам дайындалды: WC88–Fe12, WC95–Fe5, WC88–Ni12 және WC95–Ni5. Механикалық активация инертті аргон атмосферасында, 500 айн/мин айналу жылдамдығымен, 1, 2 және 4 сағат бойы жүргізілді. Гранулометриялық талдау нәтижелері бойынша бөлшектердің орташа диаметрі ($D_{50}$) анықталып, ұнтақ бөлшектерінің өлшемдік таралуының өңдеу уақытына байланысты өзгеру динамикасы сипатталды. Механосинтез уақытының ұлғаюы бөлшектердің іріленуіне әкелетіні анықталды. Бұл үрдіс WC мөлшері 95 масс. % болатын құрамдарда айқын байқалып, 4 сағаттық өңдеуден кейін ұнтақтардың контейнер қабырғаларына және диірменнің ұсақтаушы шарларына жабысып қалуына алып келді.*

*Бөлшектер морфологиясы сканерлейтін электрондық микроскопия (СЭМ) әдісімен зерттелді, оның нәтижелері гранулометриялық деректермен үйлеседі. Механосинтездің бастапқы кезеңдерінде бөлшектер тиімді ұсақталады, алайда өңдеу уақыты ұзартылған сайын, ұсақталған бөлшектер бір-бірімен жабысып, борпылдақ агломераттар түзеді. Бұл механохимиялық әсерлесу мен бөлшектер арасындағы адгезия салдарынан агрегаттардың іріленуіне алып келеді.*

*Рентгенфазалық талдау (РФА) WC және металл фазаларына сәйкес келетін дифракциялық шыңдардың қарқындылығының төмендеуі мен кеңеюін көрсетті, бұл кристалдылықтың төмендеуін, кристаллиттердің өлшемінің*

*кішіреюін және кристалдық тордағы ақаулардың артуын көрсетеді. Алынған нәтижелер кейінгі спекание үдерісіне жарамды біртекті ұнтақ қоспаларын алу үшін механосинтездің оңтайлы режимдерін анықтауға мүмкіндік берді.*

*Кілтті сөздер: вольфрам карбиді, темір, никель, механосинтез, ұнтақ композиттер, морфология, құрылымдық сипаттамалар.*

***Y. A. Kizatova[1],*A. S. Kizatov[2], M. T. Aidarova[3],***
***S. Kurbanbekov[4], L. B. Bayatanova[5]***
[1,2,3,5]D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[4]Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
Republic of Kazakhstan, Turkestan.
Received 03.06.25.
Received in revised form 15.07.25.
Accepted for publication 25.07.25.

## IMPACT OF MECHANOACTIVATION ON STRUCTURE OF WC-FE AND WC-NI COMPOSITES

*This study investigates the effect of mechanical synthesis duration on the morphological and structural characteristics of tungsten carbide (WC)-based composite powders alloyed with iron (Fe) and nickel (Ni). Four compositions were synthesized: WC88–Fe12, WC95–Fe5, WC88–Ni12, and WC95–Ni5. Mechanical activation was performed in an argon atmosphere at a rotation speed of 500 rpm for 1, 2, and 4 hours. Particle size distribution analysis was conducted, and the median particle diameter ($D_{50}$) was determined to assess the evolution of particle size with increasing milling time. It was found that prolonged mechanical treatment led to particle coarsening, especially in systems with high WC content (95 wt.%), where after 4 hours of milling, noticeable powder agglomeration and adhesion to the container walls and grinding balls occurred.*

*The particle morphology was examined using scanning electron microscopy (SEM), and the results were consistent with the granulometric data. At the early stages of mechanical synthesis, efficient particle fragmentation was observed; however, with longer milling durations, particle agglomeration occurred. Fine particles began to stick together, forming loose agglomerates, leading to an increase in aggregate size due to mechanochemical interactions and interparticle adhesion.*

*X-ray diffraction (XRD) analysis revealed a decrease in peak intensity and broadening of the diffraction lines corresponding to WC and metallic phases, indicating a reduction in crystallinity, crystallite size refinement, and an increase in lattice defects. The obtained results made it possible to determine the optimal conditions of mechanical synthesis for producing homogeneous powder mixtures suitable for subsequent sintering.*

*Keywords: tungsten carbide, iron, nickel, mechanosynthesis, powder composites, morphology, structural characteristics.*

ҒТАМР 53.39.29

https://doi.org/10.48081/QJIF2662

***В. Ю. Лопатин[1], Ж. Д. Жолдубаева[2], Д. М. Арыстанова[3]***

[1,2,3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5664-249X

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3474-5549

*e-mail: d.arystanova97@mail.ru

# *ТЕМІР ТОТЫҒЫ ҚАБЫРШАҒЫНЫҢ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ ӘДІСТЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ: КЕПТІРГЕННЕН КЕЙІНГІ ЖӘНЕ ТОТЫҚТЫРЫЛҒАННАН КЕЙІНГІ*

*Бұл мақалада темірдің тотығу нәтижесінде пайда болатын тотығу темір қабыршағы (өнеркәсіптік окалина) екі түрлі әдіспен қалпына келтіру процесі қарастырылды.. Зерттеудің басты мақсаты – темір қабыршағының фазалық құрамының, құрылымдық ерекшеліктерінің және термодинамикалық сипаттамаларының темірдің қалпына келу деңгейіне әсерін бағалау. Кептірілген темір қабыршағының негізінен магнетит* ($Fe_3O_4$) *фазасынан тұрады, бұл фазаның құрылымы тығыз болғандықтан, қалпына келу процесі баяу жүреді және ішкі диффузиялық шектеулерге байланысты толық металдану қиындайды. Ал алдын ала тотықтырылған қабыршақта гематит* ($Fe_2O_3$) *фазасы басым, оның кеуекті құрылымы газдың еркін өтуіне жағдай жасап, қалпына келу жылдамдығын арттырады. Мақалада әр әдістің термодинамикалық реакциялары, аралық фазалар, температуралық тәуелділіктер және шлак түзілу мүмкіндіктері кеңінен талданды. Нәтижесінде, тотықтырылған қабыршақ қолдану арқылы жоғары сапалы темір ұнтағын алу мүмкіндігі жоғары екені дәлелденді. Сонымен қатар, бұл зерттеуде екі әдістің энергия тұтынуы, өңдеу уақыты, өндірістік тиімділігі және экологиялық қауіпсіздігі тұрғысынан салыстырмалы артықшылықтары мен шектеулері де талданды. Бұл әдіс экологиялық қауіпсіздігімен және технологиялық тиімділігімен ерекшеленеді әрі металлургиялық қалдықтарды қайта өңдеуде перспективалық бағыт ретінде ұсынылады.*

*Кілтті сөздер: темір қабыршағы, кептіру, тотықтандыру, тотықсыздандыру, гематит, магнетит, термодинамика.*

**Кіріспе**

Металлургиялық өндіріс барысында темірдің бетінде оксидтік қабат – темір қабыршақ пайда болады. Бұл техногендік қалдық құрамында темірдің әртүрлі оксидтері ($Fe_2O_3$, $Fe^3O_4$, FeO) болады. Қабыршақты қайта өңдеу арқылы құнды темір ұнтағын алуға болады. Қалдықты қайта өңдеудің маңызы металл тапшылығын төмендетіп, екінші реттік ресурстарды тиімді пайдалануға негізделеді. Қазіргі таңда металлургияда энергияны үнемдеу мен экологиялық қауіпсіз технологиялар

енгізу өзекті болып отыр. Бұл мақалада темір қабыршағын тотықсыздандырудың екі әдісі – кептірілгеннен кейін және тотықтандыру өңдеуден кейінгі қалпына келтіру процесі теориялық тұрғыда талданады.

**Материалдар мен әдістер**

Зерттеу нысаны – өндірістік процесте пайда болған темір қабыршағы. Оның құрамында әртүрлі темір оксидтері – гематит ($Fe_2O_3$), магнетит ($Fe_3O_4$), және вюстит (FeO) бар.

1-кесте – Темір тотығы қабыршағының химиялық құрамы (масс.%)

| Компонент | Кептірілген темір тотық қабыршағы | Тотықтырылған темір тотық қабыршағы |
|---|---|---|
| Fe | 65.3 | 69.1 |
| O | 24.7 | 26.5 |
| $SiO_2$ | 4.5 | 2.3 |
| $Al_2O_3$ | 2.1 | 1.4 |
| Mn | 0.8 | 0.7 |

Кептіру – темір қабыршағының алдын ала жоғары температурада ауада қыздырып, құрамындағы ылғал мен органикалық заттарды жою әдісі. Тотықтандыру өңдеу кезінде магнетит фазасы толық гематитке айналады. Бұл фазалар қалпына келу процесінде әртүрлі реакциялық сипатқа ие. Тотықсыздандыру процесі төмендегі реакциялар арқылы жүреді:

$$Fe_2O3 + H_2 \rightarrow Fe_3O_4 + H_2O$$
$$Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow FeO + H_2O$$
$$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$$

Әр реакция белгілі бір температурада басымырақ жүреді және қалпына келтірудің тиімділігі сол температураға байланысты өзгереді. Fe–O күй диаграммасына сәйкес, FeO фазасы тек жоғары температурада және оттек парциалдық қысымы төмен болғанда тұрақты. Гематит фазасы салыстырмалы түрде жоғары температура мен қысымда термодинамикалық тұрғыдан тұрақты болып табылады.

Салыстыру критерийлері Екі әдісті салыстыруда келесі параметрлер ескерілді:

Фазалық құрам (гематит, магнетит)

Құрылымдық сипат (кеуектілік, тығыздық)

Диффузиялық тосқауылдар

Қалпына келу дәрежесі

Энергия шығыны және уақыт

Экологиялық тиімділік

Өндірістік масштабта енгізу мүмкіндігі

Нәтиже және талқылаулар

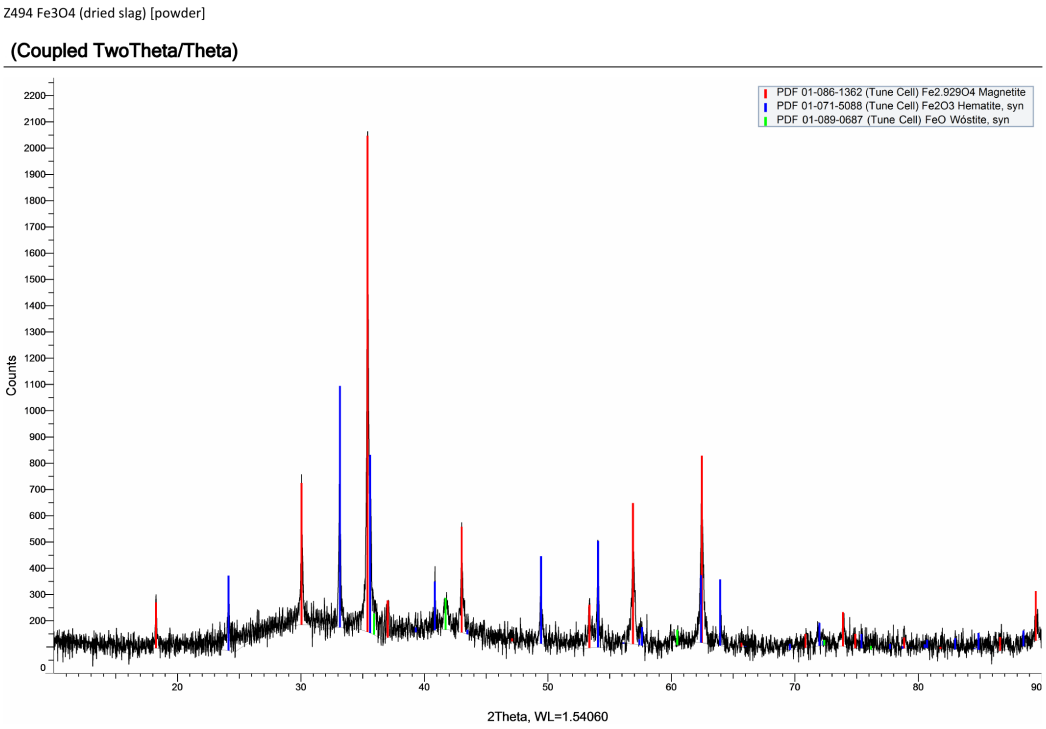
Тотықтандырылған темір қабыршағында негізгі фаза ретінде гематит ($Fe_2O_3$) кездеседі. Бұл оксид фазасы жоғары температурада ауада ұзақ қыздыру нәтижесінде магнетиттен ($Fe_3O_4$) толықтай гематитке айналады. Гематит фазасының қалпына келуі кезінде ерекше құрылымдық қайта ұйымдасу жүреді,

бұл процестің термодинамикалық және кинетикалық тұрғыдан тиімділігін арттырады.

Қалпына келу сатысында гематит аралық фазалар арқылы металдық темірге айналады:

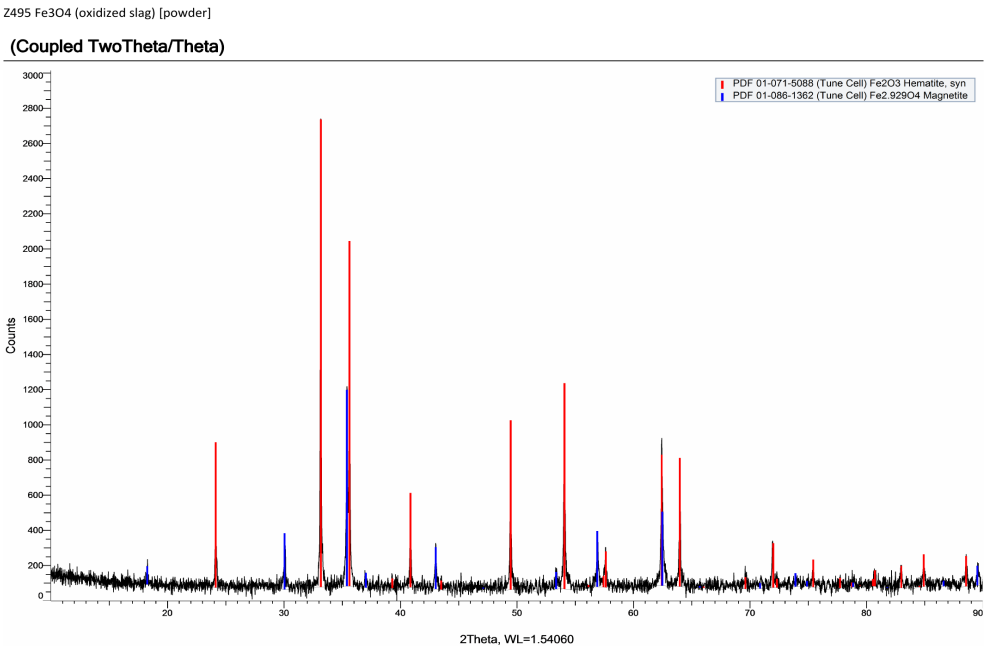
$$Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe.$$

Бұл тізбекті реакциялар әртүрлі температуралық аралықтарда жүреді.




1-сурет – Кептірілген тотығы қабыршағының XRD-дифрактограммасы ($Fe_3O_4$)

Қалпына келу процесінің термодинамикалық шектеулері Fe–O күй диаграммасы негізінде қарастырылды. Гематиттің ($Fe_2O_3$) қалпына келуі $Fe_3O_4$ және FeO аралық фазалары арқылы жүреді. Бұл кезеңдер температураға байланысты орын алады, яғни гематит → магнетит (300–400°C), магнетит → вюстит (500–600°C), вюстит → темір (700–1000°C) аралығында. Гематит фазасының бастапқы кеуектілігі қалпына келу процесінің тиімділігін арттырады.




2-сурет – Тотықтырылған тотығы қабыршағының
XRD-дифрактограммасы ($Fe_2O_3$)

Бұл процестердің әрқайсысы белгілі бір кинетикалық шектеулерге ұшыраса да, гематиттің бастапқы кеуекті құрылымы газ фазасының (сутек немесе көміртек тотығы) ішке терең енуіне мүмкіндік береді. Нәтижесінде, қалпына келу толық және біркелкі жүреді.

Гематиттің жоғары оттек құрамына ие болуы – бұл оның бір жағынан энергетикалық тұрғыдан тиімдірек қалпына келуін, екінші жағынан, ішкі құрылымының «босауын» қамтамасыз етеді. Бұл босау кезінде кристалдық тор кеңейіп, қалпына келтіргіш газдар үшін тиімді өтімділік жолдарын қалыптастырады. Мұндай құрылым процестің жалпы жылдамдығын арттырып, қалдық оксидтердің мөлшерін азайтады.

Бұған қоса, гематитті қалпына келтіру барысында шлак түзілу ықтималдығы азаяды. Кептірілгеннен кейінгі әдісте кездесетін FeO фазасы қышқылдық оксидтермен ($SiO_2$, $Al_2O_3$) әрекеттесіп, фаялит ($Fe_2SiO_4$) сияқты қалпына келмейтін шлак түзіп жатады. Ал гематит негізінде мұндай аралық FeO фазасының концентрациясы әлдеқайда төмен немесе өте қысқа уақыт ішінде өтіп кетеді. Бұл шлакообразование ықтималдығын азайтып, өнімнің тазалығын арттырады.

Қалпына келтіруші агент ретінде сутекті қолдану процестің экологиялық тұрғыдан таза болуын қамтамасыз етеді. Реакция нәтижесінде тек су буы түзіледі:

$$Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O.$$

Бұл әдіс CO немесе көміртек негізіндегі тотықсыздандыруға қарағанда парниктік газдар шығармайды. Дегенмен, технологиялық жабдықта сутекті қолдану арнайы қауіпсіздік шараларын және жоғары дәлдікпен температураны басқаруды талап етеді.

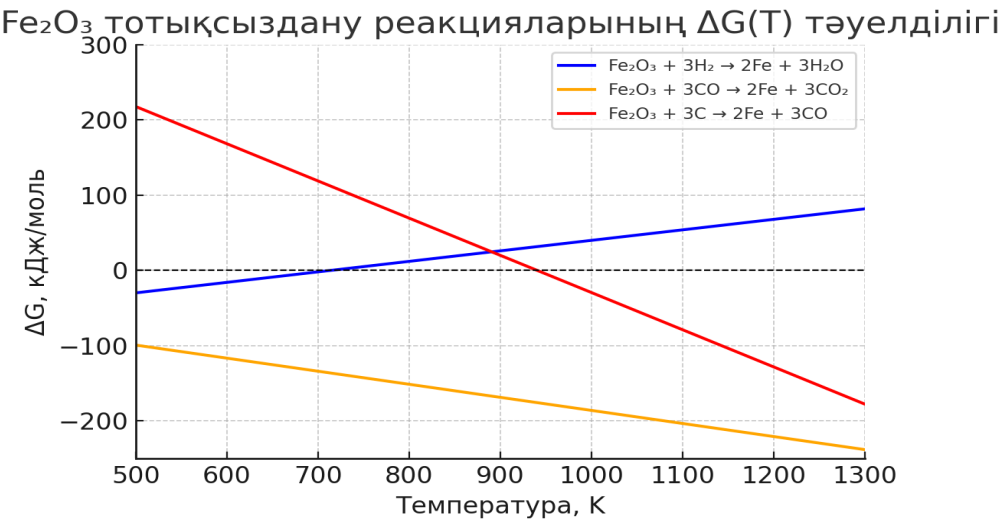
Гематитті көміртекпен қалпына келтіру кезінде:

$$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$$

немесе

$$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$$

реакциялары жүреді. Бұл әдіс арзан әрі қолжетімді болғанымен, қоршаған ортаға теріс әсері көбірек. Сондықтан, өнеркәсіптік масштабта балама ретінде сутек немесе табиғи газдың құрамындағы $H_2$/CO қоспалары жиі қолданылады.




3-сурет – Тотықсыздандыру реакцияларының стандартты ΔG мәндерінің температураға тәуелділігі

Термодинамикалық тұрғыдан темір оксидтерінің ($Fe_2O_3$) әртүрлі қалпына келтіруші агенттермен жүретін реакциялары айтарлықтай ерекшеленеді. Стандартты жағдайда (298 K) сутекпен қалпына келтіру реакциясының ΔG° мәні –57,7 кДж/моль, CO арқылы –64,9 кДж/моль, ал көміртекпен –20,3 кДж/моль деңгейінде болады. Бұл көрсеткіштер сутек пен CO-ның термодинамикалық тұрғыдан тиімділігін дәлелдейді. Қосымша есептеулер ΔG мәнінің температураға тәуелділігін (500–1300 K) көрсетіп, CO-мен қалпына келтірудің жоғары температурада ең тиімді екенін, сутектің төмен және орташа температурада артықшылығы барын, ал көміртекпен қалпына келтіру тек жоғары температурада мүмкін болатынын көрсетті

ΔG мәнінің температураға тәуелділігін есептеу үшін төмендегі формула қолданылды:

мұндағы:

ΔH° – реакция энтальпиясы,

ΔS° – реакция энтропиясы,

T – абсолют температура (К).

2-кесте – $Fe_2O_3$ оксидін қалпына келтіру реакциялары үшін стандартты термодинамикалық параметрлер

| Реакция | ΔH°, кДж/моль | ΔS°, Дж/моль·К | ΔG° (298 К), кДж/моль |
|---|---|---|---|
| $Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O(g)$ | –99.6 | –139.5 | –57.7 |
| $Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2(g)$ | –12.5 | +173.5 | –64.9 |
| $Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO(g)$ | +464.6 | +494.0 | –20.3 |

Қосымша есептеулер мен ΔG(T) графигі 500–1300 K диапазонында температураның әсерін көрсетті. CO арқылы қалпына келтіру жоғары температурада ең тиімді екені белгілі болды, ал сутек төмен және орташа температурада артықшылық танытады. Көміртек арқылы қалпына келтіру термодинамикалық тұрғыдан тек жоғары температурада (T > 900 K) өздігінен жүзеге аса алады.

Қазіргі таңда дооксидтелген темір қабыршағының қалпына келтіріп, одан алынған темір ұнтағын бірнеше салада қолдану қарқынды дамуда:

– Ұнтақты металлургия (қалыптау, изостатикалық престеу, қысыммен біріктіру)

–3D-баспа үшін металл негізді материалдар

– Электрқұралдарға арналған магнитті материалдар (ферриттер)

– Автоөнеркәсіпте дәнекерлеу сымдары мен шегендер жасау

– Химиялық катализаторлар ретінде қолдану

Осылайша, тотықтандыру өңдеу – тек ғылыми емес, өндірістік-экономикалық жағынан да тиімді бағыт болып саналады. Бұл әдістің артықшылығы – жоғары өнім сапасы, экологиялық қауіпсіздік және технологиялық бейімделгіштігі.

**Қорытынды**

Жүргізілген теориялық салыстыру негізінде темір қабыршағын дооксилік өңдеуден кейін қалпына келтіру әдісі анағұрлым тиімді екендігі дәлелденді. Гематит фазасының пористі құрылымы мен тотықтыру дәрежесінің жоғары болуы қалпына келудің толықтығын қамтамасыз етеді. Кептірілгеннен кейінгі әдіс өндірістік тұрғыда қарапайым болғанымен, өнім сапасы мен металлдану дәрежесі төмен болуы мүмкін. Сондықтан, тотықтырылған темір қабыршағын қолдану металлургия өндірісінде жоғары сапалы темір ұнтағын алу үшін тиімді шешім болып табылады.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Акулов, Н. Н., Новиков, И. И.** Металлургия железа. – М. : Металлургия, 1986. – 312 с.

2 **Либенсон, Г. А.** Восстановление оксидов железа водородом // Металлы. – 2007. – № 3. – С. 41–47.

3 **Лебедев, Л. В.** Основы теории металлургических процессов. – М. : Металлургия, 1970. – 416 с.

4 **Сорокин, А. М.** Металлургия чугуна. – М. : Металлургия, 1980. – 552 с.

5 **Ермолин, А. И., Смирнов, П. В., Кравцов, Н. М.** Процессы восстановления оксидов железа // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 11. – С. 32–35.

6 **Темирбеков, Р.** Металлургия негіздері. – Алматы: ҚазҰТУ, 1999. – 210 б.

7 **Юмашев, Б. М.** Теория металлургических процессов. – М. : Наука, 1982. – 304 с.

8 **Okamoto, H.** The Fe–O (Iron–Oxygen) system // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 1990. – Vol. 11. – № 4. – P. 403–412.

9 **Luidold, S., Antrekowitsch, H.** Hydrogen as a reducing agent : Thermodynamic possibilities // JOM. – 2007. – Vol. 59. – P. 58–62. – https://doi.org/10.1007/s11837-007-0133-1

10 **Wang, L., Liu, Y.** Hydrogen-based reduction of iron oxides : a review // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47. – Issue 35. – P. 15622–15639. – https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.196

REFERENCES

1 **Akulov, N. N., Novikov, I. I.** Metallurgiya zheleza [Metallurgy of Iron]. –Moscow : Metallurgiya, 1986. – 312 p.

2 **Libenson, G. A.** Vosstanovlenie oksidov zheleza vodorodom [Reduction of iron oxides with hydrogen] // Metally, 2007. – № 3. – 41–47 p.

3 **Lebedev, L. V.** Osnovy teorii metallurgicheskikh protsessov [Fundamentals of the Theory of Metallurgical Processes]. – Moscow : Metallurgiya 1970. – 416 p.

4 **Sorokin, A. M.** Metallurgiya chuguna [Pig Iron Metallurgy]. – Moscow : Metallurgiya, 1980. – 552 p.

5 **Ermolin, A. I., Smirnov, P.V., Kravtsov, N.M.** Protsessy vosstanovleniya oksidov zheleza [Processes of iron oxides reduction] // Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya, 2005. – № 11. – 32–35 p.

6 **Temirbekov, R.** Metallurgiya negizderi [Fundamentals of Metallurgy]. – Almaty: KazNTU, 1999. – 210 p.

7 **Yumashev, B. M.** Teoriya metallurgicheskikh protsessov [Theory of Metallurgical Processes]. – Moscow : Nauka, 1982. – 304 p.

8 **Okamoto, H.** The Fe–O (Iron–Oxygen) system // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 1990. – Vol. 11. – № 4. – P. 403–412.

9 **Luidold, S., Antrekowitsch, H.** Hydrogen as a reducing agent : Thermodynamic possibilities // JOM. – 2007. – Vol. 59. – P. 58–62. – https://doi.org/10.1007/s11837-007-0133-1

10 **Wang, L., Liu, Y.** Hydrogen-based reduction of iron oxides : a review // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47. – Issue 35. – P. 15622–15639. – https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.196

18.04.25 ж. баспаға түсті.
28.04.25 ж. түзетулерімен түсті.
20.06.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***В. Ю. Лопатин[1], Ж. Д. Жолдубаева[2], Д. М. Арыстанова[3]***
[1,2,3]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 18.04.25.
Поступило с исправлениями 28.04.25.
Принято в печать 20.06.25.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ОКАЛИНЫ: ПОСЛЕ ПРОКАЛИВАНИЯ И ПОСЛЕ ДООКИСЛЕНИЯ

*В данной статье представлен подробный теоретический сравнительный анализ двух различных методов восстановления железной окалины – после сушки и после предварительного окисления. Основная цель исследования заключается в оценке влияния фазового состава, структурных характеристик и термодинамических свойств на степень восстановления железа. Окалина после сушки преимущественно состоит из магнетита ($Fe_3O_4$), который обладает плотной структурой, препятствующей проникновению восстановительного газа вглубь частиц. Это приводит к замедленной кинетике реакции и ограниченной степени металлизации. В противоположность этому, предварительно окисленная окалина содержит гематит ($Fe_2O_3$), структура которого пористая, что облегчает доступ газа и способствует более полному и быстрому восстановлению. В работе детально рассмотрены основные стадии восстановления, температурные условия, промежуточные фазы и возможное образование шлаков. Результаты анализа показали, что восстановление гематитовой фазы обеспечивает получение железного порошка высокой чистоты. Метод окисления перед восстановлением может быть рекомендован как более эффективный и экологически безопасный способ утилизации металлургических отходов и получения качественного продукта.*

*Ключевые слова: железная окалина, прокалка, доокисление, восстановление, гематит, магнетит, термодинамика.*

***V. Yu. Lopatin[1], Zh. D. Zholdubaeva[2], D. M. Arystanova[3]***
[1,2,3]Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Received 18.04.25.
Received in revised form 28.04.25.
Accepted for publication 20.06.25.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF IRON SCALE REDUCTION METHODS: AFTER CALCINATION AND AFTER PRE-OXIDATION

*This article presents a comprehensive theoretical comparative analysis of two methods for reducing iron scale: after drying and after preliminary oxidation. The main goal of the study is to assess how the phase composition, structural characteristics, and thermodynamic properties influence the efficiency of iron recovery. Dried scale predominantly consists of magnetite ($Fe_3O_4$), which has a dense structure that impedes the penetration of reducing gases into the core of the particles. As a result, the reduction process is slower and less complete. In contrast, pre-oxidized scale mainly contains hematite ($Fe_2O_3$), which has a porous structure that facilitates gas diffusion and promotes faster and more complete reduction. The article provides detailed insights into the thermodynamic reactions, intermediate phases, temperature dependencies, and the risk of slag formation. The comparative analysis demonstrates that the reduction of hematite leads to high-purity iron powder. This oxidation – reduction method is shown to be both environmentally friendly and technologically effective, offering a promising approach for the recycling of metallurgical waste and the production of quality iron-based materials.*

*Keywords: iron scale, calcination, oxidation, reduction, hematite, magnetite, thermodynamics.*

SRSTI 67.09.00

https://doi.org/10.48081/THTE8411

***Zh. M. Omarov[1], A. N. Zhakanov[2], A. F. Yelmuratova[3],***
***O. K. Kaliyeva[4], D. Dashzeveg[5]***
[1,3,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[2]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1108-9509
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8747-3788
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7344-2258
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4408-9152
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1806-7615
*e-mail: zhumabek–omarov@mail.ru

## *USE OF WASTE FROM METALLURGICAL ENTERPRISES FOR THE PRODUCTION OF DRY CONSTRUCTION MIXTURES*

*The article presents the results of a study on the processing of silicon production waste with the development of a composite lime binder for dry building plaster mixtures intended for restoration and finishing works. The article examines the potential of using metallurgical wastes, primarily microsilica, as an active mineral additive for dry building mixtures on a lime-cement basis. Microsilica, being a by-product in the production of metallic silicon, has a high pozzolanic activity and is of interest as a component that contributes to increasing the strength, water-repellent and adhesive properties of plaster compositions. In order to obtain an effective composition for restoration and finishing work, laboratory studies were carried out, including the selection of compositions, the assessment of physical and mechanical characteristics and the analysis of environmental aspects. Metakaolin and carbonate mineral powder were used as additional modifiers, which made it possible to achieve a comprehensive improvement in the properties of materials. The results obtained showed that the inclusion of microsilica in the amount of 10 % of the binder weight provides a strength increase of up to 35 % compared to the control composition. In addition, a decrease in water absorption and an increase in the resistance of solutions to the external environment were revealed. The work confirms the technical, economic and environmental feasibility of reusing microsilica in the production of dry building mixtures, which contributes to reducing waste and increasing the sustainability of the construction industry.*

*Keywords: metallurgical waste, composite binder, dry building mixtures, modification of binders, microsilica, restoration work, hydrophobization, building additives, strength.*

**Introduction**

The Republic of Kazakhstan has adopted fundamental acts on environmental regulation, which determine the vector of development of metallurgical enterprises in the following areas: the need to develop a green economy; the need to develop closed production cycles with the development of a waste management system, which implies a constant circulation of materials during production and consumption, excluding the formation of waste accumulating in the environment [1].

Tau-Ken Temir LLP (Karaganda) is the only manufacturer of metallic silicon by the carbothermic process using ore-thermal furnaces.

In the production process, the company produces two types of products: metallic silicon with a purity of at least 98.5 % and ultrafine silicon dust in the gas cleaning process.

Quartzite from the deposits of the Ulytau region is used as a raw material for the production of metallic silicon of technical purity.

Silicon of technical purity is obtained by reducing the silicon oxide melt with coke at a temperature of about 1800 °C:

$$SiO_2 + C \geq SiO + CO \quad (1)$$

$$SiO + 2C \geq Si + 2CO \quad (2)$$

Technical-grade silicon is further used to produce poly-and monocrystalline silicon, and microsilica can be used in the production of building materials, in particular, modified lime binders.

Modern requirements for lime building compositions imply not only the high quality of the finishing layer, but also the ability to quickly perform work in a short time. In this regard, the task of improving the performance characteristics of lime binders by modifying them with various additives, including industrial waste and processing products, is of particular relevance. This approach allows not only to improve the properties of the material, but also contributes to the greening of construction production.

Currently, there are no domestic dry plaster mixtures based on lime binder on the market of Kazakhstan, which can provide durability and reliability during restoration and repair work. At the same time, a significant part of the needs is covered by imported products from Russia, Turkey, China, Italy and Germany, which causes high dependence on external supplies and increases costs.

One of the promising areas is the development of lime–based composite binders using available mineral modifiers, such as microsilica – a by–product of metallurgical production, carbonate mineral powder corresponding to ST RK 1276, as well as metakaolin – a product of heat treatment of clay rocks. In particular, microsilica sampled at the silicon storage site of Tau–Ken Temir LLP (Karaganda) has a high potential as an active mineral additive.

The purpose of this study is to obtain a composite binder for a dry plaster mixture on a lime basis, which provides strong adhesion to the treated surface and is suitable for use in restoration and finishing works. The main idea is to modify the lime base

with mineral and chemical additives that contribute to the growth of strength without reducing other performance characteristics.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

– Analysis of regulatory requirements for lime plaster mortars;

– study of the principles of modification of dry building mixtures;

– research of the material market in order to select available components;

– assessment of the quality of raw materials based on standardized methods;

– determination of the optimal granulometric composition of the aggregate;

– development of a formulation of a composite lime binder with increased adhesion and strength characteristics;

– production of prototypes and testing of their properties.

The proposed approach opens up prospects for creating a competitive, economically and technologically sound domestic product that can replace imported analogues and find wide application in the construction industry of Kazakhstan.

Microsilica formation technology and environmental aspects of its utilization. Microsilica is formed as a by-product of the production of metallic silicon and ferroalloys in electric arc furnaces. The technology is based on high-temperature reduction of silicon dioxide $SiO_2$ contained in quartz sand with carbon-containing materials such as charcoal, coke, etc., at temperatures above 1800 °C. The reaction produces silicon oxide (SiO), which condenses in the form of amorphous particles with a diameter of less than 1 μm when cooled abruptly, which is microsilica.

Technology of microsilica formation and environmental aspects of its use.

The production of metallic silicon is carried out in ore-thermal electric arc furnaces at a temperature of 1800–2000 °C. The main chemical process is the reduction of silicon dioxide ($SiO_2$) contained in quartz raw materials using reducing agents (carbon-containing materials such as charcoal, coke, anthracite).

At high temperatures, vaporous compounds of silicon oxide (SiO) are formed, which, when cooled abruptly, condense in the form of amorphous particles – this is microsilica. It is captured by dust collectors and accumulates as waste.

In systems based on silica, lime and additives (including in the production of building mixtures), silicate and aluminosilicate slags are formed, which play the role of an active matrix. The main reactions when mixing lime, microsilica and cement occur with the release of heat and the formation of hydrate neoplasms:

$SiO_2+2C \rightarrow Si+2CO\uparrow$

$Ca(OH)_2+SiO_2 \rightarrow$ C–S–H (Calcium Hydrosilicate)

$Al2O3+Ca(OH)_2+SiO_2 \rightarrow$ C–A–S–H (Calcium Aluminosilicate)

Energy efficiency:

The formation of C–S–H is accompanied by a decrease in free energy ($\Delta G < 0$), which indicates spontaneous reactions and high thermodynamic stability of the system. The use of microsilica reduces overall heat generation and increases the durability of the structure.

Microsilica has unique physical and chemical properties: a high specific surface area, a content of up to 98 % of amorphous $SiO_2$ and a pronounced pozzolanic activity.

Its use in building materials can significantly increase the strength, density, water and frost resistance of products, as well as reduce the consumption of cement.

Turning waste into a valuable mineral component allows you to reduce the cost of producing building mixtures.

This contributes to the development of the local raw materials market and reduces dependence on imports of specialized additives.

Recycling of microsilica not only solves acute environmental problems, but also opens up wide opportunities for the creation of effective and competitive building materials. The use of this waste in binders and fillers is in line with the concept of sustainability and resource conservation in the construction industry.

The utilization of microsilica as an active mineral additive in building materials allows not only to reduce the man-made load on the environment, but also to increase the performance characteristics of finished products. The inclusion of microsilica in the composition of dry mixtures helps to increase the strength, density, frost resistance and corrosion resistance of materials, while reducing the consumption of cement.

Thus, the processing of microsilica from silicon production waste is an important area of resource conservation and environmentally sustainable development of the construction industry.According to Gutiérrez et al. (2021), the addition of microsilica can reduce the water-cement ratio, increase the density and frost resistance of concretes, while reducing the cement content. Similar results were obtained by Ventolà et al. (2011), where it was noted that microsilica increases the resistance of plaster coatings to moisture and salts [1].

**Literature review**

One of the promising areas for the development of construction technologies is the use of industrial waste, in particular by-products of metallurgical production, in the composition of building mixtures. In this area, special attention is paid to microsilica, an amorphous silica formed as a result of the reduction of quartz in the production of ferroalloys and metallic silicon.

Studies by domestic and foreign scientists confirm the high efficiency of microsilica as an active mineral additive. It has a high specific surface area, pronounced pozzolanic activity, and contributes to the formation of strong hydrate compounds such as C–S–H and C–A–S–H, providing an increase in the strength of cement and lime composites (Kumar & Siddique, 2019; Poon & Lam, 2008) [2; 3].

In addition to microsilica, the use of other products of clay rock processing, such as metakaolin, is also being actively investigated. According to researchers (Ziegenbalg, 2016; Groot et al., 2018), the complex use of mineral additives increases the chemical and mechanical resistance of mortars, especially in aggressive urban environments [4; 5].

Despite its positive technical properties, it is important to consider its dispersion and potential inhalation hazard when using microsilica, which requires dust suppression measures and safe packaging (Siddique & Klaus, 2009) [6].

A significant number of works of both domestic and foreign scientists are devoted to the study of dry building mixtures (SCS) on lime and composite binders. A significant place in the structure of research is occupied by the works of E.L. Bolshakov, who stood

at the origins of the standardization of CCS in the post–Soviet space [7]. In his works, the regulatory framework for the study of DCM as dispersed systems with a core size of less than 1 mm was substantiated for the first time.

A special place of CCC in the structure of the construction industry is also emphasized in the works of Y.V. Gontar and A.I. Chalova [8], who studied the adhesive properties of DCM on a calcareous–silica bond. In particular, the addition of 5 % microsilica and 30 % Portland cement to the lime base significantly increases the adhesion and frost resistance of plaster castings.

B. S. Batalin [9] and G. F. Balmasov [10] identified the most effective modifying additives for cement, gypsum, lime and complex DCM. It was found that the use of such additives can reduce material consumption by 15 % and increase labor productivity by 2.5–4 times.

Foreign studies also confirm the high efficiency of modified DCMs. Thus, according to the work of Naldini et al. [11], the use of zeolite–containing rocks as a modifier improves the durability of plaster compositions due to ion exchange and increased resistance to salts and moisture. Since the late 1990s, synthesized calcium hydrosilicates (HSCs) have been actively used.

Particularly significant results were obtained by the scientific school of V.I. Loganina, where additives based on HSCs were developed, which improve the physical and mechanical properties of plaster mortars by 15–20 %, and in some cases more than twice [12]. For example, the frost resistance of modified mixtures reaches 75 cycles compared to 25–35 cycles for unmodified mixtures [13].

Similar trends are noted abroad. For example, Groot et al. (Netherlands) emphasize the importance of developing lime plasters that are compatible with historical buildings and have high vapour permeability and ductility. Also in studies by Ziegenbalg et al. lime DCM is considered as the preferred material for façade restoration due to their low shrinkage and self–healing ability of small cracks.

Of interest is the work of Faria et al. (Portugal), where the effect of metakaolin additives on the adhesion and water resistance of lime mortars for restoration is investigated. They show that such additives significantly improve the durability of coatings while maintaining vapor permeability.

In Kazakhstan, the active development of the CCC market began after the introduction of the standard ST RK EN 998–1–2011, corresponding to the European EN 998–1:2008. Thanks to cooperation with international companies, such as Knauf Gypsum Kapchagai, the industrial production of high–quality CCS has begun in the republic [14].

One of the most common materials for restoration is lime – air and hydraulic. Lime plasters provide vapor permeability, high crack resistance and compatibility with porous substrates, which is especially important when working with historical buildings

In the works of N.N. Shangina and A.M. Kharitonov it was shown that the crack resistance of lime mortars is 4–4.5 times higher than that of cement–sand analogues. Similar data are provided by Ashurst, J., & Dimes, F. G. (Great Britain), who argue that

the flexibility and low modulus of elasticity of lime mortars makes them indispensable in restoration [15].

Comparative tests carried out by V. I. Loganina [16] showed a later cracking in limestone plasters compared to cement plasters, which is associated with less contracting of limestone in the initial hours of hardening.

Thus, modern research, both domestic and foreign, confirms that modified lime CCS are the optimal solution for restoration work, providing a combination of compatibility with historical materials, environmental safety and high performance.

**Materials and methods**

All experimental studies were carried out in the laboratory of Toraigyrov University using standard equipment for testing building materials. As part of the experimental part of the work, the compositions of dry building mixtures (SCS) were developed, the proportions of the components were varied and various research methods were used. Drinking water from the household and drinking system that meets the requirements of GOST 23732 was used as water for mixing solutions [17].

Lime and Portland cement were used to obtain a binding component in this work. Lime (slaked, fluff) was taken from the Keregetas deposit, developed by Maikayin Lime Plant LLP. It has a high activity of 86 %, which corresponds to grade I according to GOST 9179. The true density of lime is 2.2 g/cm³ and its bulk density is in the range of 260 to 290 kg/m³. The specific surface area is about 13,500 cm²/g [18].

Portland cement of the PC500D0 grade manufactured by Bukhtarma Cement Company LLP was used as a modifier of the lime binder. Cement has a true density of 3.07 g/cm³, a bulk density of 1120 kg/m³, and its compressive strength after 28 days reaches 49.5 MPa.

The study used three types of natural sands that are widespread in the Pavlodar region and are potentially suitable for use as part of DCM.

The first is the sand of the Michurinskoye deposit, consisting mainly of quartz with insignificant inclusions of glauconite and clay minerals. Its chemical composition is represented mainly by crystalline silica (up to 98 %). The bulk density is between 1310 and 1370 kg/m³, the particle size modulus is 1.35 and the true density is 2.65 g/cm³.

The second is fine sand from the Kalkamanskoye deposit, containing up to 94 % quartz with impurities of ferrites and feldspar. Its bulk density varies from 1450 to 1490 kg/m³, the modulus of size is 1.1, and the true density is 2.67 g/cm³.

The third sand, marked as «River Port», is mined in the Aksus district. It contains quartz with impurities of dusty and clay particles (up to 12%). The grain modulus is 1.45, the bulk density is 1450 kg/m³, the true density is 2.65 g/cm³.

For all sands, the bulk densities of individual fractions were determined: 1.25–0.63 mm, 0.63–0.315 mm, and 0.315–0.16 mm, since such fractions are used in the industrial production of dry mixes. It has been established that as the fraction decreases, the density decreases.

Among the chemical additives, two dry superplasticizers were used: C–3 (Russian–made) and MUHU PC–P. Both substances are completely soluble in water and have a neutral pH (7.0–9.0). The density of C–3 dry powder is 550±30 kg/m³, and MUHU PC–P

is 600±30 kg/m³. The concentration of the active substance in C–3 is 90%, in MUHU PC–P – 98 %. Additives provide a water–reducing effect at the level of 20–25 % and 35–40 %, respectively. The plasticizing effect is achieved up to mobility classes Pk3 (C–3) and Pk4 (MUHU PC–P), while the preservation of the mobility of the solution in C–3 is 60 minutes, in MUHU PC–P – 110 minutes. The recommended dosage of C–3 is 0.3–0.5 %, and MUHU PC–P is 0.15–0.3 % of the weight of the binder.

A hydrophobic additive based on zinc stearate ($C_{36}H_{70}O_4Zn$) was also administered in dry form. This component is a white powder containing 12–14 % zinc oxide (ZnO), with a moisture content of no more than 0.5%, a residue of 200 microns on a sieve of 0.2 %, and a bulk density of 250±30 kg/m³.

The following mineral modifiers were used:

– microsilica selected at the enterprise of Tau–Ken Temir LLP (Karaganda) in the form of finely dispersed gray powder with a bulk density of 600 kg/m³ and a true density of 2.25 g/cm³;

– mineral powder from carbonate rocks in accordance with ST RK 1276 [19];

– metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) is the result of heat treatment of clayey rocks, represented by beige powder.

Microsilica was introduced into the mixture together with a binder to reduce dust formation.

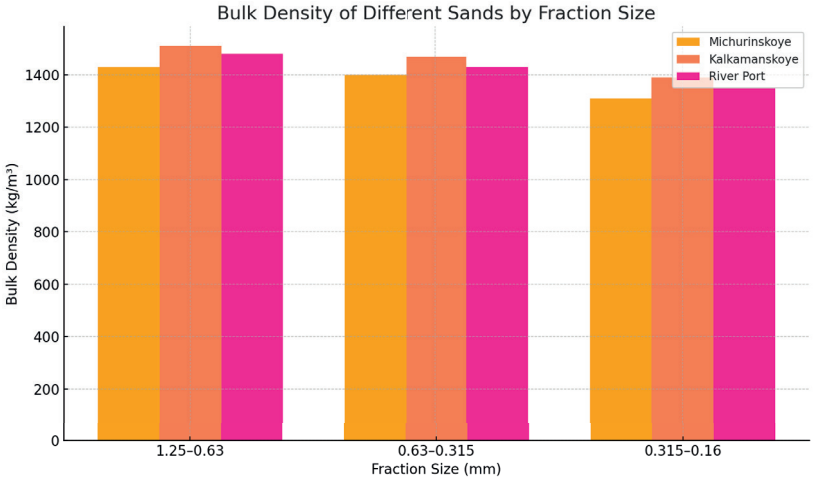



Figure 1 – The graph shows the bulk density of each type of sand by fraction, showing how the density decreases as the grain size decreases

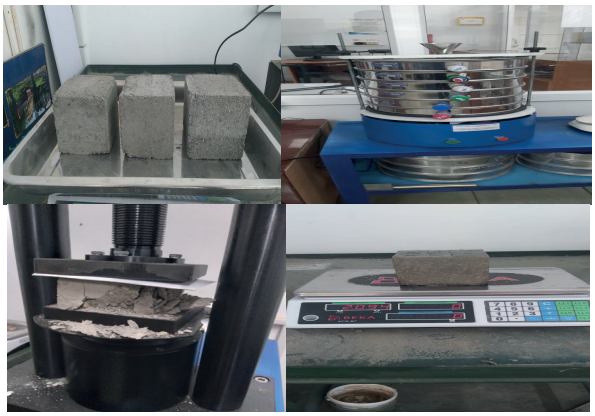


Figure 2 – Compression for strength of MPa

**Results and discussion**

To evaluate the effect of microsilica and other additives on strength characteristics, compression and flexure tests were performed at the age of 1, 7 and 28 days.

Table 1 – Compressive and flexural strength of composite mortars

| № | Composition of additives (from the weight of the binder) | Compressive strength, MPa | Flexural strength, MPa |
|---|---|---|---|
| 1 | No additives (control) | 3,5 | 1,2 |
| 2 | Microsilica 10% | 4,6 | 1,6 |
| 3 | Microsilica 10% + MC 5% | 5,1 | 1,8 |
| 4 | Microsilica 10% + Stearate Zn 2% | 5,3 | 1,7 |
| 5 | Microsilica 10% + PC-P 0.3% | 5,4 | 1,9 |

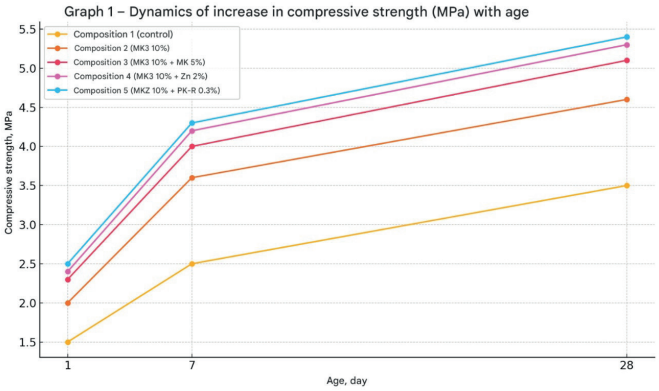



Figure 3 – Dynamics of compressive strength increase (MPa)

To assess the effect of mineral and chemical additives on the structure formation of plaster mortars, a set of experimental methods was used.

Binder composition: lime–cement base in the ratio of lime: Portland cement = 85:15 by weight.

Kalkamanskoye, Michurinskoye deposits and sand from the River Port area. The water–cement ratio was selected individually according to the mobility criterion Pc = 10.

Mineral additives (microsilica, metakaolin, mineral powder) were introduced during homogenization in a ball mill.

Compressive and bending strength was determined in accordance with GOST 5802–86 at the age of 1 and 28 days.Samples of standard sizes were used, aged under conditions of normal hardening (temperature 20 ± 2 °C, humidity 95 ± 5 %) [20].

Determination of plastic strength: A conical Volarovic–Rehbinder plastomer was used to monitor the kinetics of structure formation in the early stages. Plastograms were recorded every 30 minutes for 4 hours after kneading.

Zinc stearate was used as a hydrophobic additive in the amount of 1–3 % by weight. Water absorption was determined by weight after saturation of samples in water for 48 hours.

The preservation of mobility and the time of the beginning of setting were studied, taking into account the type of superplasticizer.

**Recommendation**

For restoration and repair work in conditions of natural hardening, it is recommended to use lime-cement compositions with the addition of 10 % microsilica and 2 % zinc stearate, which provide high strength, water repellency and resistance to environmental influences.

For restoration work requiring rapid hardening and high early strength, it is recommended to use compositions with microsilica (20%) and C–3.

In conditions where it is important to maintain the mobility of the mixture for 2–3 hours, it is advisable to use PC–R as a plasticizer.

To obtain waterproof solutions, it is enough to use zinc stearate in the amount of 1 % of the weight of the binder.

It is most rational to use Kalkaman sand as an aggregate in the production of high–strength and durable plaster mortars using waste from metallurgical enterprises.

**Conclusion**

The results of the study confirm the possibility of effective use of microsilica – a waste product of metallurgical production – in the composition of dry building mixtures. Its use can significantly improve the physical and mechanical properties of plaster mortars, increase the durability and environmental sustainability of building materials. The introduction of such technologies helps to reduce industrial waste and expands the raw material base of domestic production.

The introduction of microsilica, metakaolin and mineral powder into the composition of lime–cement binder helps to increase the strength characteristics of plaster mortars.

The most pronounced effect is noted when the content of additives in the amount of 10–15 % of the weight. The increase in compressive strength after 28 days reaches 30–35 % compared to the control composition without additives.

The use of active mineral additives contributes to more intensive structure formation in the early stages (1–4 hours), which is confirmed by an increase in plastic strength. The most intensive thickening of the structure was observed with the use of highly reactive metakaolin.

The addition of zinc stearate in the amount of 2–3 % effectively reduces water absorption by 40–50 % and helps to improve the water–repellent properties of the plaster layer. Increased hydrophobicity persists even with prolonged water saturation, which indicates the stability of the formed hydrophobic film.

S–3 showed a moderate water–reducing effect, but at increased dosages it had a retarding effect on structure formation.

The maximum strength and water–repellent indicators were achieved with complex modification: microsilica 10 %, zinc stearate 2 %, superplasticizer PC–R 0.5 %.

Thus, the effectiveness of the use of mineral and chemical additives to regulate the structure formation and improve the performance characteristics of lime–cement plaster mortars is substantiated.

## REFERENCES

1 **Gutiérrez, M., Castañeda, D., Hernández, J.** Sustainable cement composites with high-performance silica fume : Mechanical and environmental evaluation [Sustainable cement composites with high-performance silica fume: Mechanical and environmental evaluation] // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 289. – Article ID 125786.

2 **Kumar, R., Siddique, R.** Strength and durability properties of concrete using silica fume and waste foundry sand [Strength and durability properties of concrete using silica fume and waste foundry sand] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 203. – P. 522–531.

3 **Poon, C. S., Lam, L.** Effect of silica fume on pore structure and mechanical properties of concrete [Effect of silica fume on pore structure and mechanical properties of concrete] // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – № 4. – P. 409–417.

4 **Groot, C., Van Hees, R., Wijffels, T.** Restoration mortars compatible with historic masonry: Lime-based systems with enhanced performance [Restoration mortars compatible with historic masonry : Lime-based systems with enhanced performance] // Journal of Architectural Conservation. – 2018. – Vol. 24. – № 3. – P. 197–213.

5 **Ziegenbalg, G.** Functional additives in dry-mix mortars : Modern solutions for old problems [Functional additives in dry-mix mortars : Modern solutions for old problems] // Drymix Mortar Yearbook. – 2016. – P. 24–33.

6 **Siddique, R., Klaus, J.** Influence of silica fume on mechanical properties of concrete [Influence of silica fume on mechanical properties of concrete] // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – № 3. – P. 218–226.

7 **Bolshakov, E. L., Tyurina, T. E.** Sistematizatsiya sukhikh stroitel'nykh smesey (K proektu Gosudarstvennogo standarta «Smesi sukhie stroitel'nye. Klassifikatsiya») [Systematization of dry building mixes (To the project of State Standard «Dry building mixes. Classification»)] // Proceedings of the 3rd Int. Sci – Tech. Conf. «Modern Technologies of Dry Mixes in Construction 'MixBUILD» – St. Petersburg, 2001 – P. 7–13.

8 **Gontar', Yu. V., Chalova, A. I.** Modifitsirovannye sukhie smesi dlya otdelochnykh rabot [Modified dry mixes for finishing works] // Construction Materials – Moscow, 2001 – № 4. – P. 8–10.

9 **Batalin, B. S.** Issledovaniya effektivnosti dobavok, primenyaemykh dlya proizvodstva sukhikh stroitel'nykh smesey [Research on the effectiveness of additives used for the production of dry building mixes] // Advances of Modern Natural Science – 2007. – № 7. – P. 60–62.

10 **Balmasov, G. F., Strelenya, L. S., Khasanov, A. M., Kolosov, V. V.** Reologicheskie svoystva stroitel'nykh rastvorov [Rheological properties of construction mortars] // Construction Materials – 2008. – № 1. – P. 50–52.

11 **Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P., Merino, L.** Traditional organic additives improve lime mortars : New old materials for restoration and building natural stone fabrics // Construction and Building Materials – 2011 – Vol. 25. – Issue 8. – P. 3313–3318.

12 **Loganina, V. I., Zhegera, K. V.** Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya sintezirovannykh alyumosilikatov v tsementnykh sistemakh [Evaluation of the effectiveness of synthesized aluminosilicates in cement systems] // Academic Bulletin of UralNIIPRoekt RAASN. – 2014. – № 3. – P. 15–18.

13 **Loganina, V. I., Ariskin, M. V., Akzhigitova, E. R., Petukhova, N. A.** Otsenka treshchinostoykosti otdelochnogo shtukaturnogo sloya na osnove sukhoy stroitel'noy smesi [Assessment of cracking resistance of finishing plaster layer based on dry building mix] // University News. Construction. – 2013. – №. 1. – P. 45–48.

14 **Malibekov, D. Zh.** Analiticheskiy analiz otsenki kachestva proizvodstva sukhikh stroitel'nykh smesey [Analytical evaluation of the quality of dry mix production] // Scientific Community of Students of the 21st Century. Technical Sciences : Electronic collection of papers of the XLIX Student Int. Sci – Pract. Conf – Novosibirsk : Publishing house ANS «SibAC», 2017. – № 1 (48). – [Electronic resource] – Access : URL: http://www.sibac.info/archive/Technic/1(48).pdf (Accessed : 22.03.2020).

15 **Shangina, N. N., Kharitonov, A. M.** Osobennosti proizvodstva i primeneniya sukhikh stroitel'nykh smesey dlya restavratsii pamyatnikov arkhitektury [Features of production and application of dry mixes for restoration of architectural monuments] // Dry Building Mixes. – 2011. – № 4. – P. 16–19.

16 **Loganina, V. I., Pyshkina, I. S.** Vliyanie rezhima sinteza napolnitelya na strukturu i svoystva izvestkovykh sukhikh stroitel'nykh smesey [Effect of filler synthesis regime on the structure and properties of lime – based dry mixes] // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – № 36 (55). – P. 64–67.

17 GOST 23732–2011. Voda dlya betona. Tekhnicheskie trebovaniya [Water for concrete. Technical requirements]. – Moscow : Standartinform, 2012. – 7 p.

18 GOST 9179–2018. Portlandtsement i shlakovyj portlandtsement. Tekhnicheskie usloviya [Portland cement and slag Portland cement. Specifications]. – Moscow : Standartinform, 2019. – 13 p.

19 ST RK 1276–2004. Beton. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam [Concrete. Methods for determination of strength using control specimens]. – Astana : Gosstandart RK, 2005. – 12 p.

20 GOST 5802–86. Voda dlya betona i rastvorov. Tekhnicheskie usloviya [Water for concrete and mortar. Specifications]. – Moscow : Izdatel'stvo standartov, 1986. – 7 p.

REFERENCES

1 **Gutiérrez, M., Castañeda, D., Hernández, J.** Sustainable cement composites with high-performance silica fume : Mechanical and environmental evaluation [Sustainable cement composites with high-performance silica fume: Mechanical and environmental evaluation] // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 289. – Article ID 125786.

2 **Kumar, R., Siddique, R.** Strength and durability properties of concrete using silica fume and waste foundry sand [Strength and durability properties of concrete using silica fume and waste foundry sand] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 203. – P. 522–531.

3 **Poon, C. S., Lam, L.** Effect of silica fume on pore structure and mechanical properties of concrete [Effect of silica fume on pore structure and mechanical properties of concrete] // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – № 4. – P. 409–417.

4 **Groot, C., Van Hees, R., Wijffels, T.** Restoration mortars compatible with historic masonry: Lime-based systems with enhanced performance [Restoration mortars compatible with historic masonry : Lime-based systems with enhanced performance] // Journal of Architectural Conservation. – 2018. – Vol. 24. – № 3. – P. 197–213.

5 **Ziegenbalg, G.** Functional additives in dry-mix mortars: Modern solutions for old problems [Functional additives in dry-mix mortars: Modern solutions for old problems] // Drymix Mortar Yearbook. – 2016. – P. 24–33.

6 **Siddique, R., Klaus, J.** Influence of silica fume on mechanical properties of concrete [Influence of silica fume on mechanical properties of concrete] // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – № 3. – P. 218–226.

7 **Большаков, Э. Л., Тюрина, Т. Е.** Систематизация сухих строительных смесей (К проекту Государственного стандарта «Смеси сухие строительные. Классификация») // Сб. докл. 3 – й Межд. Науч – техн. конф. «Современные технологии сухих смесей в строительстве MixBUILD» : СПб., 2001 – С. 7–13.

8 **Гонтарь, Ю. В., Чалова, А. И.** Модифицированные сухие смеси для отделочных работ // Строительные материалы – М. : 2001. – № 4. – С. 8–10.

9 **Баталин, Б. С.** Исследования эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей // Успехи современного естествознания – 2007. – № 7. – С. 60–62.

10 **Балмасов, Г. Ф., Стреленя, Л. С. Хасанов, А. М., Колосов В. В.** Реологические свойства строительных растворов // Строительные материалы – 2008. – № 1. – С. 50–52.

11 **Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P., Merino, L.** Traditional organic additives improve lime mortars : New old materials for restoration and building natural stone fabrics // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – Issue 8. – P. 3313–3318.

12 **Логанина, В. И., Жегера, К. В.** Оценка эффективности использования синтезированных алюмосиликатов в цементных системах // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 3 – С. 15–18.

13 **Логанина, В. И., Арискин, М. В., Акжигитова, Э. Р., Петухова, Н. А.** Оценка трещиностойкости отделочного штукатурного слоя на основе сухой строительной смеси // Известия вузов. Строительство. – 2013. – № 1. – С. 45–48.

14 **Малибеков, Д. Ж.** Аналитический анализ оценки качества производства сухих строительных смесей // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : электрон. сб. ст. по материалам XLIX студенческой междунар. Науч – практ. конф – Новосибирск : Изд. АНС «СибАК», 2017. – № 1 (48) – [Электронный ресурс] – Режим доступа : URL: http:// www.sibac.info/archive/Technic/1(48).pdf (дата обращения : 22.03.2020)

15 **Шангина, Н. Н., Харитонов, А. М.** Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры // Сухие строительные смеси. – 2011. – № 4 – С. 16–19.

16 **Логанина, В. И., Пышкина, И. С.** Влияние режима синтеза наполнителя на структуру и свойства известковых сухих строительных смесей // Вестник Волгоградского государственного архитектурно–строительного университета – 2014 – № 36 (55) – С. 64–67.

17 ГОСТ 23732–2011. Вода для бетона. Технические требования. – М. : Стандартинформ, 2012. – 7 с.

18 ГОСТ 9179–2018. Портландцемент и шлаковый портландцемент. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2019. – 13 с.

19 СТ РК 1276–2004. Бетон. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Астана : Госстандарт РК, 2005. – 12 с.

20 ГОСТ 5802–86. Вода для бетона и растворов. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 7 с.

Received 16.07.25.
Received in revised form 16.07.25.
Accepted for publication 25.07.25.

***Ж. М. Омаров[1], А. Н. Жаканов[2], А. Ф. Ельмуратова[3],***
***О. К. Калиева[4], Д. Дашзэвэг[5]***
[1,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
16.07.25 ж. баспаға түсті.
16.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
25.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

# МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ КӘСІПОРЫНДАРДЫҢ ҚАЛДЫҚТАРЫН ҚҰРҒАҚ ҚҰРЫЛЫС ҚОСЫЛЫМДАРЫН ӨНДІРУ ҮШІН ПАЙДАЛАНУ

*Мақалада қалпына келтіру және өңдеу жұмыстарына арналған құрғақ құрылыс гипс қоспаларына арналған композиттік әк байланыстырғышты әзірлей отырып, кремний өндірісінің қалдықтарын өңдеу бойынша зерттеу нәтижелері ұсынылған. Мақалада металлургиялық қалдықтарды, бірінші кезекте микросиликаны әк-цемент негізінде құрғақ құрылыс қоспалары үшін белсенді минералды қоспа ретінде пайдалану әлеуеті зерттелді. Микросилика металл кремний өндірісінде қосымша өнім бола отырып, жоғары поццоландық белсенділікке ие және гипс құрамының беріктігін, суға репеллентті және желімдік қасиеттерін арттыруға ықпал ететін компонент ретінде қызығушылық тудырады. Қалпына келтіру және әрлеу жұмыстарына тиімді құрам алу мақсатында зертханалық зерттеулер жүргізілді, оның ішінде композицияларды іріктеу, физикалық-механикалық сипаттамаларды бағалау және экологиялық аспектілерді талдау. Қосымша модификаторлар ретінде метакаолин мен карбонатты минералды ұнтақ қолданылды, бұл материалдардың қасиеттерін кешенді жақсартуға қол жеткізуге мүмкіндік жасады. Алынған нәтижелер микросиликаның байланыстырушы салмақтың 10% көлемінде қосылуы бақылау құрамымен салыстырғанда беріктіктің 35%-ға дейін өсуін қамтамасыз ететінін көрсетті. Бұдан басқа, су сіңіруінің азаюы және ерітінділердің сыртқы ортаға төзімділігінің артуы анықталды. Жұмыс құрғақ құрылыс қоспаларын өндіру кезінде микросиликаны қайта пайдаланудың техникалық, экономикалық және экологиялық орындылығын растайды, бұл қалдықтарды азайтуға және құрылыс саласының тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді.*

*Кілтті сөздер: металлургиялық қалдықтар, композиттік байланыстырғыш, құрғақ құрылыс қоспалары, байланыстырғыштарды модификациялау, микросилика, қалпына келтіру жұмыстары, гидрофобизация, құрылыс қоспалары, беріктік.*

***Ж. М. Омаров[1], А. Н. Жаканов[2], А. Ф. Ельмуратова[3],***
***О. К. Калиева[4], Д. Дашзэвэг[5]***
[1,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2]Евразийский Национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 16.07.25.
Поступило с исправлениями 16.07.25.
Принято в печать 25.07.25.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

*В статье представлены результаты исследования по переработке отходов кремниевого производства с разработкой композиционного известкового вяжущего для сухих строительных штукатурных смесей, предназначенных для реставрационных и отделочных работ. В статье исследуется потенциал использования отходов металлургических производств, прежде всего микрокремнезема, в качестве активной минеральной добавки для сухих строительных смесей на известково-цементной основе. Микрокремнезем, являясь побочным продуктом при производстве металлического кремния, обладает высокой пуццолановой активностью и представляет интерес как компонент, способствующий повышению прочности, водоотталкивающих и адгезионных свойств штукатурных составов. С целью получения эффективной композиции для реставрационных и отделочных работ были проведены лабораторные исследования, включающие подбор составов, оценку физико-механических характеристик и анализ экологических аспектов. В качестве дополнительных модификаторов применялись метакаолин и карбонатный минеральный порошок, что позволило достичь комплексного улучшения свойств материалов. Полученные результаты показали, что включение микрокремнезема в количестве 10 % от массы вяжущего обеспечивает прирост прочности до 35 % по сравнению с контрольным составом. Кроме того, выявлено снижение водопоглощения и повышение стойкости растворов к воздействию внешней среды. Работа подтверждает техническую, экономическую и экологическую целесообразность вторичного использования микрокремнезема в производстве сухих строительных смесей, что способствует снижению объема отходов и повышению устойчивости строительной отрасли.*

*Ключевые слова: металлургические отходы, композиционное вяжущее, сухие строительные смеси, модификация вяжущих, микрокремнезем, реставрационные работы, гидрофобизация, строительные добавки, прочность.*

МРНТИ 53.31.21

https://doi.org/10.48081/MLNA9335

***О. Р. Сариев[1], М. С. Алмагамбетов[2], Н. З. Нургали[3], Б. С. Келаманов[4], *А. М. Әбдірашит[5]***

[1,4,5]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республика Казахстан, г. Актобе

[2,3]Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG, Республика Казахстан, г. Астана

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0745-848X

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5501-1385

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0477-7867

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7646-9153

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0718-3041

*e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com

# *ОТРАБОТКА СПОСОБОВ БРИКЕТИРОВАНИЯ ПЫЛИ ОТ ДРОБЛЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА*

*В статье представлен обзор технологий и способов переработки дисперсных металлических отходов, образующейся при производстве ферросплавов, в т. ч. высокоуглеродистого феррохрома (ВУФХ). Отмечено, что наиболее дешевый и рациональный способ повторного использования металлических пылей – брикетирование. С учетом развития технологий брикетирования, а также задействованного в этом процессе новейших образцов оборудования и связующих материалов можно полноценно вовлекать аспирационную пыль от дробления феррохрома в металлургический передел. Для проверки этого предположения проведены лабораторные исследования с использованием связующих на полимерной основе и жидкого стекла в качестве базового варианта. Описана методика брикетирования на лабораторных и промышленных прессах, с оценкой механических свойств брикетов. Исследования показывают, что ввод в состав металлической пыли инертного наполнителя (пыли газоочисток) улучшает брикетируемость смеси за счет увеличения адгезии между частичками металла и связующим. Полученные промышленные образцы брикетов обладают высокой механической прочностью, что обеспечивает возможность их дальнейшего использования в металлургическом переделе. Сделан вывод о перспективности полусухого брикетирования с применением гидравлических вибропрессов для утилизации дисперсных отходов ферросплава.*

*Ключевые слова: высокоуглеродистый феррохром, брикетирование, аспирационная пыль, пресс, связующее.*

**Введение**

Одним из ключевых этапов на конечных стадиях производства высокоуглеродистого феррохрома (ВУФХ) являются дробление и рассев слитков металла. Указанные процессы ведутся на дробильно-сортировочных комплексах (ДСК) или линиях, включающих в себя щековые дробилки, грохота и транспортировочные конвейеры [1, с. 616]. Технологические операции по дроблению и фракционированию неизменно сопровождаются (помимо товарных фракций) образованием определенного количества отсевов и дисперсной металлической пыли. Последняя улавливается системой сухой аспирации, входящей также в состав ДСК.

Отсевы повторно используются в технологии разливки металла в качестве подсыпки (постели) с частичным сплавлением со слитком или реализуются потребителям по дисконтной цене. Что касается металлической пыли, то проводить аналогичные действия как с отсевами не представляется возможным в виду её дисперсности. Более 96 % материала представляет из себя порошок крупностью менее 0,071 мм. Наглядно это продемонстрированно ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Фракционный состав пыли от дробления ВУФХ

| Фракция, мм | Содержание, % |
|---|---|
| +0,2 | 0,07 |
| -0,2 – 0,16 | 0,14 |
| -0,16 – 0,125 | 0,31 |
| -0,125 – 0,071 | 2,75 |
| -0,071 | 96,73 |

На текущий момент металлическая пыль от дробления ВУФХ (далее АП) на заводах утилизируется путём переплава в руднотермических печах с получением феррохрома марок ФХ-600 и ФХ-650 комплекстермией. Ежегодно таким способом переплавляется несколько тысяч тонн АП, образовавшихся на отечественных предприятиях.

Основным и существенным недостатком применяемого способа является высокая доля механических потерь АП при загрузке в печь и собственно пылеунос из самой печи в процессе переплава. Из литературных источников известны способы переработки дисперсных ферросплавов путем использования их в порошковой металлургии [2, с. 594], методами СВС-синтеза [3;4;5], прямым переплавом и для получения модификаторов [6;7;8]. Перечисленные методы имеют ряд недостатков, среди которых можно отметить сложность технологических операций производства и повышенные требования к химическому составу конечной продукции.

В этой связи, наиболее рациональным способом переработки пылей считается предварительное его окускование с последующим переделом в плавильных печах [9;10]. Учитывая физические характеристики АП, таких как дисперсность, низкая смачиваемость и остроугольная форма частиц металла оптимальным вариантом окускования в нашем случае является брикетирование [11, с.75].

Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе преследуется цель по отработке технологии окускования АП методом полусухого прессования, с подбором связующего материала в лабораторных условиях с последующей проверкой результатов на промышленном оборудовании.

**Материалы и методы**

На начальном этапе лабораторных опытов составили различные варианты смесей с подбором типа связующего и инертных материалов для случаев плохой адгезии с АП. В качестве связующего определили два материала, это натриевое жидкое стекло (ЖС) и полимерное связующее на основе лигносульфоната (полимер). Выбор жидкого стекла в качестве связующего обусловлено исходя из многолетнего опыта Донского ГОКа по брикетированию мелкого хромового сырья [12, с.33], тогда как связующие на полимерной основе хорошо зарекомендовали себя при окусковании мелкодисперсных хромсодержащих материалов [13, с.45]. Также предусматривались варианты комбинации двух связующих, основанных на литературных данных. Согласно литературных источников [14;15], добавка лигносульфоната позволяет модифицировать жидкое стекло с приданием последнему более высоких вяжущих свойств. В качестве инертного наполнителя применяли пыль сухих газоочисток ферросплавных печей (ПСГ). Далее все варианты смесей для брикетирования свели в единую таблицу 2.

Таблица 2 – Составы смесей для брикетирования

| № варианта смеси | Материалы | Тип связующего | Расход связующего, % |
|---|---|---|---|
| 1 | АП | ЖС | 6 |
| 2 | АП | ЖС | 8 |
| 3 | АП | Полимер | 3 |
| 4 | АП | Полимер | 4 |
| 5 | АП | ЖС/Полимер | 3:3* |
| 6 | АП | ЖС/Полимер | 4:4 |
| 7 | АП+ ПСГ (90/10) | ЖС | 6 |
| 8 | АП+ ПСГ (90/10) | ЖС | 8 |
| 9 | АП+ПСГ (80/20) | ЖС | 6 |
| 10 | АП+ПСГ (80/20) | ЖС | 8 |
| 11 | АП+ ПСГ (90/10) | Полимер | 3 |
| 12 | АП+ ПСГ (90/10) | Полимер | 4 |
| 13 | АП+ПСГ (80/20) | Полимер | 3 |
| 14 | АП+ПСГ (80/20) | Полимер | 4 |
| 15 | АП+ ПСГ (90/10) | ЖС/Полимер | 3 |
| 16 | АП+ ПСГ (90/10) | ЖС/Полимер | 4 |
| 17 | АП+ПСГ (80/20) | ЖС+Полимер | 3:3 |
| 18 | АП+ПСГ (80/20) | ЖС+Лигно | 4:4 |

*- (расход ЖС 3 %: расход Полимера 3 %)

После дозирования компонентов шихты согласно таблице 1, проводили сухое перемешивание в миксере марки EIRICH EL1 до полного усреднения смеси. Затем полученную смесь увлажняли и продолжили перемешивание до

получения однородной консистенции. Влага варьировалась в пределах 3–5 % от массы сухого материала. Готовую смесь засыпали в пресс-форму (d формовочного канала – 30 мм) и брикетировали на прессе модели ИП-1000-1 с усилием сжатия 30 кН на брикет (с расчетом усилия в 425 кг на 1 см$^2$). Полученные брикеты подвергались принудительной сушке в сушильной печи Nabertherm TR 420 при температуре 120°С на протяжении 3 часов. По окончании сушки замерили показатели прочности брикетов на раскол на испытательном прессе модели RB-1000. Отдельно замерили прочность сырых брикетов.

Необходимо отметить, что при брикетировании смеси на чистом АП (варианты № 1–6), не зависимо от типа связующего обладали крайне низкой сырой прочностью и легко разрушались. Увеличение усилия сжатия приводило к появлению глубоких поперечных трещин и разрывов, свидетельствуя о перепрессовке. Наглядно это продемонстрировано на рисунке 1.

Рисунок 1 – Внешний вид брикетов

Ввод инертных наполнителей в виде ПСГ не привело к стабилизации процесса брикетирования для вариантов где использовалось жидкое стекло (смесь № 7–10). В оставшихся вариантах добавка инертных наполнителей дало положительный эффект (смеси №11-18). Результаты замеров прочностных характеристик (для получившихся) брикетов по вариантам смесей занесены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты прочности брикетов на раскол

| № вариантов смеси | Состав | Связующее, % | | W, % | Прочность на раскол сырая, кг/бр. | Прочность на раскол после сушки 120$^0$С, 3ч, кг/бр. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Полимер | ЖС | | | |
| 11 | АП+ ПСГ (90/10) | 3 | 0 | 5 | 17 | 170 |
| 12 | АП+ ПСГ (90/10) | 4 | 0 | 5 | 28 | 188 |
| 13 | АП+ПСГ (80/20) | 3 | 0 | 5 | 37 | 311 |
| 14 | АП+ПСГ (80/20) | 4 | 0 | 5 | 41 | 405 |
| 15 | АП+ ПСГ (90/10) | 3 | 3 | 3 | 27 | 182 |
| 16 | АП+ ПСГ (90/10) | 4 | 4 | 3 | 22 | 232 |
| 17 | АП+ПСГ (80/20) | 3 | 3 | 4 | 16 | 149 |
| 18 | АП+ПСГ (80/20) | 4 | 4 | 4 | 21 | 254 |

Согласно таблице 3, брикеты практически всех вариантов обладают высокой механической прочностью, при требуемых 150 кг/брикет для брикетированного хромового сырья согласно стандартов отечественных предприятий. Однако, следует обращать внимание на брикеты с максимальными показателями прочности в сыром виде. Учитывая, что на промышленном брикетном оборудовании предусматривается высокая доля механического воздействия на сырые брикеты (грохочение, ручная выкладка сырых брикетов) следует выбирать варианты смесей с максимальными прочностными показателями. Этим условиям соответствуют смеси № 13 и № 14 с комбинированием АП и ПСГ при использовании полимерного связующего.

После получения результатов брикетирования в лабораторном масштабе перешли к тестовым испытаниям на промышленных прессах с целью получения так называемых промышленных образцов.

На первом этапе тесты проводили с использованием промышленного валкового пресса типа ПБВ, работающего в паре со смесителем модели ЗЛ-630-01. Принципиальная схема брикетной линии представлена ниже на рисунке 2. Технические характеристики валкового пресса и смесителя приведены в таблицах 4–5.

Таблица 4 – Техническая характеристика валкового брикетного пресса

| № | Наименование параметров и размеров | Ед. изм. | Значение |
|---|---|---|---|
| 1 | Максимальная производительность | т/час | 20 |
| 2 | Усилие прессования (максимальное) | кН | 750 |
| 3 | Усилие прессования (номинальное) | кН | 330-410 |
| 4 | Давление прессования (максимальное) | МПа | 100 |
| 5 | Давление прессования (номинальное) | МПа | 25-30 |
| 6 | Параметры бандажей рабочих валков:<br>- диаметр по прессующей поверхности<br>- ширина прессующей поверхности | <br>мм<br>мм | <br>648<br>330 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 7 | Параметры брикета: объём<br>- плотность (по хромитовой руде)<br>- форма | $см^3$<br>$г/см^3$<br>- | 21-22<br>3,4<br>пельмене образная |
| 8 | Масса пресса (без электродвигателя) | кг | 6 900 |

Таблица 5 – Техническая характеристика смесителя периодического действия (двухроторного с Z образными лопастями) ЗЛ-630-01

| № | Наименование показателей | Ед. изм. | Значение |
|---|---|---|---|
| 1 | Рабочая емкость смесителя | $м^3$ | 0,65 |
| 2 | Полная емкость смесителя | $м^3$ | 1,0 |
| 3 | Мощность двигателя | кВт | 30 |
| 4 | Частота вращения лопастей | обор./мин | 36,5 |
| 5 | Рабочая температура | $^0C$ | от -20 до +60 |

**Результаты и обсуждение**

Как указывалось выше, для тестовых опытов использовали составы смесей № 13 и № 14. Вначале проводилось отдельное дозирование АП и ПСГ на платформенных весах. Весы перед взвешиванием материала калибровали с помощью эталонных грузов в количестве 4 штук номиналом 20 кг каждая. После калибровки весов на нее устанавливали металлический контейнер (МКР) и вели засыпку основного брикетируемого материала. Для обеих вариантов брикетируемых смесей (не зависимо от соотношения АП и ПСГ) навеска составляла 400 кг. Параллельно на малых лабораторных весах дозировали количество связующего материала.

По завершении процесса взвешивания основного сырья и связующего перешли к этапу брикетирования. Сдозированный основной материал в МКР с помощью кран-балки приподнимали и подводили к рабочей камере смесительной машины (1). Днище МКР с сырьем располагалось на высоте 30 см от верхнего уровня камеры смесительной машины. Затем открывали нижний люк МКР через которую сырье высыпалось в камеру смесителя. После этого поверх смеси отдельно засыпали связующий материал и включали смеситель.

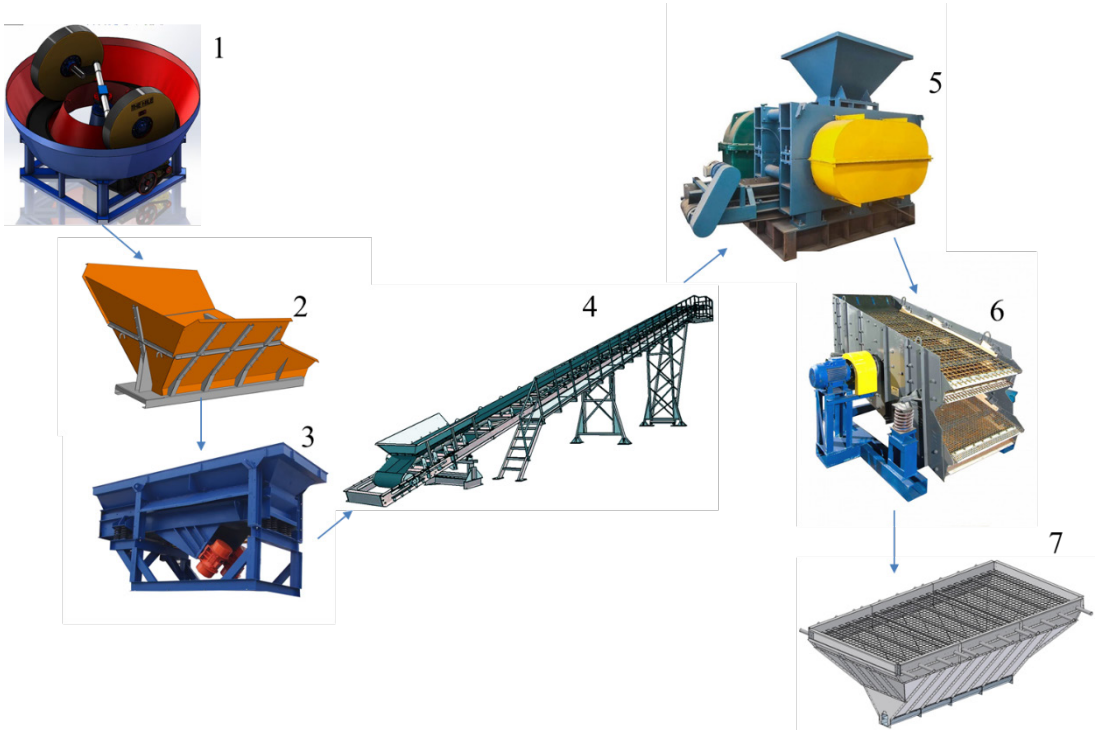



Рисунок 2 – С хема брикетной линии
1 – смеситель; 2 – приемный бункер; 3 – вибропитатель;
4 – конвейерная лента; 5 – валковый брикетный пресс;
6 – виброгрохот; 7 – приемная корзина

Пока шел процесс сухого смешения дозировали количество воды (также через малые лабораторные весы). Как только завершалось сухое перемешивание осуществляли добавку воды в смеситель (не выключая) и продолжали влажное перемешивание. Время для смешивания сухого и увлажненного материала составляла по 5 минут. По истечении установленного времени, смеситель выключали и с помощью поворотного электромеханизма готовую смесь из смесителя пересыпали в приемный бункер (2). Далее с приемного бункера смесь через вибропитатель (3) подавалась на ленточный конвейер (4). С конвейера смесь через промежуточную воронку попадала в брикетный пресс (5). Готовые брикеты по выходу с пресса проходили через виброгорохот (6) и укладывались в специальную сетчатую корзину (7).

В процессе брикетирования смесь №13 прилипала к формовочным ячейкам бандажей, брикеты получались неправильной формы и разрушались при выходе из пресса (рисунок 3). Увеличение ПСГ в смеси до 30% не привело к положительному результату, брикеты также, как и в предыдущем варианте получались неправильной формы и разрушались. Результаты брикетирования смеси № 14 были аналогичными смеси № 13 (рисунок 4).

Рисунок 3 – Формовочные ячейки пресса с залипшим материалом

Здесь также наблюдалось залипание ячеек и разрушение брикетов. Увеличение навески ПСГ также не повлияло на конечные показатели. Доля кондиционных брикетов составила порядка 5–10 % от брикетируемой массы. Внешний вид цельных брикетов представлен на рисунке 5.

Рисунок 4 – Состояние брикетов при выходе из пресса

Показатели прочности на сжатие уцелевших брикетов составили 190–220 кг/брикет. В целом, при брикетировании на валковом прессе основной объем брикетов получается неправильной формы, это вызвано тем, что сама смесь при поступлении на валки пресса прилипает к ячейкам и после этого между ячейками остается очень мало места для формирования нового брикета. Это требует периодической чистки ячеек от смеси, что занимает продолжительное время.

Рисунок 5 – Внешний вид цельных брикетов

Как правило, в процессе правильной работы брикеты после формирования должны отлипать от ячеек и выгружаться, а новая порция смеси должна поступать в пустые ячейки. Учитывая вышеизложенное, брикетирование с использованием валкового пресса прекратили с переходом к полусухому прессованию на промышленном гидравлическом вибропрессе модели TITAN-Z3 (рисунок 6). Характеристики пресса представлены в таблице 5. Брикетирование осуществляли по нижеприведенной методике без изменения составов брикетируемых смесей.

Рисунок 6 – Общий вид вибропресса TITAN-Z3

Таблица 5 – Технические характеристики вибропресса TITAN-Z3

| Наименование показателей | Значение |
|---|---|
| Производительность брикетов 80х80мм, шт/час | 500 |
| Размер формовочной зоны, мм х мм | 400 х 600 |
| Форма брикетов | шестигранная |
| Цикл формовки, сек | 30-60 |
| Давление в гидросистеме, мПа | 6-12 |
| Высота формовочной зоны, мм | 50-200 |

| | |
|---|---|
| Частота колебаний вибростола, Гц | 45-85 |

Материалы для брикетирования и связующее отдельно взвешивали, затем загрузили в одношнековый смеситель и производили сухое перемешивание в течение 7 минут. Далее добавили воду и продолжили влажное перемешивание до полного распределения воды (около 7 минут) по всему объему смеси. Периодически счищали лопасти смесителя от налипшего материала. По завершении перемешивания готовую смесь извлекли из смесителя, затем загрузили в приемный отсек (загрузчик) вибропресса. После этого включили сам пресс и изготовили брикеты. Полученные брикеты имели равную шестиугольную форму, с шириной каждой грани 40 мм, высотой (брикета) 80–83 мм. Внешний вид брикетов показан на рисунке 7.

Рисунок 7 – Внешний вид брикетов

Брикеты подвергались принудительной сушке при температуре 120°С и при естественных условиях на протяжении 3 суток. Изначально планировалось сушку брикетов осуществлять в течение 3 часов как в лабораторных опытах. Однако, по истечении указанного времени сушки середина брикета остается недосушенной (рисунок 8). В связи с этим, для устранения выявленного недостатка время сушки увеличили до 5 часов.

Рисунок 8 – Середина брикетов при сушке в течение 3 часов

По завершении сушки в естественных и принудительных условиях, произвели замеры прочностных характеристик брикетов на раскол, удар, сброс и истираемость.

Замер прочности брикетов на раскол проводили на испытательном прессе модели ИП-50. Замер прочностных характеристик на удар и истираемость по методике на основе ГОСТ 15137-77 «Метод определения прочности во вращающемся барабане (рисунок 9). Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши».

Рисунок 9 – Общий вид испытательного барабана

Пробу для испытания загружают в барабан, плотно закрывают крышкой и барабан приводят в движение. После 200-го оборота барабан останавливается, весь материал выгружают и просеивают сначала на сите с размером сторон ячеек 5 мм, после чего продукт крупностью менее 5 мм просеивают на сите с размером

сторон ячеек 0,5 мм. Полученные при рассеве массы фракции свыше 5 мм, от 5 мм до 0,5 мм и менее 0,5 мм взвешивают раздельно.

Прочность брикетов на удар (Х) в процентах вычисляли по формуле:

$$X = \frac{m1}{m1 + m2 + m3} 100$$

Сопротивление брикетов истиранию (Х1) в процентах вычисляли по формуле:

$$X1 = \frac{m3}{m1 + m2 + m3} 100$$

где: $m_1$ – масса фракции свыше 5 мм после испытания в барабане, кг;
$m_2$ – масса фракции менее 5 мм и свыше 0,5 мм после испытания в барабане, кг;
$m_3$ – масса фракции менее 0,5 мм после испытания в барабане, кг.

Следующие замеры провели для определения горячей прочности брикетов (прочность брикетов на раскол в горячем виде). Для этого муфельную печь Nabertherm TR 420 нагрели до температуры 1000 °С, затем открыли печь и поместили брикеты, после закрыли дверцу печи и начали процесс выдержки. Брикеты внутри печи находились около 15 минут (до выравнивания температуры, так как вовремя открытия дверцы и помещения брикетов в печь некоторая часть тепла теряется). По завершении времени выдержки брикеты извлекли из печи и проверили прочность на раскол с помощью испытательного пресса (рисунок 10).

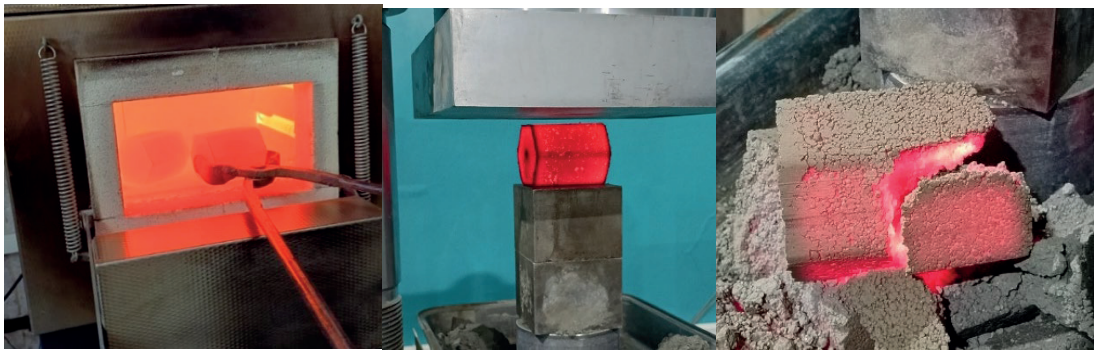


Рисунок 10 – Замер горячей прочности брикетов

После завершения всех замеров прочностных характеристик брикетов (на раскол, удар, сброс и истираемость, а также их горячей прочности) результаты свели в единую таблицу 6. В этой же таблице приведены требования предприятия по внутреннему стандарту для брикетированного сырья.

Таблица 6 –Прочностные характеристики брикетов

| Показатели | Вариант №13 | Вариант №14 | Целевые |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| Прочность на раскол, кг/брикет | 177/205* | 189/263 | 150 |
| Прочность на удар, % | 87/89 | 91/91 | 85 |
| Прочность при истирании, % | 14/12 | 12/11 | 15 |
| Прочность на сброс, % | 93/96 | 96/98 | 90 |
| Горячая прочность, кг/брикет | 45 | 32 | 40 |

*Примечание – сушка в естественных условиях/принудительная сушка

Полученные образцы брикетов из смеси АП и ПСГ обладают достаточной прочностью на раскол и превышают целевые значения по этому показателю. Показатели механической прочности на сброс, удар и истираемость, моделирующие механические нагрузки на брикеты при транспортировке по конвейерам к плавильным агрегатам также имеют высокие значения, превышающие целевые требования.

Горячая прочность брикетов находится в диапазоне 32–45 кг/брикет против 40кг/брикет по целевым значениям.

В целом, проведенные эксперименты показали возможность брикетирования АП при условии ввода в состав смеси инертного материала в виде ПСГ. Количество вводимого ПСГ в соотношении 20:80 и расходе связующего на уровне 3 % (от сухой массы АП и ПСГ) обеспечивает получение брикетов с высокими прочностными характеристиками, достаточными для дальнейшего металлургического передела. Увеличение расхода связующего до 4% хоть и повышает прочностные характеристики брикетов, но приведет к увеличению затрат за счет стоимости связки.

**Выводы**

Окускование АП в чистом виде методом брикетирования не представляется возможным, связанное со спецификой форм зерен и низкой смачиваемостью. Использование материала-наполнителя в виде пыли с рукавных фильтров сухих газоочисток печей, выплавляющих ВУФХ, увеличивает межчастичную адгезию АП, что в конечном итоге позволяет окусковывать их брикетированием.

Помимо этого, пыли рукавных фильтров являются дополнительным источником хрома, а также шлакообразующего компонента, что позволит при переплаве АП исключить использование оборотных шлаков.

Результаты лабораторных исследований по брикетированию были подтверждены в промышленных условиях. По результатам которых было выявлено, что прессование на гидравлических прессах в сравнении с валковыми, полусухим прессованием позволяет получать промышленные образцы брикетов с высокими показателями прочностных характеристик.

Проведенные исследования подтвердили, что брикеты, полученные по разработанной технологии, обладают достаточной прочностью на раскол, удар, сброс и истираемость, а также сохраняют прочность при нагреве до 1000°С. Данные характеристики позволяют использовать их в плавильных агрегатах без потери их качества.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Жукебаева, Т. Ж.** Возможность использования сложных ферросплавов в порошковой металлургии / Жукебаева, Т. Ж., Ахмедия, К. А., Жолдангаров, Е. М. // Научно-образовательный журнал «StudNet». – 2020. –№ 3. – С. 615–620.

2 **Манашев, И. Р.** Утилизация дисперсных отходов ферросплавного производства на базе металлургического СВС-процесса / Манашев, И. Р., Гаврилова, Т. О., Шатохин, И. М. // Черная металлургия. – 2020. – № 8. – С. 591–599.

3 **Салкынбаев, Б. Ж.** Утилизация металлического порошка высокоуглеродистого феррохрома методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) / Салкынбаев, Б. Ж., Досекенов, М. С., Манашев, И. Р. // Научный журнал «Вестник Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова». – 2024. –№ 3. – С. 124–129.

4 **Манашев, И. Р.** Утилизация дисперсных ферросплавов СВС-методом / Манашев, И. Р. // Сборник трудов международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов имени академика А. М. Самарина». – 2022. – С. 364–369.

5 **Канаев, Ю. П.** Освоение переплава ферросилициевой мелочи с получением чистых марок ферросилиция и комплексных модификаторов / Канаев, Ю. П., Бондарев, А. А., Брыляков, В. И. // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 67–70.

6 **Кочкин, В. Д.** Методы и установки утилизации мелкодисперсных отсевов ферросплавов Утилизация дисперсных отходов ферросплавного производства на базе металлургического СВС-процесса / Кочкин, В. Д., Алиферов, А. И., Золотарев, В. В. // Вестник Самарского Государственного. технического университета. Серия технические науки. – 2023. – Т. 31. – № 1. – С. 91–100.

7 **Жунусова, А. К.** Переработка аспирационной пыли феррохрома / Жунусова, А. К., Мамонов, А., Жунусов, А. К. // Наука и техника Казахстана. – 2016. – № 3–4. –С. 66–68.

8 **Shevko, V. M.** The possibility of producing manganoferrosilicochrome alloy from ferroalloy dust / Shevko, V. M., Badikova, A. D., Tuleev, M. A. // International journal of applied and fundamental research. – 2021. – № 6. – С. 74–81.

9 **Баюл, К. В.** Технологии и оборудование для брикетирования мелкофракционных материалов в ферросплавном производстве / Баюл, К. В., Худяков, А. Ю., Ващенко, С. В. // Новости науки Казахстана. – 2018. – 138(4), –С. 108–118.

10 **Бижанов, А. М.** Брикеты экструзии (брэксы) – новый этап в окусковании сырья для черной металлургии / Бижанов, А. М., Курунов, И. Ф. // Металлургиздат. – 2017. – С. 234.

11 **Маймур, Б. Н.** Брикетирование металлургического сырья / Маймур, Б. Н., Худяков, А. Ю., Петренко, В. И. // Бюллетень «Черная металлургия». – 2016. – № 1. – С. 74–81.

12 **Шашкин, В. Н.** Технология обогащения руд и брикетирования концентратов на фабриках ОАО «Донской ГОК» / Шашкин, В. Н., Логинов, Н. М., Багаутдинов, Т. А., Фурсенко А. Ф., Утемисов Б. К. // Горный журнал. – 2011. – № 11. – С. 32–34.

13 **Laikhan, S. A.** Methods of pelletizing fine chromium raw materials, Kempirsay deposit, using polymeric binder / Laikhan, S. A., Ulmaganbetov, N. A., Salkynbaev, B. Zh. // Mining Magazine of Kazakhstan. – 2023. – № 9. – С. 41–48.

14 **Шадрин, Н. И.** Способ приготовления жидкостекольного связующего для изготовления литейных форм и стержней : авторское свидетельство № 1156806 / Шадрин, Н. И., Волокита, В. Я., Кучмий, Н. И. // СССР. – Опубл. 1989. – Бюл. № 35.

15 **Кукуй, Д. М.** Исследование модифицирования водных растворов силиката натрия неорганическими материалами / Кукуй, Д. М. // Сб. – Минск : Металлургия. – 1984. – С. 76–78.

REFERENCES

1 **Zhukebayeva, T.** Vozmozhnost’ ispol’zovaniya slozhnykh ferrosplavov v poroshkovoy metallurgii [Possibility of using complex ferroalloys in powder metallurgy] / Zhukebayeva N., Akhmediya K., Zholdangarov Ye. // Nauchno-obrazovatel’nyy zhurnal «StudNet». – 2020. – № 3. – P. 615–620.

2 **Manashev, I.** Utilizatsiya dispersnykh otkhodov ferrosplavnogo proizvodstva na baze metallurgicheskogo SVS-protsessa [Utilization of dispersed ferroalloy production waste based on the metallurgical SHS process] / Manashev, I. Gavrilova, T., Shatokhin, I. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chyornaya metallurgiya. – 2020. – № 8. – P. 591–599.

3 **Salkynbayev, B.** Utilizatsiya metallicheskogo poroshka vysokouglerodistogo ferrohroma metodom samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza (SVS) [Utilization of high-carbon ferrochrome metal powder by self-propagating high-temperature synthesis (SHS)] / Salkynbayev, B., Dosekenov, M., Manashev, I. // Vestnik Aktjubinskogo regional’nogo universiteta imeni K. Zhubanova. – 2024. – № 3. – P. 124–129.

4 **Manashev, I. R.** Utilizatsiya dispersnykh ferrosplavov SVS-metodom [Utilization of dispersed ferroalloys by SHS method] / Manashev, I. R. // Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Fiziko-khimicheskiye osnovy metallurgicheskikh protsessov imeni akademika A.M. Samarina». – 2022. – P. 364–369.

5 **Kanaev, Yu.** Osvoyeniye pereplava ferrosilitsievoy melochi s polucheniem chistykh marok ferrosilitsiya i kompleksnykh modifikatorov [Mastering remelting of ferrosilicon fines to obtain pure grades of ferrosilicon and complex modifiers] / Kanaev, Yu., Bondarev, A., Brylyakov, V. // Stal’. – 2010. – № 10. – P. 67–70.

6 **Kochkin, V.** Metody i ustanovki utilizatsii melkodispersnykh otsevov ferrosplavov [Methods and installations for utilization of fine ferroalloy screenings] / Kochkin, V., Aliferov, A., Zolotaryov, V. // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya tekhnicheskiye nauki. – 2023. – Vol. 31. – № 1. – P. 91–100.

7 **Zhunusova, A.** Pererabotka aspiratsionnoy pyli ferrohroma [Processing of aspiration dust of ferrochrome] / Zhunusova, A., Mamonov, A., Zhunusov, A. // Nauka i tekhnika Kazakhstana. – 2016. – № 3–4. – P. 66–68.

8 **Shevko, V. M.** The possibility of producing manganoferrosilicochrome alloy from ferroalloy dust / Shevko, V., Badikova, A., Tuleyev, M. // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2021. – № 6. – P. 74–81.

9 **Bayul, K.** Tekhnologii i oborudovaniye dlya brikettirovaniya melkofraktsionnykh materialov v ferrosplavnom proizvodstve [Technologies and equipment for briquetting fine-fraction materials in ferroalloy production] / Bayul, K., Khudyakov, A., Vashchenko, S. // Novosti nauki Kazakhstana. – 2018. – № 138(4). –P. 108–118.

10 **Bizhanov, A.** Brikety ekstruzii (breksy) – novyy etap v okuskovanii syr'ya dlya chernoy metallurgii [Extrusion briquettes (brex) – a new stage in the agglomeration of raw materials for ferrous metallurgy] / Bizhanov, A., Kurunov, I. // Metallurgizdat. – 2017. – P. 234.

11 **Maymur, B.** Brikettirovaniye metallurgicheskogo syr'ya [Briquetting of metallurgical raw materials] / Maymur, B., Khudyakov, A., Petrenko, V. // Byulleten' «Chernaya metallurgiya». – 2016. – № 1. – P. 74–81.

12 **Shashkin, V.** Tekhnologiya obogashcheniya rud i brikettirovaniya kontsentratov na fabrikakh OAO «Donskoy GOK» [Technology of ore beneficiation and concentrate briquetting at the plants of Donskoy Mining and Processing Plant] / Shashkin, V., Loginov, N., Bagautdinov, T., Fursenko, A., Utemisov, B. // Gornyy zhurnal. – 2011. – № 11. – P. 32–34.

13 **Laikhan, S.** Methods of pelletizing fine chromium raw materials, Kempirsay deposit, using polymeric binder / Laikhan, S., Ulmaganbetov, N., Salkynbaev, B. // Mining Magazine of Kazakhstan. – 2023. – № 9. – P. 41–48.

14 **Shadrin, N.** Sposob prigotovleniya zhidkostekol'nogo svyazuyushchego dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney [Method for preparing a liquid glass binder for making foundry molds and cores] / Shadrin, N., Volokita, V., Kuchmiy, N. // USSR Author Certificate № 1156806. Publ. 1989. – Byul. № 35.

15 **Kukuy, D.** Issledovaniye modifitsirovaniya vodnykh rastvorov silikata natriya neorganicheskimi materialami [Study of modification of sodium silicate aqueous solutions with inorganic materials] / Kukuy, D. // Metallurgiya. – Minsk. – 1984. – P. 76–78.

Поступило в редакцию 31.05.25.
Поступило с исправлениями 10.07.25.
Принято в печать 15.07.25.

***О. Р. Сариев[1], М. С.Алмагамбетов[2], Н. З. Нургали[3],***
***Б. С. Келаманов[4], *А. М. Әбдірашит[5]***
[1,4,5]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[2,3]ERG ғылыми-зерттеу инжинирингтік орталығы,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
31.05.25 ж. баспаға түсті.
10.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
15.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЖОҒАРЫ КӨМІРТЕКТІ ФЕРРОХРОМДЫ ҰСАТУДА ТҮЗІЛЕТІН ШАҢДЫ БРИКЕТТЕУ ӘДІСТЕРІН ПЫСЫҚТАУ

*Мақалада ферроқорытпаларды, оның ішінде жоғары көміртекті феррохромды (ЖКФХ) өндіру кезінде пайда болатын дисперсті металл қалдықтарын өңдеу технологиялары мен әдістеріне шолу берілген. Металл шаңдарын қайта пайдаланудың ең арзан және ұтымды әдісі - брикеттеу. Брикеттеу технологияларының дамуын, сондай-ақ осы процеске қатысатын жабдықтар мен байланыстырушы материалдардың жаңа үлгілерін ескере отырып, феррохромды ұсақтаудан аспирациялық шаңды металлургиялық қайта бөлуге толығымен тартуға болады. Бұл болжамды тексеру үшін негізгі нұсқа ретінде полимер негізіндегі байланыстырғыштар мен сұйық әйнекті қолданатын зертханалық зерттеулер жүргізілді. Брикеттердің механикалық қасиеттерін бағалай отырып, зертханалық және өндірістік престерде брикеттеу әдістемесі сипатталған. Зерттеулер көрсеткендей, металл шаңына инертті толтырғышты (газ тазартқыш шаңды) енгізу металл бөлшектері мен байланыстырғыш арасындағы адгезияны арттыру арқылы қоспаның брикеттелуін жақсартады. Алынған брикеттердің өнеркәсіптік үлгілері жоғары механикалық беріктікке ие, бұл оларды металлургиялық қайта бөлуде одан әрі пайдалану мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Ферроқорытпаның дисперсті қалдықтарын кәдеге жарату үшін гидравликалық діріл престерін қолдана отырып, жартылай құрғақ брикеттеудің болашағы туралы қорытынды жасалды.*

*Кілтті сөздер: жоғары көміртекті феррохром, брикеттеу, аспирациялық шаң, пресс, байланыстырғыш.*

***O. R. Sariyev[1], M. S. Almagambetov[2], N. Z. Nurgali[3],***
***B. S. Kelamanov[4], *A. M. Abdirashit[5]***
[1,4,5]Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[2,3]Scientific Research Engineering Center, Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 31.05.25.
Received in revised form 10.07.25.
Accepted for publication 15.07.25.

# DEVELOPMENT OF BRIQUETTING METHODS FOR DUST FROM HIGH-CARBON FERROCHROME CRUSHING

*The article provides an overview of technologies and methods for processing dispersed metal waste generated during the production of ferroalloys, including high-carbon ferrochrome (HC FeCr). It is noted that the cheapest and most rational way to reuse metal dust is briquetting. Taking into account the development of briquetting technologies, as well as the latest equipment and binding materials involved in this process, it is possible to fully involve aspiration dust from crushing ferrochrome in metallurgical conversion. To verify this assumption, laboratory studies were conducted using polymer-based binders and liquid glass as a basic option. The method of briquetting on laboratory and industrial presses is described, with an assessment of the mechanical properties of briquettes. Studies show that the introduction of an inert filler (gas cleaner dust) into the metal dust improves the briquetability of the mixture by increasing the adhesion between metal particles and the binder. The obtained industrial samples of briquettes have high mechanical strength, which provides the possibility of their further use in metallurgical processing. A conclusion is made about the prospects of semi-dry briquetting using hydraulic vibrating presses for the disposal of dispersed ferroalloy waste.*

*Keywords: high-carbon ferrochrome, briquetting, aspiration dust, press, binder.*

МРНТИ 53.49.05

https://doi.org/10.48081/SBFK4865

***А. А. Туганбаева[1], С. К. Аринова[2], Св. С. Квон[3], А. З. Исагулов[4]***

[1,2,3,4]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1248-8100

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1977-8157

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

*e-mail: dicosia0789@gmail.com

# *ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СТАЛИ 40ХН3МФ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ МОДИФИКАЦИИ*

*С использованием программного комплекса Thermo-Calc (версия 2025, база данных TCFE13) выполнено термодинамическое моделирование фазовых превращений в конструкционной легированной стали 40ХН3МФ при различных вариантах модификации химического состава. Построены и проанализированы политермические разрезы для базового состава, стали с добавлением 1,5 % Mo, а также стали с комплексной модификацией легирующими элементами Cr, Ni, Si и Al, введёнными по 0,4 %. Установлено, что добавление молибдена повышает термическую стабильность карбидных фаз (в частности, $M_{23}C_6$ и MC), что способствует дисперсионному упрочнению и повышению износостойкости за счет подавления коалесценции карбидов при нагреве. Комплексные модификаторы, в свою очередь, способствуют стабилизации аустенитной фазы (особенно за счет Ni и Al), уменьшению образования грубых карбидов и интерметаллических соединений, а также повышению пластичности сплава благодаря гомогенизации структуры. Проведённый анализ фазовых превращений позволил точно определить температурные диапазоны полной аустенитизации и растворения основных карбидных фаз, что создаёт основу для оптимизации режимов термической обработки (включая температуру закалки и отпуска) с целью получения мелкозернистой, прочной и однородной структуры. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании составов сталей и технологий термической обработки для повышения их эксплуатационных свойств в ответственных узлах.*

*Ключевые слова: сталь, политермические разрезы, модификаторы, кристаллизация, фаза.*

## Введение

Высокопрочные легированные стали играют критическую роль в обеспечении надёжности и долговечности узлов и деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивного абразивного износа, ударных нагрузок и агрессивных сред, особенно

в горно-шахтной и тяжёлой машиностроительной отраслях [1; 2]. Сталь марки 40ХН3МФ отличается высокой прочностью, прокаливаемостью и устойчивостью к усталостному разрушению, что делает её перспективной для изготовления валов, осей, шестерён и других ответственных компонентов [3, с. 58].

Ключевым фактором, определяющим эксплуатационные характеристики данной стали, является гомогенность её микроструктуры. Наличие крупнофазных включений, неоднородного распределения легирующих элементов и сегрегаций способно существенно ухудшать механические свойства и снижать износостойкость [4; 5].

Одним из наиболее эффективных путей улучшения микроструктуры и свойств является модифицирование. Введение молибдена (Mo) способствует повышению прокаливаемости, увеличивает сопротивление ползучести и обеспечивает стабилизацию структуры за счёт снижения температуры эвтектоидных превращений [6; 7]. Комплексные легирующие добавки, включающие алюминий (Al), кремний (Si), никель (Ni) и хром (Cr), оказывают синергетическое воздействие: они влияют на кристаллизационные процессы, способствуют рафинированию структуры и измельчению зерна, тем самым повышая износостойкость и стабильность свойств [8; 9].

Несмотря на наличие данных по влиянию отдельных элементов, комплексное воздействие многокомпонентных присадок в стали 40ХН3МФ остаётся недостаточно исследованным. В этом контексте перспективным инструментом является термодинамическое моделирование на основе CALPHAD-подхода. Использование программного обеспечения Thermo-Calc позволяет прогнозировать фазовые равновесия, составы фаз, критические температуры и последовательность превращений без проведения дорогостоящих экспериментальных циклов [10; 11; 12].

Целью настоящей работы является моделирование фазовых превращений в стали 40ХН3МФ, модифицированной двумя способами: введением 1,5 мас.% молибдена и многокомпонентной присадкой (Al, Si, Cr, Ni по 0,4 мас.%). Расчёты выполнены с использованием базы TCFE13 в Thermo-Calc с анализом фазовых диаграмм, температурных интервалов фазовых превращений и равновесных фазовых составляющих.

**Материалы и методы**

В рамках настоящей работы была проведена серия термодинамических расчётов с целью прогнозирования фазовых превращений в трёх вариантах стали 40ХН3МФ при различных типах модифицирования. Для моделирования использовано программное обеспечение Thermo-Calc 2025a с базой данных TCFE13, предназначенной для описания фазовых равновесий в железоуглеродистых и низколегированных сталях [11; 12].

Thermo-Calc основан на CALPHAD-подходе (CALculation of PHAse Diagrams), который позволяет вычислять фазовый состав, критические температуры, стабильность фаз и их количественные соотношения в условиях

термодинамического равновесия. Этот метод широко применяется для оценки влияния легирующих элементов на структурную эволюцию сталей [13, с. 456].

Моделирование проводилось для трёх химических составов, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследованных сталей (мас. %)

| Состав | C | Mn | Cr | Ni | Mo | Si | Al | V | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40ХН3МФ (базовый) | 0.36 | 0.4 | 1.35 | 3.2 | 0.4 | - | - | 0.18 | ост. |
| 40ХН3МФ (+Mo 1.5%) | 0.36 | 0.4 | 1.35 | 3.2 | 1.9 | - | - | 0.18 | ост. |
| 40ХН3МФ (+комплекс по 0.4%) | 0.36 | 0.4 | 1.75 | 3.6 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.18 | ост. |

Для каждого состава были построены политермические разрезы фазовые диаграммы, отражающие стабильность фаз в зависимости от содержания ключевых элементов.

Расчёты проводились в температурном диапазоне от 400 до 1600 °C с шагом 100 °C. Предполагались условия термодинамического равновесия, атмосферное давление и отсутствие примесей (O, N, S), влияющих на фазовые превращения. Фазовые обозначения соответствуют принятой международной терминологии: FCC_A1 – γ-фаза (аустенит), BCC_A2 – α-железо, M23C6 – карбиды, SIGMA – σ-фаза и др. Термодинамическое моделирование позволяет выявить особенности влияния различных модифицирующих добавок на фазовые превращения и потенциальную склонность к образованию хрупких фаз.

**Результаты и обсуждение**

В данном разделе представлены результаты термодинамического моделирования фазового состояния стали 40ХН3МФ при различных модификациях химического состава. Анализ проведён с использованием фазовых диаграмм, показывающих изменение состава фаз в зависимости от температуры. Для того чтобы приблизить результаты моделирования к реальной ситуации, в расчетах были использованы фактические значения химического состава стали. На основе полученных данных выполнены термодинамические расчёты, которые позволяют определить фазовый состав сплава при комнатной температуре, а также температуры фазовых превращений и ликвидуса.

На рисунке 1 показана объемная доля фаз, образующихся в рассматриваемой стали в диапазоне температур от 1000 °C до комнатной температуры.

В нижнем интервале температур (500–550 °C) преобладает смесь твердых растворов типа BCC+FCC и сложные карбиды типа $M_{23}C_6$, $M_7C_3$. В диапозоне температур до 600 °C доминирующей фазой является BCC (объёмная доля 96.5 %), а суммарная доля карбидов превышает 3% ($M_{23}C_6$ – 0.73 %, $M_7C_3$ – 2.42 %). В пределах 600°C–700 °C обьемная доля твердых растворов типа BCC+FCC возрастает (обе фазы занимают ~49 % по объему).

При этом наблюдается формирование дополнительной карбидной фазы MC_ETA, содержащей преимущественно Mo и V. Это указывает на увилечение карбидообразования. Наличие значительного количества сложных карбидов

($M_7C_3$, $M_{23}C_6$) в ферритной матрице повышает износостойкость и твердость стали [1; 7]. Карбиды типа MC (на основе ванадия и молибдена) благодаря высокой термической стабильности повышает прочность и сопротивление разупрочнению при отпуске [6; 10]. Однако крупные или избыточные карбиды могут снижать пластичность и ударную вязкость, создавая точки концентрации напряжений [4; 5].

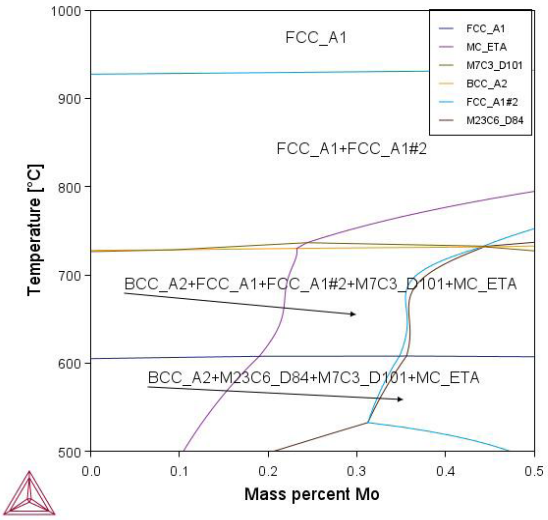



Рисунок 1 – Политермический разрез базового состава стали системы Fe-Ni-Cr

В диапозоне 730–920 °C аустенит становится практически единственной стабильной фазой: доля FCC превышает 99 %, а все другие фазы вытесняются из системы. Это свидетельствует о благоприятных условиях для проведения аустенитизации при температурах выше 730 °C и возможности получения однородной структуры [3, с. 58].

Таким образом, даже в базовом составе без дополнительной модификации наблюдается переход от многофазной структуры к аустенитной при температурах выше 730 °C. Однако наличие устойчивых карбидов при пониженных температурах требует учёта при выборе режимов охлаждения, чтобы избежать избыточной карбидной фазы в готовом изделии, которая, несмотря на положительное влияние на износостойкость, может привести к снижению усталостной прочности и увеличению хрупкости [5].

На рисунке 2 в нижней температурной области наблюдается смесь твердого раствора типа BCC и карбиды типа $M_{23}C_6$ и MC. Основной объём (~94 %) занимает твердый раствор типа BCC , при этом суммарная доля карбидных фаз превышает 5 %, что указывает на значительное увеличение потенциала дисперсионного упрочнения по сравнению с базовым составом.

Это свидетельствует о значительной склонности к карбидообразованию при охлаждении. Молибден активно участвует в образовании карбидов M6C и M23C6, а также упрочняет карбиды типа MC. Это приводит к существенному повышению

твердости, сопротивления износу и сохранению прочности при повышенных температурах [1; 6; 7].

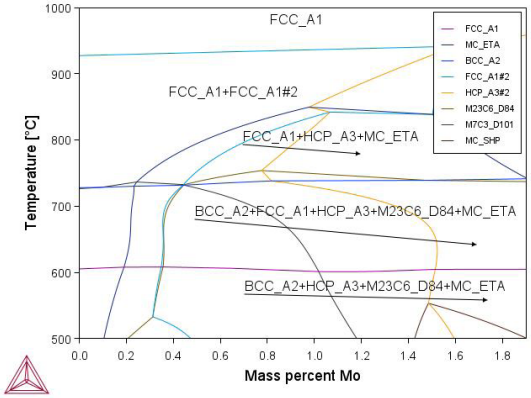



Рисунок 2 – Политермический разрез базового состава стали системы Fe-Ni-Cr с дополнительным содержанием молибдена

Вблизи температуры 700 °C фазовый состав значительно меняется: фиксируется совместное присутствие смесь твердых растворов типа BCC+FCC, а также остаточные карбиды. Аустенит стабилизируется преимущественно за счёт никеля и хрома, его доля достигает ~31 %, в то время как феррит занимает 64 % объёма. Присутствие фаз $M_{23}C_6$ и MC сохраняется, указывая на устойчивость карбидных фаз даже при повышенной температуре. Стабильность карбидов в двухфазной области подтверждает их роль в торможении роста аустенитного зерна при нагреве, что способствует получению более мелкозернистой и однородной конечной структуры после закалки, положительно влияя на прочность и ударную вязкость [8; 10].

При дальнейшем повышении температуры до 896 °C структура становится преимущественно аустенитной: FCC достигает ~99.8 % объёма. Остаточные карбиды практически исчезают. Это указывает на подходящий температурный интервал аустенитизации для проведения термообработки без риска вторичных фаз. Понижение температуры полной аустенитизации, по сравнению с базовым составом, является важным преимуществом, так как позволяет снизить энергозатраты на нагрев и уменьшить риск перегрева и роста зерна аустенита, негативно сказывающегося на вязкости [3; 6].

Свыше 980 °C сохраняется только аустенитная фаза, в которой равномерно распределены все легирующие элементы. Это подтверждает высокую растворимость легирующих компонентов в аустените при данной температуре, включая Mo, Cr, Ni, что важно для равномерного сплава при литье и закалке. Равномерное распределение Mo в аустените перед закалкой является предпосылкой для его эффективного участия в упрочнении мартенсита и подавлении процессов отпускной хрупкости на последующих стадиях обработки [6].

На рисунке 3 представлена объемная доля фаз, образующихся в рассматриваемой стали, модифицированной четырьмя элементами Cr, Ni, Si, Al по 0.4 %. Комплексное легирование оказывает синергетическое влияние на фазовое равновесие, сдвигая температурные границы фаз и уменьшая объём нежелательных образований.

В области 600–650 °C преобладает смесь ферритной фазы с аустенитом и комплексами карбидов – $M_{23}C_6$, $M_7C_3$, MC и остаточным графитом. При 609 °C твердый раствор типа BCC составляет ~93.7 % объёма, а втердый раствор типа FCC – около 3.6 %. В отличие от состава с 1.5 % Mo, здесь отмечается существенное уменьшение доли карбидов: графит – менее 0.6 %, M7C3 – 1.1 %, M23C6 – 0.4 % по сравнению с составом модифицированным 1.5 % Mo. Это говорит о более сбалансированном распределении углерода и снижении склонности к графитизации. Снижение объема крупных карбидов M7C3 и особенно подавление графитизации являются критически важными для улучшения пластичности и ударной вязкости стали [4; 5; 8]. Al и Si активно связывают углерод, способствуя формированию более мелких и стабильных карбидов или растворению углерода в матрице.

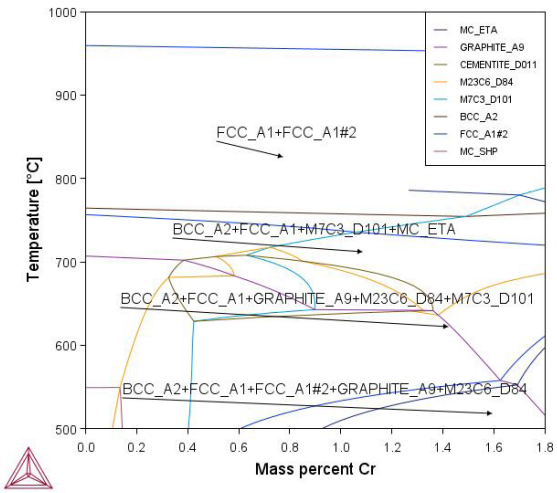



Рисунок 3 – Политермический разрез базового состава стали системы Fe-Ni-Cr с комплексной модификацией

При дальнейшем нагреве (650–710 °C) наблюдается появление цементита, однако его количество умеренное – около 3 % по массе. Аустенитная фаза увеличивается до 20 %, сохраняя стабильность даже при сравнительно низких температурах. Увеличение доли аустенита в двухфазной области и его стабильность при более низких температурах косвенно свидетельствуют об улучшении прокаливаемости стали [3; 8].

В высокотемпературной области (809 °C) фиксируется почти полная стабилизация аустенита — суммарная объёмная доля превышает 99.6 %, при этом легирующие элементы Ni, Cr, Al, Mo равномерно растворены в матрице.

По сравнению с другими составами, это указывает на наиболее широкий интервал аустенитизации. Расширение области гомогенного аустенита обеспечивает большую гибкость при выборе температур аустенитизации и гарантирует более полное растворение карбидов, что является основой для получения однородной, мелкозернистой структуры высокой прочности и вязкости после закалки [3; 8; 9].

Отдельного внимания заслуживает поведение фазы MC, содержащей V и Mo. Она сохраняется во всех вариантах, но в комплексе с остальными элементами её объёмная доля уменьшается, по сравнению с базовым составом, что может свидетельствовать об улучшении пластичности и уменьшении склонности к хрупкому разрушению. Хотя дисперсные карбиды MC полезны для упрочнения, их избыток может способствовать хрупкости.

**Информация о финансировании**

Данное исследование было проведено в рамках гранта Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24993020)

**Выводы**

Проведенное термодинамическое моделирование фазовых превращений в стали 40ХН3МФ при различных типах модифицирования добавление 1.5% Mo и комплексной присадки Cr, Ni, Si, Al по 0.4% позволило установить следующее:

– При базовом составе выше температуры 730 °C в стали формируется однородная аустенитная структура за счёт вытеснения других фаз, что создаёт благоприятные условия для термической обработки. Однако при пониженных температурах сохраняются устойчивые карбиды, которые повышают твердость и износостойкость, но могут снижать пластичность и усталостную прочность за счет образования карбидной сетки.

– При дополнительном введение молибдена в количестве 1.5 % при температуре до ~700 °C преобладает ферритная фаза (BCC) с карбидами $M_{23}C_6$ и MC, обеспечивающими дисперсионное упрочнение и повышенную износостойкость. При нагреве до 896 °C структура становится почти полностью аустенитной, что позволяет проводить аустенитизацию с меньшими энергозатратами и риском перегрева, сохраняя однородность и мелкозернистость структуры.

– При комплексной модификаций стали Cr, Ni, Si и Al по 0,4 % снижается образование крупных карбидов и графита, улучшая пластичность и вязкость. При нагреве достигается широкий интервал аустенитизации и равномерное распределение легирующих элементов, что способствует формированию прочной и однородной структуры после закалки.

Термодинамическое моделирование показало, что модифицирование стали 40ХН3МФ как за счёт добавления 1.5 % Mo, так и комплексной присадкой Cr, Ni, Si, Al по 0,4 % позволяет целенаправленно управлять фазовым составом и структурой в процессе термообработки. Это обеспечивает оптимальный баланс между твёрдостью, износостойкостью и пластичностью стали, расширяя технологические возможности для получения прочной и мелкозернистой структуры с высокой эксплуатационной надёжностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Bai, Q., Wang, Y., Huang, X., Cui, J.** Effect of Cr and Mo addition on the microstructure and wear resistance of high-strength steel // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 804. – Article ID: 140662. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140662.

2 **Wang, D., Huang, M., Li, X., et al.** Microstructure evolution and wear behavior of medium-carbon bainitic steel // Tribology International. – 2019. – Vol. 138. – P. 111–120. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.007.

3 **Каирбекова, А. Е., Баймухамедов, К. Ж.** Влияние термообработки на структуру и свойства стали 40ХН3МФ // Вестник Карагандинского университета. Серия: Физика и математика. – 2020. – № 100(4). – С. 58–64.

4 **Zhang, K., Zhao, X., Liu, Y., et al.** Effect of rare earth elements on the microstructure and inclusion modification in high-strength steels // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2017. – Vol. 26(5). – P. 2295–2303. – https://doi.org/10.1007/s11665-017-2650-7.

5 **Pan, X., Luo, L., Wang, F., Zhang, J.** Refinement and strengthening mechanism in high-alloy steel modified by complex alloying // Materials Characterization. – 2020. – Vol. 159. – Article ID: 110020. – https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110020.

6 **Zhao, Y., Li, J., Wang, G., et al.** Influence of molybdenum on bainite transformation and mechanical properties in low-carbon steel // Metals. – 2021. – Vol. 11(4). – Article ID: 617. – https://doi.org/10.3390/met11040617.

7 **Thongchitrugsa, N., Chianpairot, A., Hartung, F., Lothongkum, G.** Effect of molybdenum on wear resistance of Cr-Nb hard-faced S355JR steel // Materials Testing. – 2014. – Vol. 56(3). – P. 187–192. – https://doi.org/10.3139/120.110616.

8 **Li, Y., Han, J., Wang, X., Chen, W.** Effect of Al and Si complex alloying on the microstructure and mechanical properties of cast steel // Metals and Materials International. – 2022. – Vol. 28(1). – P. 80–89. – https://doi.org/10.1007/s12540-021-00834-0.

9 **Qin, H., Li, B., Zhang, X.** Effect of Ni and Cr addition on carbide precipitation in steel // Materials Research Express. – 2020. – Vol. 7(9). – Article ID: 096514. – https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba4fc.

10 **Zhang, J., Li, M., Zhao, Y., et al.** Thermodynamic analysis and microstructural evolution in microalloyed steels // Journal of Iron and Steel Research International. – 2021. – Vol. 28(3). – P. 324–332. – https://doi.org/10.1007/s42243-021-00548-9.

11 **Lukas, H. L., Fries, S. G., Sundman, B.** Computational Thermodynamics: The CALPHAD Method. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 320 p.

12 Thermo-Calc Software AB. Thermo-Calc Software User Guide (Version 2025a) [Computer software manual]. – Stockholm, Sweden, 2025. – [Электронный ресурс]. – https://www.thermocalc.com.

13 **Baranov, A. V., Shvets, N. I.** Thermodynamic assessment of phase formation in low-alloy steels // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2020. – Vol. 41(4). – P. 456–462. – https://doi.org/10.1007/s11669-020-00801-5.

REFERENCES

1 **Bai, Q., Wang, Y., Huang, X., Cui, J.** Effect of Cr and Mo addition on the microstructure and wear resistance of high-strength steel // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 804. – Article ID: 140662. – https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140662.

2 **Wang, D., Huang, M., Li, X., et al.** Microstructure evolution and wear behavior of medium-carbon bainitic steel // Tribology International. – 2019. – Vol. 138. – P. 111–120. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.007.

3 **Kairbekova, A. E., Baimukhamedov, K. Zh.** Vliyanie termobrabotki na strukturu i svoystva stali 40KhN3MF [Effect of heat treatment on the structure and properties of 40KhN3MF steel] // Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya: Fizika i matematika. – 2020. – № 100(4). – P. 58–64.

4 **Zhang, K., Zhao, X., Liu, Y., et al.** Effect of rare earth elements on the microstructure and inclusion modification in high-strength steels // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2017. – Vol. 26(5). – P. 2295–2303. – https://doi.org/10.1007/s11665-017-2650-7.

5 **Pan, X., Luo, L., Wang, F., Zhang, J.** Refinement and strengthening mechanism in high-alloy steel modified by complex alloying // Materials Characterization. – 2020. – Vol. 159. – Article ID: 110020. – https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110020.

6 **Zhao, Y., Li, J., Wang, G., et al.** Influence of molybdenum on bainite transformation and mechanical properties in low-carbon steel // Metals. – 2021. – Vol. 11(4). – Article ID: 617. – https://doi.org/10.3390/met11040617.

7 **Thongchitrugsa, N., Chianpairot, A., Hartung, F., Lothongkum, G.** Effect of molybdenum on wear resistance of Cr-Nb hard-faced S355JR steel // Materials Testing. – 2014. – Vol. 56(3). – P. 187–192. – https://doi.org/10.3139/120.110616.

8 **Li, Y., Han, J., Wang, X., Chen, W.** Effect of Al and Si complex alloying on the microstructure and mechanical properties of cast steel // Metals and Materials International. – 2022. – Vol. 28(1). – P. 80–89. – https://doi.org/10.1007/s12540-021-00834-0.

9 **Qin, H., Li, B., Zhang, X.** Effect of Ni and Cr addition on carbide precipitation in steel // Materials Research Express. – 2020. – Vol. 7(9). – Article ID: 096514. – https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba4fc.

10 **Zhang, J., Li, M., Zhao, Y., et al.** Thermodynamic analysis and microstructural evolution in microalloyed steels // Journal of Iron and Steel Research International. – 2021. – Vol. 28(3). – P. 324–332. – https://doi.org/10.1007/s42243-021-00548-9.

11 **Lukas, H. L., Fries, S. G., Sundman, B.** Computational Thermodynamics: The CALPHAD Method. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 320 p.

12 Thermo-Calc Software AB. Thermo-Calc Software User Guide (Version 2025a) [Computer software manual]. – Stockholm, Sweden, 2025. – [Electronic resource]. – https://www.thermocalc.com.

13 **Baranov, A. V., Shvets, N. I.** Thermodynamic assessment of phase formation in low-alloy steels // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2020. – Vol. 41(4). – P. 456–462. – https://doi.org/10.1007/s11669-020-00801-5.

Поступило в редакцию 29.07.25.
Поступило с исправлениями 31.07.25.
Принято в печать 07.08.25.

***А. А. Туганбаева[1], С. К. Аринова[2], Св. С. Квон[3], А. З. Исагулов[4]***
[1,2,3,4]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
29.07.25 ж. баспаға түсті.
31.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
07.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ӘР ТҮРЛІ МОДИФИКАЦИЯДАҒЫ 40ХН3МФ БОЛАТТАҒЫ ФАЗАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРДІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

*Thermo-Calc (2025 нұсқасы, TCFE13 дерекқоры) бағдарламалық кешенін пайдаланып, 40ХН3МФ маркалы құрылымдық легирленген болаттағы фазалық ауысулардың химиялық құрамын әртүрлі нұсқалар бойынша өзгерту термодинамикалық модельдеуі жүргізілді. Негізгі құрамға, 1,5 % Mo қосылған болатқа және Cr, Ni, Si, Al легирлеуші элементтерінен әрқайсысы 0,4 % мөлшерінде кешенді қосылған болатқа арналған политермиялық қималар тұрғызылып, талданды. Зерттеу молибден қосу карбидтік фазалардың (әсіресе, $M_{23}C_6$ және MC) термиялық тұрақтылығын арттыратынын, бұл қыздыру кезінде карбидтердің коалесценциясын тежей отырып, дисперсиялық бекіту мен тозуға төзімділікті көтеретінін анықтады. Кешенді легирлеуші элементтер, өз кезегімен, аустенит фазасының тұрақтылығын (Ni және Al әсерінен ерекше) арттырып, ірі карбидтер мен интерметаллды қосылыстардың түзілуін азайтып, құрылымның гомогенизациясы арқылы қорытпаның серпімділігін жоғарылатады. Жүргізілген фазалық ауысулардың талдауы толық аустенитттену және негізгі карбидтік фазалардың еруі температуралық аралықтарын дәл анықтауға мүмкіндік берді. Бұл күйдіру және босату температурасын қоса алғандағы термиялық өңдеу режимдерін оңтайландырудың негізін қалады, нәтижесінде ұсақ түйірлі, берік және біртекті құрылым алынады. Модельдеу нәтижелері болат құрамын жобалауда және олардың жауапты түйіндердегі пайдалану қасиеттерін арттыру үшін термиялық өңдеу технологияларын әзірлеуде қолданыла алады.*

*Кілтті сөздер: болат, политермиялық кесінділер, модификаторлар, кристалдану, фаза.*

***A. A. Tuganbaeva[1], S. K. Arinova[2], Sv. S. Kvon[3], A. Z. Isagulov[4]***
[1,2,3,4]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
Received 29.07.25.
Received in revised form 31.07.25.
Accepted for publication 07.08.25.

## THERMODYNAMIC MODELING OF PHASE TRANSFORMATIONS IN 40CRNI3MOV STEEL WITH DIFFERENT MODIFICATIONS

*Thermodynamic modeling of phase transformations in the structural alloy steel 40KhN3MF under various chemical composition modifications was performed using the Thermo-Calc software package (version 2025, TCFE13 database). Polythermal sections were constructed and analyzed for the base composition, steel with 1.5 % Mo addition, and steel with a complex modification involving the addition of 0.4 % each of Cr, Ni, Si, and Al. It was established that the addition of molybdenum increases the thermal stability of carbide phases (particularly $M_{23}C_6$ and MC), which inhibits carbide coalescence upon heating, thereby promoting dispersion strengthening and enhanced wear resistance. The complex modifiers, in turn, contribute to the stabilization of the austenite phase (notably due to Ni and Al), reduction in the formation of coarse carbides and intermetallic compounds, and an increase in the alloy's plasticity owing to structural homogenization. The conducted analysis of phase transformations enabled the precise determination of the temperature ranges for complete austenitization and dissolution of the primary carbide phases. This provides a basis for optimizing heat treatment regimes (including quenching and tempering temperatures) to achieve a fine-grained, strong, and homogeneous structure. The simulation results can be utilized in designing steel compositions and heat treatment technologies to improve their service properties in critical components.*

*Keywords: steel, polythermal cuts, modifiers, crystallization, phase.*

## ТРАНСПОРТ

ҒТАМР 73.01

https://doi.org/10.48081/JQJP9680

***А. В. Мухаметжанова[1], *А. М. Жандарбекова[2],***
***К. А. Мурзабекова[3], Қ. Қ. Қуанышбекова[4], Д. С. Искаков[5]***
[1,4]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3]Алматы менеджмент университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[5]Universal tech decisions, Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3577-3831
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4905-4005
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4906-8976
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5293-1291
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6598-2471
*e-mail: asselzhandarbekova@gmail.com

# *КӨЛІК САЛАСЫНЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯСЫ: ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТІНІҢ МҮМКІНДІКТЕРІ*

*Мақала Қазақстанның көлік саласындағы бизнес-процестердің цифрлық трансформациясына жасанды интеллектінің әсерін талдауға арналған. Цифрландырудың жедел қарқынмен дамып, логистикалық жүйелердің тиімділігі мен тұрақтылығына қойылатын талаптардың артуы жағдайында зерттеу жасанды интеллектінің енгізудің мүмкіндіктерін, тәуекелдерін және болашағын анықтауға бағытталған.*

*Зерттеу объектісі – көлік саласы, ал пәні – жасанды интеллектінің негізгі бизнес-процестерге, соның ішінде автоматтандыру, болжау, маршруттау және қорларды басқаруға әсері.*

*Әдіснамалық базаға 73 маманнан алынған сараптамалық сауалнама мен SWOT-талдау әдісі кірді, бұл цифрландырудың күшті және әлсіз тұстарын, сондай-ақ қауіптер мен мүмкіндіктерді кешенді бағалауға мүмкіндік берді. Сауалнама нәтижелері жасанды интеллектінің деректерді өңдеу тиімділігін айтарлықтай арттыратынын, шығындарды азайтатынын және логистиканы оңтайландыруға септігін тигізетінін көрсетті, бірақ адамды эмпатия, этика және стратегиялық ойлау мәселелерінде алмастырмайды.*

*Деректерді жоғалту, технологиялық тәуелділік және стандартты емес жағдайларда алгоритмдердің шектеулілігімен байланысты тәуекелдер анықталды. жасанды интеллектіні сәтті енгізу инфрақұрылымды жаңғырту, кадрларды даярлау және ұйымдық мәдениетті бейімдеу сияқты кешенді өзгерістерді талап ететіні анықталды. Зерттеу Big Data және бұлттық*

*шешімдер сияқты цифрлық технологиялардың халықаралық логистикалық нарықтардағы бәсекеге қабілеттілікті арттырудағы маңызды қозғаушы күштерін атап көрсетеді.*

*Ұсынылған қорытындылар мен тәжірибелік ұсыныстар көлік саласындағы цифрлық трансформацияны стратегиялық жоспарлауға және логистика мен цифрландыру саласындағы мемлекеттік саясатты әзірлеуге пайдалы болуы мүмкін.*

*Кілтті сөздер: Көлік, көлік саласы, бизнес-процестер, жасанды интеллект, сараптамалық бағалау, цифрландыру, трансформация.*

**Кіріспе**

Цифрландырудың қарқынды дамуы көлік саласының тиімділігін және оның бәсекеге қабілеттілігін арттыру үшін жаңа мүмкіндіктер ашады [1, 73-б.] Кейбір ғылыми жарияланымдарда [2, 215-б,] [3, 343-б,] [4, 47-48 б,] [5, 1-14 б,] келтірілген ғылыми зерттеулер нәтижелері, көлік саласының трансформациясы оның тиімділігін, қауіпсіздігін және ыңғайлылығын жақсартуға бағытталғанын көрсетеді.

Әлем бойынша жұмыс орындарының 40 % ЖИ әсері бар, ал экономикасы дамыған елдерде бұл көрсеткіш 60 % артады [6]. Сондықтан біріккен ұлттар ұйымы (ББҰ) халықаралық ұйымдары жүк пен көлік құралдары туралы деректер мен ақпараттың жедел әрі қауіпсіз алмасуын қамтамасыз ету үшін БҰҰ-ның жаһандық стандарттарын пайдалана отырып, сауда және кедендік рәсімдерді одан әрі цифрландыруды қолдайды. Бұл көлік саласындағы, әсіресе тасымалдауды оңайлату және қағазсыз сауданы дамыту жөніндегі БҰҰ-ның құқықтық құжаттарына сәйкес келеді [7].

Дүниежүзілік экономикалық форумда (Давос, 2024) талқыланған жасанды интеллектінің (ЖИ) еңбек нарығына әсері, көлік саласының инфрақұрылымын жаңғырту, технологиялық шектеулерді жою және Ұлттық жүйелерді халықаралық жүйелерге біріктіру қажеттілігін көрсетеді [6]. Цифрлық мультимодальды көлік дәліздерінің дамуы Қазақстан үшін транзиттік торап ретінде өте маңызды, бұл Қытай мен Еуропаның логистикалық платформаларымен интеграцияны қамтамасыз етеді. Бірақ та, ақпараттық интеграция мен тәуекелдерді басқару стратегиясының болмауы саланы цифрландыруды тежейді. Зерттеу көлік саласының бизнес-процестерін цифрландырудың әсерін талдауға және бағалауға арналған.

Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, көлік, транзит және кеден саласындағы цифрлық құралдарды, әсіресе мультимодальды көлік дәліздері бойында енгізу – уақыт талабы. Осыған орай, «Қазақстан темір жолы» ұлттық компаниясы» АҚ 2019 жылдан бастап «Цифрлық трансформация» жаңғырту бағдарламасы аясында 60 түрлі жоба мен іс-шараны іске асырып келеді [8, 9].

Бұл мақаланың зерттеу нысаны көлік саласы болып табылады.

Зерттеу пәні – ЖИ-нің көлік компанияларының бизнес-процестеріне әсері.

Зерттеудің мақсаты – бизнес-процестердің цифрлық трансформациясын талдау және бағалау.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы:

Сараптамалық бағалау мен SWOT-талдауды қоса алғанда, көлік компанияларының бизнес-процестеріне ЖИ - тің ықпалына кешенді талдау жүргізілді, бұл микро- және макро деңгейлерде саланы цифрландырудың негізгі драйверлері мен тәуекелдерін анықтауға мүмкіндік берді.

**Материалдар мен әдістері**

ЖИ-тің бизнес-процестерге әсерін бағалау үшін сараптамалық бағалаулар қолданылды (73 респонденттің іріктемесі, сенімділік деңгейі 0,95). Жүргізілген SWOT-талдау күшті және әлсіз жақтарды анықтауға, сондай-ақ көлік саласын цифрландырудың мүмкіндіктері мен қауіптерін анықтауға мүмкіндік берді.

Респондентер санының іріктеме көлемі келесі формула бойынша анықталды:

$$n = \frac{z^2 pq}{\Delta^2}$$

мұнда $n$ – іріктеме көлемі;

$z$ – сарапшылар таңдаған сенімді деңгейге тәуелді коэффициент;

$p$ – зерттелетін белгіге ие респонденттердің үлесі;

$q = 1 - p$ – зерттелетін белгісі жоқ респонденттердің үлесі;

$\Delta$ – іріктеменің шегті қатесі.

Сенімділік деңгейі нақты үлестің алынған сенімділік интервалында жату ықтималдығы: іріктемелік үлес (р) ± іріктеме қатесі (Δ) болып саналады. Іріктеменің сенімді деңгейі әдетте 0,95 немесе 0,99-ға тең қабылданады. Осы зерттеуде 0,95-ке тең сенімді деңгей қабылданды. Бұл деңгейде $z$ мәні 1,96 тең.

Есептеулер нәтижесі бойынша іріктеме көлемі:

$$n = \frac{1{,}96^2 \cdot 0{,}95 \cdot (1 - 0{,}95)}{0{,}05^2} = \frac{0{,}931}{0{,}0025} = 73$$

.

**Нәтижелер және талқылау**

Зерттеу барысында ЖИ деректерді өңдеуді жеделдететінін, шығындарды азайтатынын және күнделікті процестерді автоматтандыратынын, бірақ эмпатия, этика және сенімді қарым-қатынас мәселелерінде адамды алмастырмайтынын анықтайтын сараптамалық сауалнама жүргізілді. ЖИ көлік саласында қолданудың негізгі бағыттары - тасымалдауды оңтайландыру, қадағалау, болжау, автоматтандыру және үлкен деректерді талдау. Сонымен қатар, сарапшылар ақпараттың қауіпсіздігіне, технологияға тәуелділікке және шешім қабылдаудың этикалық аспектілеріне байланысты елеулі тәуекелдерді атап өтеді. ЖИ-ті енгізу компаниялардың стратегиясын өзгертуді, қызметкерлерді оқытуды және клиенттерге қызмет көрсету жүйесін жетілдіруді талап етеді.

ЖИ тиімді енгізу үшін көлік компанияларына үлкен көлемдегі деректер, қуатты есептеу ресурстары, сенімді сақтау және қауіпсіздік жүйелері және қолданыстағы технологиялармен интеграция қажет. Мамандарды даярлау, қаржылық инвестициялар және серіктестіктер маңызды рөл атқарады, бұл

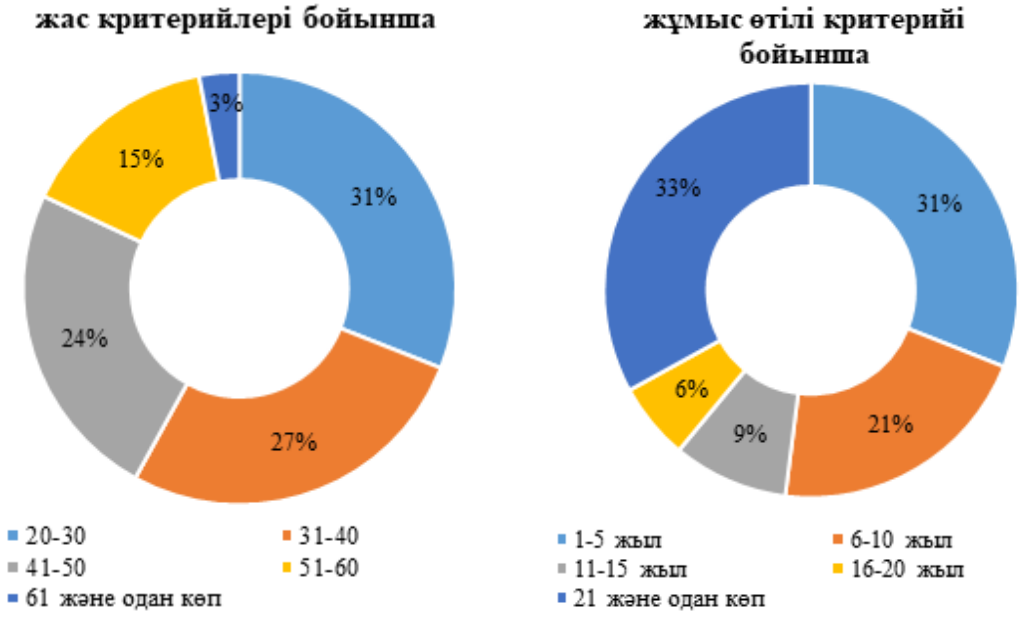
логистикалық процестерді оңтайландыруға және жаһандық нарықта бәсекеге қабілеттілікті арттыруға мүмкіндік береді.

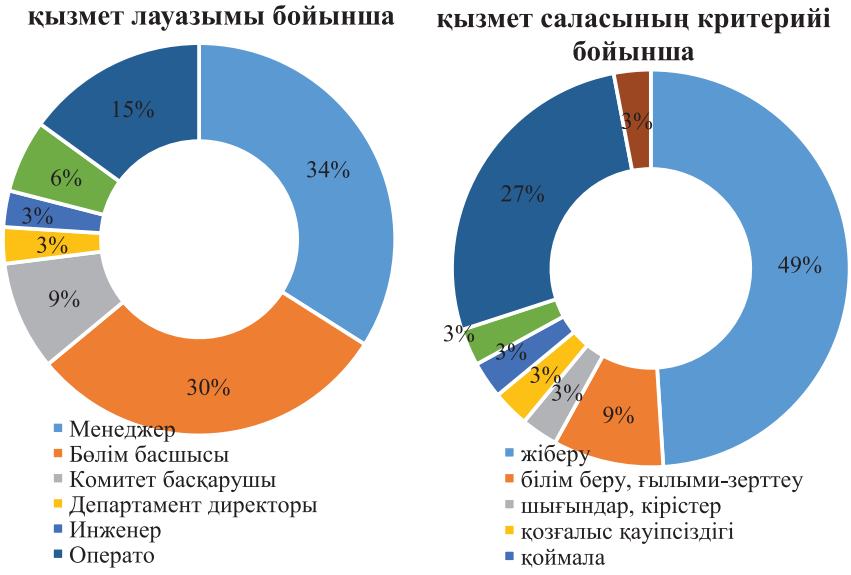
Көлік саласының негізгі бизнес-процестерін цифрландыру объективті қажеттілікке айналуда, алайда ЖИ-ке деген сенім мәселесі маңызды болып қала береді.

Осы зерттеу аясында Қазақстанның көлік саласындағы 73 маман арасында (сенімділік деңгейі 0,95) сараптамалық сауалнама жүргізіліп, олардың осы мәселе бойынша пікірлері бағаланды. Іріктемеде 54, 5% әйелдер, 45,5 % ер адамдар болды, респонденттердің 82 %-ы 20–50 жаста болды, бұл ең белсенді кәсіби кезеңге сәйкес келеді, ал 18 %-ы 50 жастан асқан [10, 170-б].

Сауалнамаға көлік логистикасының сегіз саласының мамандары және олардың жұмыс өтілін ескере отырып, сегіз түрлі лауазым деңгейлері қатысты (1-суретте көрсетілген).

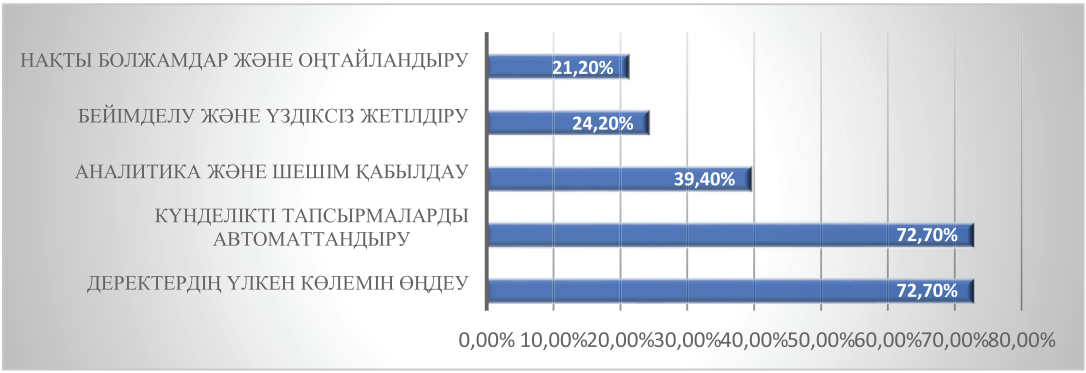
Сауалнаманы респонденттердің саны бойынша үлкен дәрежеде үш негізгі топ толтырды: 21 жылдан астам жұмыс өтілі бар сарапшылар – 33,3 %, 1 жылдан 5 жылға дейін – 30,3 %, 6 жылдан 10 жылға дейін – 21,2 %.





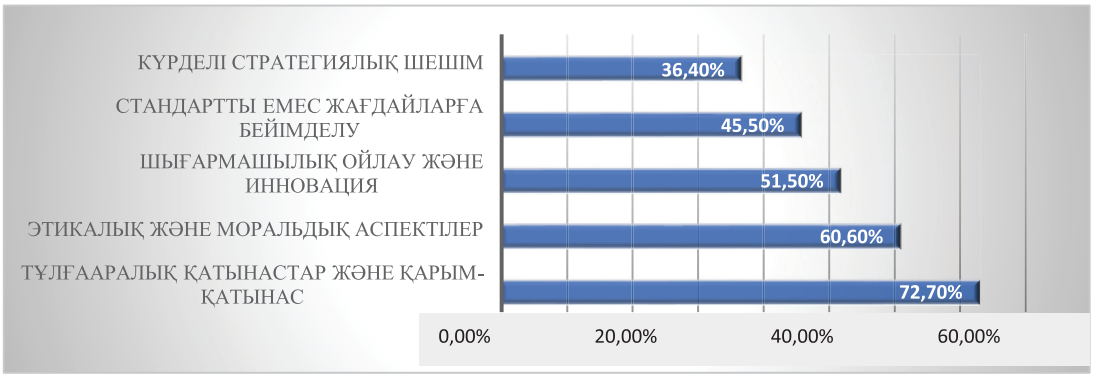

1-сурет – Респонденттерді таңдау критерийлері

Сарапшылардың жауаптарын талдау нәтижесінде респонденттердің 72,7 %-ы ЖИ үлкен деректерді өңдеу және талдауда ең тиімді деп санайтыны анықталды, бұл логистикадағы қажеттіліктерді дәл болжауға, қорларды басқаруға және маршруттарды оңтайландыруға мүмкіндік береді. Сол мөлшердегі қатысушылар күнделікті тапсырмаларды автоматтандырудың маңыздылығын атап өтті, мысалы, жүктің қозғалысын бақылау және маршруттау, бұл адам ресурстарын стратегиялық жұмыстарға босатуға мүмкіндік береді. Сарапшылар 39,4 % жағдайда деректерді терең талдау мен үлгіні анықтауды атап өтті, ал ЖИ-тің өзгерістерге тез бейімделу мүмкіндігін респонденттердің 24,2 % қолдады. Болашақ трендтерді жоғары дәлдікпен болжауды қатысушылардың 21,2 % атап өтті, бұл болжаудағы ЖИ рөлін шектеулі қабылдауды көрсетеді (2-сурет).




2-сурет – ЖИ логистикалық компанияның білікті қызметкерінен қарағанда жақсы жұмыс істейтінін салыстыру кезінде сарапшылардың қалауын талдау

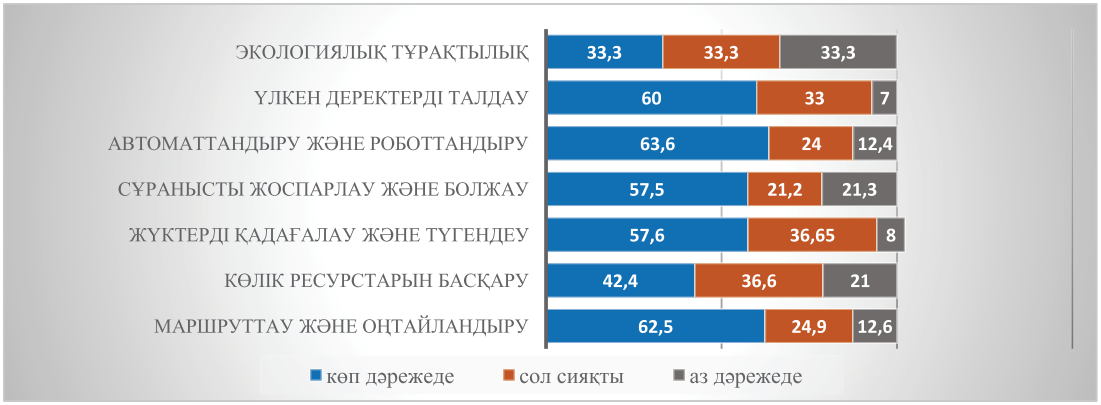
Сарапшылар ЖИ адамның қандай аспектілерде артықшылығы бар екені туралы әртүрлі пікірде болды, бірақ респонденттердің 72,7 %-ы клиенттермен, жеткізушілермен және серіктестермен өзара әрекеттесудің эмпатия мен икемділікті талап ететінін атап өтті, бұл адамға тән қасиет болып қалады. Этикалық және моральдық пайымдау қатысушылардың 60,6 %-ы үшін маңызды, ал 51,5 %-ы стратегиялық басқарудағы шығармашылық ойлау мен инновацияның маңыздылығын атап өтті (3-сурет).




3-сурет – Логистикалық компанияның білікті қызметкері ешқашан жасанды интеллектті жеңе алмайтын себептерді салыстыру кезінде сарапшылардың қалауын талдау

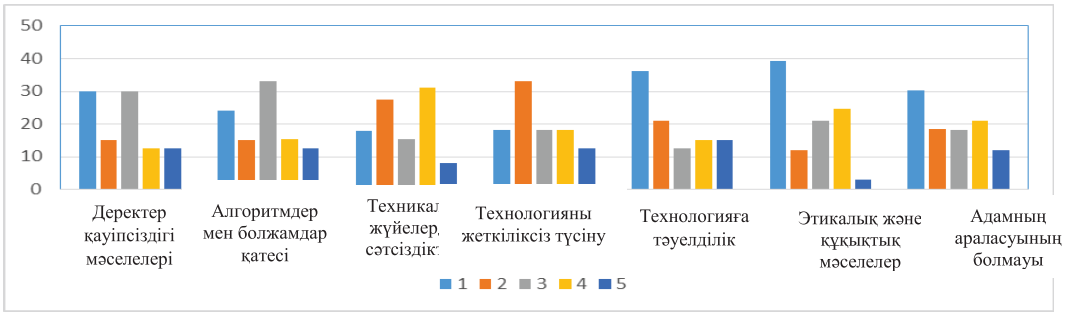
Төтенше жағдайларға жедел әрекет етуді сауалнамаға қатысқандардың 45,5 %-ы қолдады, ал 36,4 %-ы белгісіздік жағдайында шешім қабылдауда адам тәжірибесі мен түйсігінің маңыздылығын көрсетті. Жалпы, сарапшылар көлік логистикасындағы ЖИ-тің басым рөлін мойындады, бірақ адам таптырмас болып қалатын маңызды бағыттарды атап өтті (3-сурет).

Сарапшылардың шамамен 60 %-ы ЖИ тасымалдаудың барлық кезеңдерінде бизнес-процестердің тиімділігін арттырады деп келіседі. Алайда респонденттердің тек 42,4 %-ы оның көлік ресурстарын болжау мен пайдаланудағы маңыздылығын атап өтті, ал 36,6 %-ы адам факторы тиімді болып қала береді деп санайды. Маршруттарды оңтайландыру және энергия тиімділігін арттыру мәселесінде пікірлер тең бөлінді, бұл осы саладағы ЖИ әсер ету дәрежесін нақты бағалауға мүмкіндік бермейді (4-сурет).




4-сурет – Көлік логистикасы саласында пайдалану кезінде ЖИ мүмкіндіктеріне қатысты сарапшылардың қалауын талдау

Сарапшылар негізгі қауіптерді бөліп көрсете отырып, көлік саласына ЖИ енгізу тәуекелдерін бағалады. Алгоритмдік шешімдерге қатысты этика мәселелері, әсіресе автоматтандырылған көлік құралдары үшін жауапкершілік тұрғысынан ерекше назар аударды. Сондай-ақ, компаниялардың технологияға тәуелділігі байқалады, онда ақаулар операцияларды тоқтатуы мүмкін. Жоғары тәуекелдер деректердің бұзылуына және құпия ақпаратқа рұқсатсыз қол жеткізуге байланысты. Сонымен қатар, процестерді автоматтандыру клиенттердің стандартты емес жағдайларда оператормен өзара әрекеттесу мүмкіндіктерін шектеуі мүмкін (5-сурет).

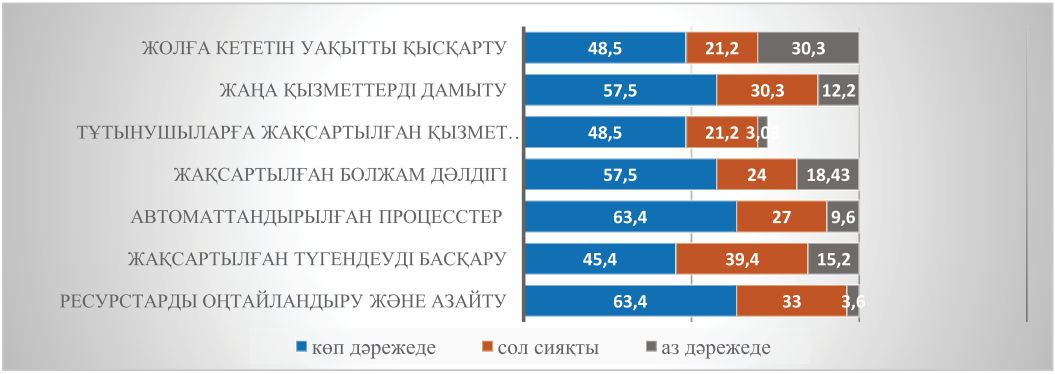



5-сурет – Көлік компанияларында ЖИ пайдалану кезінде клиенттер күтетін тәуекелдерді қарастыруда сарапшылардың қалауын талдау

Барлық басқа жағдайлар респонденттерде жоғары қауіпті аландаушылық тудырмады, бірақ сарапшылар олардың қауіпсіз болуы мүмкін деп санамайды. Сауалнамаға қатысқандардың көпшілігі 27-ден 33 % -ға дейін бұл көрсеткіштерге орташа тәуекел дәрежесін берді.

Сарапшылар көлік саласына ЖИ енгізудің қосымша тәуекелдерін, соның ішінде дұрыс емес болжамдар мен қосымша шығындарға әкелетін алгоритмдік қателерді, кідірістер мен шығындарды тудыратын техникалық ақауларды және клиенттердің сенімсіздік тудыруы мүмкін ЖИ жұмыс принциптерін түсінбеуін

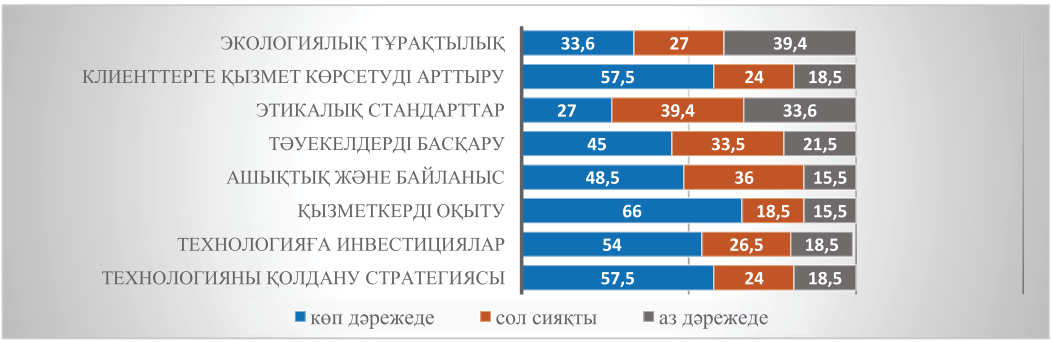
атап өтті. Зерттеу барысында ЖИ-тің экономикалық факторларға әсері де бағаланды.




6-сурет – ЖИ-тің кәсіпорынның экономикалық факторларына әсерін сараптамалық бағалауды талдау

Сарапшылардың көлік саласы кәсіпорындарының экономикалық факторларының өзгеруіне ЖИ әсерін бағалау нәтижесінде әр мәлімдемедегі респонденттердің 50-ден 64 %-на дейін ЖИ қолданған кезде кәсіпорын экономикасы өсуге ұмтылатынын атап өтті (6-сурет).

Сарапшылардың 48,5-тен 66 %-на дейін үйлесімді дамып келе жатқан компанияның саясаты мен әлеуметтік ортасына ЖИ үлкен әсері көрсетілген, ал қалған жағдайларда сарапшылардың пікірлері 3 % қателікпен бірдей бөлінді (7-сурет). Сонымен қатар, сарапшылар экологиялық тұрақтылық пен этикалық стандарттар ЖИ енгізу кезінде компания саясатының өзгеруіне әсер етпейтінін атап өтті.




7-сурет – Сарапшылардың көлік компанияларының саяси факторларының оларға ЖИ әсер етуіндегі өзгерістерін бағалау нәтижелерін талдау

Сарапшылардың ең көп саны (70 %-ы) ЖИ-тің компания қызметкерлерінің функционалдығы мен біліктілігіне әсерін атап өтті. Сарапшылардың көпшілігі (51 %-ы) ЖИ енгізу компаниялардың әлеуметтік жауапкершілік деңгейіне айтарлықтай әсер ететініне күмәнануда, өйткені ол өзгеріссіз қалады (8-сурет).

8-сурет – Сарапшылардың көлік компанияларының әлеуметтік факторларының оларға ЖИ әсер етуімен өзгеруін бағалау нәтижелерін талдау

Респонденттердің 45–54 %-ы командалық өзара әрекеттесу, күнделікті тапсырмаларды автоматтандыру, персоналды басқару модельдері және алгоритмдердің ашықтығы сияқты әлеуметтік факторларға ЖИ-тің шамалы әсерін атап өтті. Сонымен бірге, сарапшылардың 82 %-ы «Үлкен деректер (Big Data)» технологиясын көлік компанияларын дамытудың кілті деп таныды (8-сурет).

Сарапшылардың 61 %-дан астамы бұлтты технологиялар масштабтау мен қол жетімділікті қамтамасыз етеді деп санайды, ал 45,5 %-ы автоматтандыруға, роботтандыруға және бизнес-процестерді бақылауға әсерін атап өтеді (9-сурет).

9-сурет – ЖИ-тің компаниялар қолданатын технологияларға әсерін бағалау нәтижелерінің диаграммасы

Алайда, көлікті басқару жүйелері нақты баға алған жоқ: респонденттердің 36 %-ы ЖИ айтарлықтай өзгерістер күтеді, ал ондағы ерекше әсер көп емес. Жалпы, ЖИ көлік компанияларының бизнес-процестеріне айтарлықтай әсер етеді, бұл саланың стратегиялық басымдығы ретінде цифрландыру қажеттілігін растайды (9-сурет).

**Қорытынды**

Осы зерттеудің нәтижелері цифрландырудың көлік саласын трансформациялауға өсіп келе жатқан әсерін көрсетеді. Сараптамалық сауалнама оның артықшылықтары мен ықтимал қауіптерін көрсетті. Осы зерттеу барысында ЖИ қолдану мүмкіндігі мен күрделілігін түсіну үшін SWOT-талдау жасалды (1-кесте).

1-кесте − SWOT-көлік саласындағы компанияларда ЖИ пайдалануды талдау

| Мықты жақтары | Әлсіз жақтары |
|---|---|
| Болжау дәлдігін арттыру;<br>Бақылау және маршруттау процестерін автоматтандыру;<br>Қызмет сапасын жақсарту;<br>Адам факторынан туындаған қателіктерді азайту. | ЖИ енгізудің жоғары құны;<br>ЖИ жүйелерін оқыту және оларға қызмет көрсету қажеттілігі;<br>Күрделі және стандартты емес көріністердегі ЖИ шектеулері; |
| Мүмкіндіктері | Қауіптер |
| Өндіріс қорларын басқаруды жақсарту;<br>Тауарларды жеткізудің тиімділігі мен бағасын жақсарту;<br>Клиенттердің адалдығын арттыру;<br>Өнімділікті арттыру. | Деректерді жоғалту және құпиялылықты бұзу мүмкіндігі;<br>Логистикалық қызметтер нарығындағы жоғары бәсекелестік;<br>Жүйелердегі қателер мен ақаулар;<br>Өзектендірудің тұрақты қажеттілігі. |

ЖИ негізіндегі көлік саласын цифрландыру халықаралық көлік дәліздерін дамыту үшін жаңа мүмкіндіктер ашады, олардың тиімділігін, тұрақтылығын және интеграциясын арттырады. Бұл әлеуетті іске асыру үшін халықаралық ынтымақтастық, цифрлық стандарттарды біріздендіру, құқықтық үйлестіру және инфрақұрылымдық үйлесімділік қажет. ЖИ-тің жаһандық логистикаға әсері оның көлік жүйелерін жаңарту мен цифрлық трансформациялаудың негізгі факторы ретіндегі рөлін растайды.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Zhanibek A., Abazov R., Khazbulatov A.** Digital Transformation of a Country’s Image : The Case of the Astana International Finance Centre in Kazakhstan //Virtual Economics. – 2022. – Vol. 5. – № 2. – P. 71–94. – https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.02(4)

2 **Dimian, M., Zadobrischi, E., Căilean, A., Beguni, C., Avătămăniței, S. A., Paşcu, P.** Digital Transformation of the Transport Sector Towards Smart and Sustainable Mobility // Digital Transformation : Technology, Tools, and Studies. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 215–237.

3 **Ceyhun G. Ç.** Recent developments of artificial intelligence in business logistics: A maritime industry case // Digital Business Strategies in Blockchain Ecosystems : Transformational Design and Future of Global Business. – 2019. – P. 343–353.

4 **Rosendorff A., Hodes A., Fabian B.** Artificial intelligence for last-mile logistics-Procedures and architecture // The Online Journal of Applied Knowledge Management (OJAKM). – 2021. – Vol. 9. – №. 1. – P. 46–61.

5 **Wang S.** Artificial intelligence applications in the new model of logistics development based on wireless communication technology // Scientific programming. – 2021. – Vol. 2021. – №. 1. – P. 5166993. – https://doi.org/10.1155/2021/5166993

6 Всемирный экономический форум // [Электронды ресурс]. – https://www.weforum.org/agenda/2024/01/surprising-things-to-know-about-ai-and-emerging-technology-at-davos-2024 (Жүгіну уақыты: 2025 жылдың 18 ақпаны).

7 Joint Statement on the Contribution of International Trade and Supply Chains to a Sustainable Socioeconomic Recovery in COVID-19 times. [Электронды ресурс]. – https://www.cepal.org/en/notes/joint-statement-contribution-international-trade-and-supply-chains-sustainable-socioeconomic. (Жүгіну уақыты: 2025 жылдың 9 ақпаны)

8 «KAZLOGISTICS» Қазақстан көлік тасымалдаушыларының одағы» Available at: [Электронды ресурс]. – https://kazlogistics.kz/ru. (Жүгіну уақыты: 2025 жылдың 19 ақпаны)

9 «Қазақстан темір жолы» АҚ Available at: [Электронды ресурс]. – https://www.railways.kz/ru/investoram/godovye-otchety/. – (Жүгіну уақыты: 2025 жылдың 9 ақпаны)

10 Mukhametzhanova, A., Zhandarbekova, A., Sala, D., Bekzhanova, S., Sultanov, T., Devetiyarova, N. Digital transformation of the transport industry: analysis of opportunities and risks. Bulletin of LN Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series. – 2024. – Vol. 149. – №. 4. – P. 162–187. – https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-149-4-162-187

REFERENCES

1 **Zhanibek A., Abazov R., Khazbulatov A.** Digital Transformation of a Country's Image: The Case of the Astana International Finance Centre in Kazakhstan //Virtual Economics. – 2022. – Vol. 5. – №.2. – P. 71–94. – https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.02(4)

2 **Dimian, M., Zadobrischi, E., Căilean, A., Beguni, C., Avătămăniței, S. A., Paşcu, P.** Digital Transformation of the Transport Sector Towards Smart and Sustainable Mobility // Digital Transformation: Technology, Tools, and Studies. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 215–237.

3 **Ceyhun G. Ç.** Recent developments of artificial intelligence in business logistics: A maritime industry case // Digital Business Strategies in Blockchain Ecosystems: Transformational Design and Future of Global Business. – 2019. – P. 343–353.

4 **Rosendorff A., Hodes A., Fabian B.** Artificial intelligence for last-mile logistics-Procedures and architecture // The Online Journal of Applied Knowledge Management (OJAKM). – 2021. – Vol. 9. – №. 1. – P. 46–61.

5 **Wang S.** Artificial intelligence applications in the new model of logistics development based on wireless communication technology // Scientific programming. – 2021. – Vol. 2021. – №. 1. – P. 5166993. – https://doi.org/10.1155/2021/5166993

6 Vsemirnyj ekonomicheskij forum [World Economic Forum] // [Electronic resource]. – https://www.weforum.org/agenda/2024/01/surprising-things-to-know-about-ai-and-emerging-technology-at-davos-2024/ (Accessed: 28.01.2025).

7 Joint Statement on the Contribution of International Trade and Supply Chains to a Sustainable Socioeconomic Recovery in COVID-19 times. [Electronic resource]. – https://www.cepal.org/en/notes/joint-statement-contribution-international-trade-and-supply-chains-sustainable-socioeconomic. Accessed: February 18, 2025)

8 «KAZLOGISTICS» Qazaqstan kölik tasymaldaushylarynyñ odaġy [«KAZLOGISTICS» The Union of Transport Workers of Kazakhstan] Available at: [Electronic resource]. – https://kazlogistics.kz/ru. (Accessed: February 19, 2024)

9 «Qazaqstan temir joly» AQ [Joint Stock Company National Company Kazakhstan Railways] Available at: [Electronic resource]. – https://www.railways.kz/ru/investoram/godovye-otchety/. (Accessed: February 09, 2025)

10 **Mukhametzhanova, A., Zhandarbekova, A., Sala, D., Bekzhanova, S., Sultanov, T., Devetiyarova, N.** Digital transformation of the transport industry: analysis of opportunities and risks. Bulletin of LN Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series. – 2024. – Vol. 149. – №. 4. – P. 162–187. – https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-149-4-162-187

21.04.25 ж. баспаға түсті.
19.05.25 ж. түзетулерімен түсті.
23.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***А. В. Мухаметжанова[2], *А. М. Жандарбекова[3],***
***К. А. Мурзабекова[3], Қ. Қ. Қуанышпекова[4], Д. С. Искаков[5]***
[1,4]Евразийский университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;
[2]Казахский агротехнический исследовательский
университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[3]Алматы менеджмент университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[5]Universal tech decisions, Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 21.04.25.
Поступило с исправлениями 19.05.25.
Принято в печать 23.07.25.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ: ВОЗМОЖНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Статья посвящена анализу влияния искусственного интеллекта (ИИ) на цифровую трансформацию бизнес-процессов транспортной отрасли Казахстана. В условиях стремительной цифровизации и растущих требований к эффективности и устойчивости логистических систем, исследование направлено на выявление возможностей, рисков и перспектив внедрения ИИ в транспортные компании. Объектом исследования является транспортная*

*отрасль, а предметом – влияние ИИ на ключевые бизнес-процессы, включая автоматизацию, прогнозирование, маршрутизацию и управление запасами.*

*Методологическая база включает экспертный опрос 73 специалистов с применением SWOT-анализа, что позволило провести всестороннюю оценку сильных и слабых сторон, а также угроз и возможностей цифровизации. Результаты опроса показали, что ИИ значительно повышает эффективность обработки данных, снижает затраты и способствует оптимизации логистики, при этом не заменяя человека в вопросах эмпатии, этики и стратегического мышления.*

*Выявлены риски, связанные с утратой данных, технологической зависимостью и ограниченностью алгоритмов в нестандартных ситуациях. Установлено, что успешное внедрение ИИ требует комплексных изменений: модернизации инфраструктуры, подготовки кадров и адаптации организационной культуры. Исследование подчеркивает значимость цифровых технологий, включая Big Data и облачные решения, как драйверов повышения конкурентоспособности на международных логистических рынках.*

*Представленные выводы и практические рекомендации могут быть полезны для стратегического планирования цифровой трансформации в транспортной отрасли и разработки государственной политики в области логистики и цифровизации.*

*Ключевые слова: Транспорт, транспортная отрасль, бизнес-процессы, искусственный интеллект, экспертная оценка, цифровизация, трансформация.*

***A. V. Mukhametzhanova[1], *A. M. Zhandarbekova[2],***
***K. A. Murzabekova[3], K. K. Kuanyshbekova[4], D. S. Iskakov[5]***
[1,4]Eurasian National University named after L. N. Gumilyov,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[2]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[3]Almaty Management University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[5]Universal tech decisions, Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 21.04.25.
Received in revised form 19.05.25.
Accepted for publication 23.07.25.

## TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION OF THE TRANSPORTATION INDUSTRY: OPPORTUNITIES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

*This article examines the impact of artificial intelligence (AI) on the digital transformation of business processes in Kazakhstan's transportation sector. In the context of rapid digitalization and increasing demands for efficiency and sustainability in logistics systems, the study aims to identify the opportunities, risks, and prospects associated with implementing AI in transportation companies. The research object is the transportation sector, and the subject is the influence of AI on key business processes, including automation, forecasting, routing, and inventory management.*

*The methodological framework involves an expert survey of 73 specialists, using SWOT analysis to conduct a comprehensive assessment of the strengths, weaknesses, opportunities, and threats related to digitalization. The survey results indicate that AI significantly enhances data processing efficiency, reduces costs, and contributes to logistics optimization, while not replacing human input in areas such as empathy, ethics, and strategic thinking.*

*The study also identifies risks related to data loss, technological dependency, and the limitations of algorithms in non-standard situations. It concludes that successful AI implementation requires comprehensive changes, including the modernization of infrastructure, staff training, and the adaptation of organizational culture. Additionally, the research emphasizes the importance of digital technologies, such as Big Data and cloud solutions, as drivers for enhancing competitiveness in international logistics markets.*

*The findings and practical recommendations presented in this article may prove useful for strategic planning in the digital transformation of the transportation sector and for the development of state policies in logistics and digitalization.*

*Keywords: Transportation, transportation industry, business processes, artificial intelligence, expert evaluation, digitalization, transformation.*

SRSTI 73.49.23

https://doi.org/10.48081/GXFT8138

***A. A. Rakisheva[1], S. B. Kokin[2], V. S. Yessaulkov[3], Petr Bouchner[4], *K. K. Abishev[5]***

[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[2,3,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[2,5]Kazakhstan Institute of Science and Technology LLP,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[4]Czech Technical University in Prague, Czech Republic, Prague.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7020-5672
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2461-2231
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0153-8051
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8308-1656
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2001-0428
*e-mail: a.kairatolla@mail.ru

# *ON THE PROBLEM OF DESIGNING A VEHICLE WITH HYBRID PROPULSION*

*The article considers current issues of designing vehicles with hybrid propulsion in the context of modern environmental, economic and technological challenges. Particular attention is paid to hybrid vehicles that combine the advantages of internal combustion engines and electric motors, which helps to reduce emissions, save fuel and increase operational efficiency. The work emphasizes the importance of hybrid vehicles as a compromise option in the context of tightening environmental standards and rising energy prices.*

*A review of the layout schemes of hybrid propulsions: parallel, series and combined series and parallel is given with an analysis of their design features, advantages and disadvantages. Particular attention is paid to increasing efficiency, reducing fuel consumption and compliance with environmental standards. The work is based on literary sources and demonstrates the importance of hybrid technologies as a promising direction in transport engineering.*

*The article is devoted to the design and research of a vehicle with hybrid propulsion, carried out at the Department of Transport Equipment and Logistics of the Toraighyrov University. The design of a vehicle with hybrid propulsion helps expand the functionality of the vehicle, ensuring its adaptability, energy efficiency and environmental friendliness. Such solutions allow the integration of intelligent control systems, which increases the reliability and stability of vehicles in various operating conditions.*

*Keywords: vehicle, automotive design, battery, combined propulsion, hybrid propulsion.*

**Introduction**

Currently, the development of vehicles with hybrid propulsion is relevant due to the reasons related to modern requirements for vehicles and their operation. Firstly, the global trend towards reducing carbon dioxide emissions and improving the ecological situation has resulted in an increased demand for vehicles with hybrid propulsion.

Vehicles with hybrid propulsions are commonly referred to as hybrid vehicles. By putting together traditional combustion engines with electric propulsion systems, these vehicles can reduce fuel consumption and harmful emissions. Secondly, energy crises and rising fuel prices are pushing for the need to develop more economical and efficient transport solutions.

Moreover, modern technological advancements in batteries, electric motors and control systems open up new opportunities to improve the reliability and durability of hybrid vehicles, which in turn reduces the overall cost of vehicle maintenance.

It is important to note that hybrid vehicles are able to meet new requirements in many countries and cities without having to switch completely to electric vehicles due to the tightening of environmental standards.

The development and research of vehicles that have a hybrid propulsion system is a crucial task in the context of environmental, economic, and technological challenges of today.

**Materials and methods**

Continuously innovating and correct operation of all systems and units of automobiles, tractors, agricultural machinery and other specialized motor equipment is an important condition for the development of the country and improvement of the environmental situation. Trends in the development of motor vehicles show that work on the study and design of hybrid propulsions for environmentally friendly vehicles, consisting of on-board energy sources, has actually emerged as an independent area of modern electrical and mechanical engineering over the past 15 years. This direction is characterized by its own scientific problems, the specificity of the implementation of applied research, as well as an expanding area of practical use of developments. The increased interest in these works is due to the fact that, in connection with the dramatic deterioration of the global environmental situation and the reduction of natural resources, i.e. energy sources of fuel for cars, the development of environmentally friendly vehicles is becoming increasingly relevant.

Research in this area is driven by current trends in the development of wheeled and tracked vehicles, namely increased power, improved traction characteristics, off-road capability and reliability. With the optimal design of transport vehicles featuring hybrid propulsion systems, these vehicles become more economical and environmentally friendly than traditional models. They significantly reduce the reliance on internal combustion engines (ICE) and enhance their efficiency by integrating electric motors, ensuring more sustainable and rational operation. One of the main tasks of transport engineering involves the automotive industry’s goal of complying with environmental standards, among other things [1].

With increasing demands on environmental issues caused by the use of transport vehicles, various fuels and lubricants, as well as large amounts of exhaust gases, the need arose to create «green» transport vehicles.

A review of literary sources [2; 3; 4] on the issue showed that in the modern world there are fewer and fewer cars with carburetor engines, the share of cars with diesel engines has increased significantly, and the great attention is being paid to alternative types of fuel. The use of hybrid propulsions for transportation is increasing at a fast pace.

A vehicle with hybrid propulsion is a vehicle that uses not only the energy of the internal combustion engine, but also energy stored in electrochemical, electrostatic, or mechanical devices to drive wheels.

There are the following layout schemes depending on the method of connecting the internal combustion engine and energy storage device to the drive [5]:

– parallel, in which the engine and storage device are connected by a differential, which in turn is connected to the wheel drive. This scheme is shown in Figure 1.

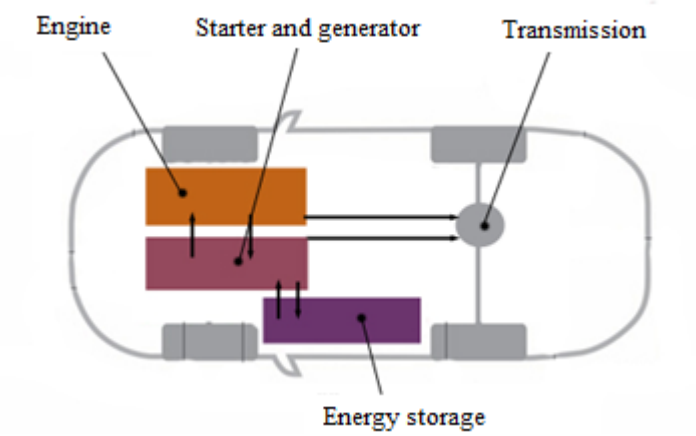



Figure 1– Schematic diagram of parallel hybrid propulsion

In a parallel layout, the internal combustion engine is used as the main source of energy, and the electric motor is used in start-up, low-load, and acceleration modes. The electric motor can also operate as a generator to recharge the batteries. The layout is distinguished by its simplicity and low cost. The advantage of the parallel layout is the higher efficiency of energy transfer from the primary engine to the drive wheels compared to the serial circuit and the possibility of using one electric unit instead of two. The disadvantage of the layout is that the internal combustion engine operates under various load conditions, including those that are not optimal in terms of efficiency, the complexity of the propulsion control system, and the use of a sequential mechanical transmission when regulating the speed of movement [6; 7; 8].

The parallel scheme is used in Integrated Motor Assist (Honda) vehicles. Its simplicity in design and low cost makes it advantageous;

– series layout, when the propulsion is connected to an energy storage device, which is in turn connected to the wheel drive. Its diagram is shown in Figure 2.

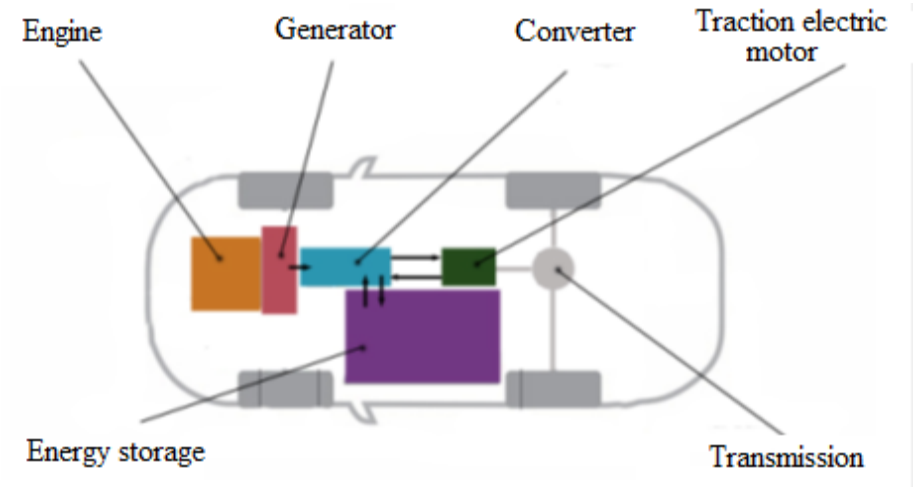



Figure 2 – Schematic diagram of series hybrid layout

In a series layout, the internal combustion engine transmits energy solely to a generator, and the engine power must match the generator power. This principle is used in electric transmission to deliver a large amount of torque from the ICE to the wheels without the need for a mechanical gearbox. At the same time, the issue of optimizing propulsion operation in terms of fuel consumption is addressed, as the ICE can operate in its most fuel-efficient mode, while the efficiency of the electric drive is significantly higher compared to that of a mechanical transmission. This layout also allows for more flexible placement of the propulsion units within the vehicle. However, a key disadvantage of this configuration is the presence of double energy conversion, which leads to significant energy losses. The mechanical energy produced by the ICE is first converted into electrical energy via the generator, and then into mechanical energy again by the electric motor, ; which drives the vehicle's wheels [6; 7; 8].

The same principle is applied in electric transmission, used when there is a need to transmit high torque from the engine to the wheels;

– combined parallel and series layout functions, depending on the operating mode, both in series and in parallel.

Combined parallel and series layout of hybrid propulsion is the most complicated one. This scheme is referred to as a "Full Hybrid" in technical literature. It is used in vehicles such as the Toyota Prius, Lexus LS 600h, and other models [6]. This design can operate in both series and parallel modes, depending on the driving conditions, and it offers relatively high efficiency in transmitting energy from the internal combustion engine to the drive wheels. In addition to the parallel layout, a generator and a planetary gear mechanism, known as a power-split device or power divider, are incorporated into the system.

In this combined layout, the power flows from the internal combustion engine and electric motor to the drive wheels is divided. The power units are connected to separate inputs of the planetary gearbox. This scheme ensures efficient control of the power flows from the electric motor and internal combustion engine. In the urban test cycle,

a hybrid car with this layout operates 80 % of the time from batteries. At higher speeds and when driving at a constant speed, the internal combustion engine is connected, while ensuring its operation in a mode of minimal fuel consumption and toxicity [9].

The rationale for the use of hybrid propulsions in vehicles and the analysis of their main characteristics are best presented in [10].

**Results and discussions**

Currently, the Department of Transport Equipment and Logistics of the Toraighyrov University is working on the development and research of a vehicle with a combined power plant.

Based on the analysis of various layout schemes for vehicles with hybrid propulsion, a new, rational layout for a hybrid vehicle has been proposed. Although many leading companies now mass-produce electric vehicles, the issue of selecting the optimal power rating for the drive motors remains unresolved. Similarly, the problem of choosing the most effective type of power transmission has yet to be fully addressed. In most existing vehicle drive systems, speed variation is achieved at a constant transmission ratio by controlling the engine speed. However, in these systems, speed control is typically implemented by altering the transmission ratio rather than by regulating the speed of the electric motor [11; 12].

The proposed layout of the vehicle allows organizing and simplifying the selection of its components and automating the design process based on a two-stage model-oriented approach using common tools of modern computational mathematics.

Another task is to develop a generalized mathematical model of a vehicle with hybrid propulsion, including an automatic battery.

For practical use in vehicles with hybrid propulsion, on-board power sources that would satisfy the energy capacity, dimensions, and charging time, operating temperature range, service life, weight and cost are required.

Progress in the automotive industry places ever higher demands on the characteristics of batteries used in vehicles – increased resistance to deep discharges, increased service life. Changes in the design and construction of cars, giving them higher aerodynamic properties, have led to the fact that batteries are now used at higher operating temperatures due to reduced access to cooling air. Therefore, one of the main requirements for batteries has become corrosion resistance under high operating temperatures. On the other hand, consumers require simplified maintenance and increased safety when using batteries.

In carrying out the research on the specified topic, it is planned to use the results of the initiative research work “Development of a hybrid battery” carried out by the authors, based on the results of which a battery design was developed that significantly improves the consumer qualities of the battery, namely maintaining the full capacity of the battery in the cold season and increasing its trouble-free service life.

This is ensured by the fact that additional devices are added inside the battery, consisting of a measuring section with electronic temperature sensors in each container of the battery, an electronic control module, which consists of input analog and discrete devices of the microcontroller, the controller itself and output devices connected to the microcontroller, with the help of which regulation is performed proportionally to

the input signals and the prescribed algorithm, performing the functions of collecting information, processing the received information, generating control commands and an actuator, which is a temperature-controlled element, converting incoming commands into control supply currents supplied to the output actuator of the device, performing the functions of maintaining the specified temperature mode of operation of the battery.

**Conclusions**

The research being conducted is of great significance and opens up the possibility of designing new highly efficient transport vehicles with improved performance indicators. The results obtained during this study can be used to create an environmentally-friendly transport vehicle that meets the needs of customers and the market.

Moreover, the creation of a vehicle with hybrid propulsion will expand the functionality of transport and give it new capabilities. Scientific research on this topic is of utmost importance and needs to be accelerated.

**Funding**

The study was carried out within the framework of grant funding for fundamental and applied scientific research on scientific and (or) scientific and technical projects for 2025-2027 under project AP26104617 “Research and development of a vehicle with an automatic battery combined propulsion”, funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

REFERENCES

1 **Alexandrov, I. A.** Main trends in the development of the world automotive industry in modern conditions // New Perspective. International Scientific Bulletin. – № 4 – 2016. – P. 327–340.

2 **Moshkov, V. B., Ovchinnikov, V. V., Barannik, A. Yu. et al.** Preconditions and trends in the development of electric vehicles // Technologies of Civil Security. Vol. 18 – № 2(68) – 2021. – P. 14–19.

3 **Karamyan, O. Yu., Chebanov, K. A., Solovyova, Zh. A.** Electric Vehicle and Prospects for Its Development // Journal ‘Fundamental Research’. – 2015. – № 12 (Part 4) – P. 693–696.

4 **Sidorov, K. M.** Energy and fuel efficiency of cars with hybrid powertrains. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Specialty : 05.09.03 – «Electrical Engineering Complexes and Systems». – M. – 2010.

5 **Sosin, D. A., Yakovlev, V. F.** The Latest Automotive Electronic Systems. – Moscow: SOLON-Press, 2005. – 240 p.: ill. – (Library of the Student series). A textbook for automotive repair specialists, students, and university and college instructors.

6 **Matzkerle, Yu.** Modern Economical Car / Yu. Matzkerle; translated from Czech by V. B. Ivanov; edited by A. R. Benediktov. – M. : Machine Engineering, 1987. – P. 320.

7 **Yutt, V. E.** Electric vehicles and vehicles with combined power units. Calculation of speed characteristics: textbook / V. E. Yutt, V. I. Strogonov. – M. : MADI, 2016. – P. 108.

8 **Lomakin, V. V., Karpukhin, K. E., Kondrashov, V. N.** Trends in Automotive Industry Development: study guide. Moscow: MAMI – 2008.

9 **Bakhmutov, S. V., Karunin, A. L., Krutashov, A. V., Lomakin, V. V.** Hybrid Powertrain Vehicles. A textbook for universities M.: MGTU «MAMI», 2009. – P. 136.

10 **Shabanov A. V. Shabanov A. A.** Hybrid cars and a new stage of environmental safety in the improvement of automotive power unit design. – Moscow: Moscow State University of Railway Engineering. Bulletin of Moscow State University of Railway Engineering – 2012. – № 3 (series «Machine Engineering»).

11 **Abishev, K. K., Orazaliev, B. T., Olzhatay, M. Zh., Sarsenkyzy, A.** Some issues of improving the technical characteristics of an electric vehicle // Bulletin of KazATK – № 2(97) – 2016. – P. 38–43.

12 **Abishev, K. K., Kassenov A. Zh., Yessaulkov, V. S., Kokin, S. B., Rakisheva, A. A.** Some Issues Regarding the Enhancement of Technical and Economic Performance of Electric Vehicles // Proceedings of the 10th International Conference Industrial Engineering (ICIE 2024) – P. 682–691.

Received 07.08.25.
Received in revised form 11.08.25.
Accepted for publication 14.08.25.

***А. А. Ракишева[1], С. Б. Кокин[2], В. С. Есаулков[3],***
***П. Бухнер[4], *К. К. Абишев[5]***
[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2,3,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[2,5]Қазақстан ғылым және технологиялар институты,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[4]Прага қаласындағы Чехия техникалық университеті,
Чехия Республикасы, Прага қ.
07.08.25 ж. баспаға түсті.
11.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
14.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## АРАЛАС ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫ БАР КӨЛІК ҚҰРАЛДЫ ЖОБАЛАУ МӘСЕЛЕСІ

*Мақалада заманауи экологиялық, экономикалық және технологиялық қиындықтар контекстінде аралас энергетикалық қондырғысы бар көлік құралдарды жобалаудағы өзекті мәселелер қарастырылады. Іштен жану қозғалтқыштар мен электр қондырғылардың артықшылықтарын біріктіретін гибридті көлік құралдарына ерекше назар аударылады. Бұл газ шығындарының төмендеуіне, отынды үнемдеуге және пайдалану тиімділігінің артуына ықпал етеді. Жұмыс экологиялық нормалардың қатаңдауы мен энергия*

*ресурстарының бағасының өсуі жағдайында гибридті көлік құралдарының маңыздылығын компромисс ретінде атап көрсетеді.*

*Гибридті қуат қондырғылары құрастыру ықшамсызбаларының шолуы келтірілген, олардың құрылымдық ерекшеліктеріне, артықшылықтары мен кемшіліктеріне талдау жасалған. Тиімділікті арттыруға, отын шығынын азайтуға және экологиялық нормаларға сәйкестікті қамтамасыз етуге ерекше назар аударылды. Жұмыс әдебиет көздеріне негізделеді және көліктік машина жасауында перспективті бағыт ретінде гибридті технологиялардың маңыздылығын көрсетеді.*

*Мақала Торайғыров университетінің «Көліктік техника және логистика» кафедрасында жүргізілетін аралас энергетикалық қондырғысы бар көлік құралды жобалау және зерттеу жұмысына арналған. Аралас энергетикалық қондырғысы бар көлік құралды жобалау техниканың функцияналдық мүмкіндіктерін кеңейтілуіне ықпал етеді, оның бейімделгіштігін, энергия тиімділігін және экологиялық тазалығын қамтамасыз етеді. Мұндай шешімдер интеллектуалды басқару жүйелерін интеграциялауға мүмкіндік береді, бұл көлік құралдарының әр түрлі пайдалану жағдайларында сенімділігі мен тұрақтылығын арттырады.*

*Кілтті сөздер: көлік құралы, машиналарды жобалау, аккумулятор, аралас энергетикалық қондырғы, гибридті қуат қондырғысы.*

***А. А. Ракишева[1], С. Б. Кокин[2], В. С. Есаулков[3],***
***П. Бухнер[4], *К. К. Абишев[5]***
[1]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[2,3,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[2,5]Казахстанский институт науки и технологий,
Республика Казахстан, г. Павлодар;
[4]Чешский технический университет в Праге,
Чешская Республика, г. Прага.
Поступило в редакцию 07.08.25.
Поступило с исправлениями 11.08.25.
Принято в печать 14.08.25.

## К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

*В статье рассматриваются актуальные вопросы разработки транспортных средств с комбинированной энергетической установкой в контексте современных экологических, экономических и технологических вызовов. Особое внимание уделяется гибридным транспортным средствам, сочетающим преимущества двигателей внутреннего сгорания и электрических установок, что способствует снижению выбросов, экономии топлива и повышению эксплуатационной эффективности. Работа подчеркивает значимость гибридных транспортных средств как компромиссного варианта в условиях ужесточения экологических норм и роста цен на энергоносители.*

*Приведён обзор компоновочных схем гибридных силовых установок – параллельной, последовательной и последовательно-параллельной – с анализом их конструктивных особенностей, достоинств и недостатков. Особое внимание уделено повышению эффективности, снижению расхода топлива и соответствию экологическим нормам. Работа опирается на литературные источники и демонстрирует значимость гибридных технологий как перспективного направления в транспортном машиностроении.*

*Статья посвящена разработке и исследованию транспортного средства с комбинированной энергетической установкой, проводимом на кафедре «Транспортная техника и логистика» НАО «Торайгыров университет». Разработка транспортного средства с комбинированной энергетической установкой способствует расширению функциональных возможностей техники, обеспечивая её адаптивность, энергоэффективность и экологичность. Такие решения позволяют интегрировать интеллектуальные системы управления, что повышает надёжность и устойчивость транспортных средств в различных условиях эксплуатации.*

*Ключевые слова: транспортное средство, проектирование машин, аккумулятор, комбинированная энергетическая установка, гибридная силовая установка.*

ҒТАМР 73.31.17

https://doi.org/10.48081/VCKM7944

***Н. С. Сауханов[1], *М. Б. Имагамбетов[2], Г. М. Ордабаева[3], Б. У. Жаманбаев[4], Н. М. Мырзабеков[5]***

[1,2,3]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[4,5]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7292-4752
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7070-6523
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4262-2812
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-9540
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4845-8614
*e-mail: imagambetov.m.b@mail.ru

# *РЕТТЕЛЕТІН ҚИЫЛЫСТА АДАПТИВТІ БАСҚАРУ МАКЕТІ*

*Мақалада қаланың көше-жол торабында орын алатын көлік ағынының өзгерісіне байланысты реттелетін қиылыстарда бағдаршамның белгі беру өзгерісін талдау әдістемесі қарастырылады. Көше-жол торабының әртүрлі қиылыстарындағы тәуліктің қарбалас уақыттарында өзгеріп отыратын көлік ағынының қарқындылығы ескерілмеген жағдайда, бағдаршам белгілерінің локалды жұмысы салдарынан қиылыстарда көлік іркілістері, ауаның ластануы арта түседі. Көліктер кептелісінің пайда болуы жол торабының өткізу қабілетінің төмендеуін, көліктердің тоқтап қалуының және жол көлік оқиғалары санының көбеюін тудырады. Осы мақсатта мақалада Ақтөбе қаласының көлік қарқындылығы жоғары, қиылысқа кездейсоқ келетін көлік ағынының бағдаршам белгі беру ерекшелігіне байланысты, бірінші уақытта бас жол саналатын Ә. Молдағұлова даңғылында Arduino микроконтроллерінде бағдарлама құрастыру макеті қарастырылды. Қарбалас уақыттарда көлік детекторынан түсетін көлік ағынының қарқындылығы туралы ақпараттар бойынша бағдаршам белгілеріне берілетін адаптивті басқару арқылы бағдаршам белгілерінің жұмысы, ақпараттар беру, қиылыстың өткізу қабілеті мүмкіндігін арттыруға, қиылыс алдындағы шират пен соның әсерінен туындайтын экологиялық жағдайларды азайтуға болады. Сонымен қатар, көлік детекторынан түсетін ақпараттарға бағдаршам контроллері икемді болуы керек, себебі, тәуліктегі қарбалас және басқа уақыттарда көлік ағынының қарқындылығы бірдей емес.*

*Кілтті сөздер: көлік ағындары, бағдаршам белгілері, Arduino, қатысу детекторлары, үзілісті іздестіру, қиылыс макеті.*

**Кіріспе**

Барлық елдерде зияткерлік көлік жүйесін біріктіру бойынша бірінші қадам жүйенің әртүрлі компоненттеріне логикалық және функционалдық талаптарды жүйелеу негізіндегі функционалдық деңгейде жүзеге асырылады.

Зияткерлек көлік жүйесінің орталық қосалқы жүйелерінің бірі жол қозғалысын басқарудың ішкі жүйесі, ол көлік ағынының сипаттамалары туралы мәліметтерді жинау мен өңдеу, жол қозғалысын басқару, жол торабы қосалқы жүйелерімен әрекеттесу кезіндегі жол-көлік оқиғаларын табу, басқа қосалқы жүйелерді қамтамасыз ету болып табылады.

**Материалдар мен әдістер**

Қаладағы Ә.Молдағұлова даңғылы мен Ағайынды Жұбановтар көшесінің қиылысында көлік ағыны қарқындылығының бағдаршам белгісінің негізгі тактысымен сәйкес келмеуіне байланысты көліктер іркілісіне жол беріліп келеді.

Төменде үш түрлі уақыт аралығындағы көлік қозғалысының төрт бағыты бойынша өзгерісі көрсетілген (1-кесте):

1-кесте – Әр бағыт бойынша көлік ағынының тәуліктік қарқындылығының өзгерісі

| **Бағыт** | **Таңертең (08:00–09:00)** | **Күндіз (12:00–13:00)** | **Кешкі (17:00–18:00)** | **Қорытынды** |
|---|---|---|---|---|
| Ә. Молдағұлова → Обл. ЖПБ | 1300 авт/сағ | 950 авт/сағ | 1100 авт/сағ | Таңертең белсенді, күндіз азаяды, кешке қалпына келеді |
| Ә. Молдағұлова → Әбілқайыр хан | 1100 авт/сағ | 1200 авт/сағ (шамамен) | 1300 авт/сағ | Тұрақты өсім, кешке шығу бағыты ретінде қолданылуы мүмкін |
| Аға. Жұбановтар → Университет | 1100 авт/сағ | 1500 авт/сағ (шамамен) | 1800 авт/сағ | Ең жоғары жүктеме кешке, басымдық қажет |
| Аға. Жұбановтар → 8 ш.ауданы | 950 авт/сағ | 1000 авт/сағ | 1050 авт/сағ | Тұрақты, екінші деңгейлі бағыт |

Жалпы қорытындылар:

1 Кешке қарай ең жүктелген бағыт – Жұбанов → Университет.

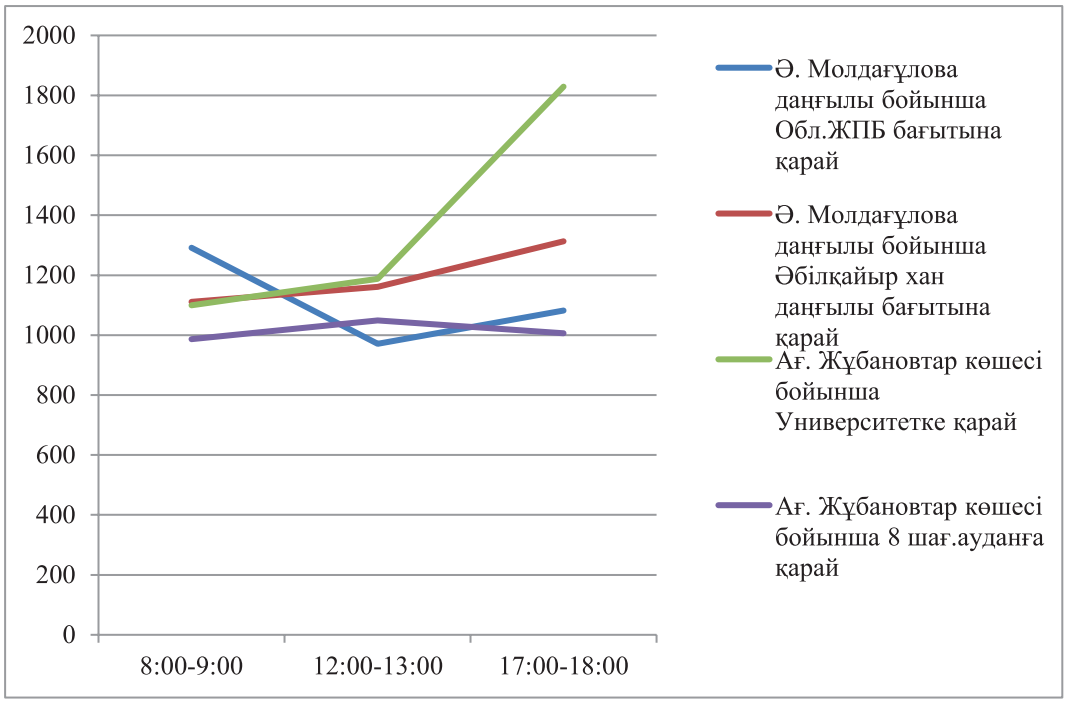
2 Молдағұлова → Облыстық ЖПБ – типтік «таңғы пик» бағыты.

3 Бағдаршам фазаларын уақытқа байланысты бейімдеп қайта бөлу ұсынылады:

Таңертең – Молдағұлова → Облыстық ЖПБ бағытына басымдық.

– Күндіз – теңгерілген режим.

– Кешке – Жұбанов → Университет бағытына басымдық




1-сурет – Әр бағыттағы көлік ағынының тәуліктік өзгерісі (график)

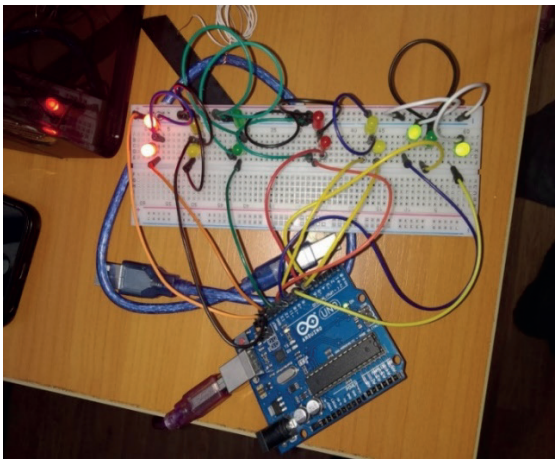
1-суретте келтірілген график көлік ағынының уақыт аралығындағы өзгерісін көрнекі түрде бейнелейді. Бұл бейнелеу таңертең, күндіз және кешкі мезгілдерде көлік жүктемесінің қалай өзгеретінін көрсетеді және бағдаршам сигналдарын бейімдеу қажеттілігін нақты негіздейді.

Осы байқаулар көрсеткендей, тәуліктің әртүрлі уақытында көлік ағынының өзгерісі бағдаршам фазаларының тұрақты реттілігімен сәйкес келмейді. Бұл жағдайды реттеу үшін бағдаршам белгілерінің ұзақтығын көлік ағынының қарқындылығына икемдеу қажеттілігі туындайды. Бұл тұрғыда көлік ағынының өзгеруін ескеретін теориялық басқару принциптері келесі абзацта сипатталады.

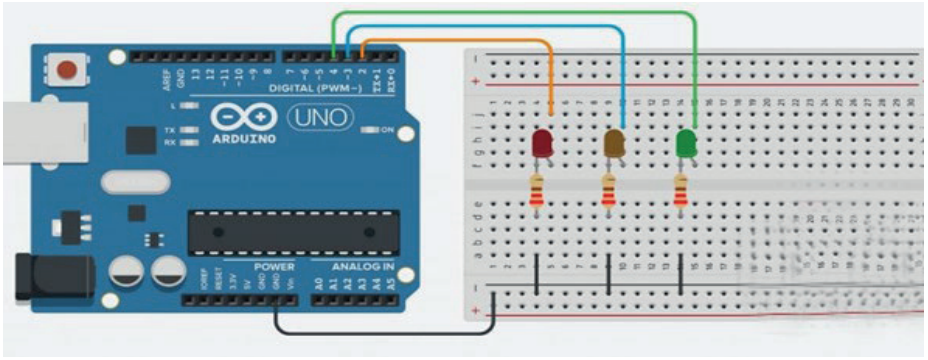
Бақылауға алынған үздіксіз қозғалысты өзгерту цикл ұзақтығы өзгерісіне сәйкес болуы тиіс. Олай болмаған жағдайда көліктің іркілісі ұлғая түседі. Көп бағдарламалық қатаң басқару көлік іркілісін төмендетуге ықпал еткенмен, тиімді болып есептелмейді, өйткені ол қиылысқа келген автокөлік санын ескере алмайды. Басқару көрсеткіші тәуліктік қарқындылықтың өзгеруін (автокөліктердің кездейсоқ қиылысқа келуін) ескеруі тиіс [2]. Бұл қағидалар тәжірибе жүзінде жүзеге асырылуы үшін нақты көлік ағынының көрсеткіштерін анықтайтын сенсорлық құрылғылар қажет.

**Нәтижелер және талқылау**

Қиылыстағы бағдаршам макетінің жұмысын модельдендіру үшін Arduino робот техникасы құрастырылды (2, а - сурет), жарықдиодтарды Arduino платасына жалғау сұлбасы (2, б - сурет) көрсетілген [3].



а)




б)

2-сурет – Бағдаршам макеті және оның қосылу сұлбасы:
а) Arduino платасында бағдарлама құрастыру кезеңі;
б) Жарықдиодтарды Arduino платасына жалғау сұлбасы

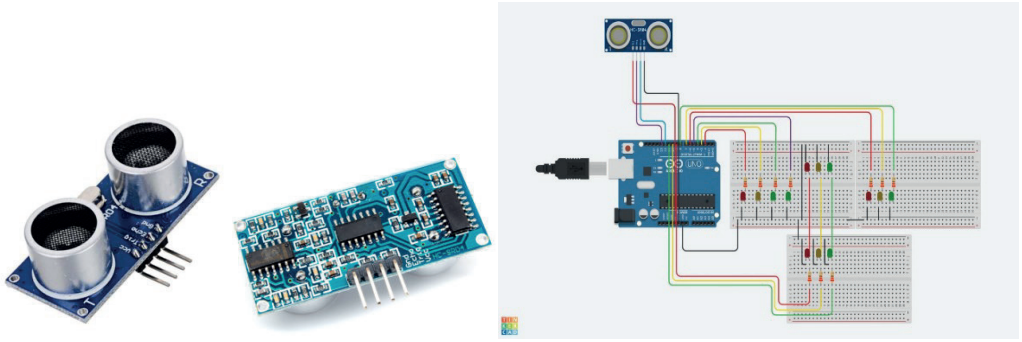
Макетті іске қосу мақсатында көлік ағынына жауап беретін басқару алгоритмі құрылды. Бұл алгоритм бағдаршамның жұмыс фазаларын нақты уақыт режимінде реттеуге мүмкіндік береді.

Плата USB-портпен компьютерге жалғанып IDE интегралды өңдеу ортасы арқылы Arduino платасын бағдарламалық алгоритммен қиылыстағы бағдаршамдар үшін бағдарламалар жазылды.

Бұл көлік ағынымен байланысты адаптивті басқаруды пайдаланған кезде басқару ықтимал болып саналады. Қиылыс аумағында орналасқан көліктердің қатысу детекторлары жол контроллерін ағынның көрсеткіштері туралы үздіксіз ақпаратпен қамтамасыз етеді (3-сурет).

Arduino HC-SR04 UNO (R3 микроконтроллерімен) қатысу детекторы байланыссыз типті құрылғы болып табылады және жоғары дәлдікпен өлшеу мен тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Оның өлшеу диапазоны 2-ден 400 см-ге дейін.

Оның жұмысына электромагниттік сәулелену және күн энергиясы айтарлықтай әсер етпейді. HC SR04 Arduino бар модуль жинағы сонымен қатар қабылдағыш пен таратқышты қамтиды (3-сурет).



3-сурет – HC-SR04 UNO қатысу детекторын
Arduino платасына жалғау сұлбасы

Ақпаратты анықтап, өңдеу тәсілі адаптивті басқарудың алгоритмі, осы реттеу циклындағы қиылыс жағдайы туралы ақпарат беретін бағдаршам белгілерінің қосылуын қарастыратын алгоритм. Алгоритмнің техникалық жүзеге асырылуы өте қарапайым, сондықтан оның кейбір түрлері кең қолданысқа ие болады. Оған төмендегі алгоритмдер жатады: көлік ағынында үзілісті іздестіретін алгоритм (ағын үзілісін анықтайтын уақыт рұқсат ету белгісінің минималды және максималды ұзақтығы). Белгі белгілі бір уақыт аралығында қиылысқа келетін автокөлік ағынын ескере отырып, рұқсат ету белгісінен тоқтау белгісіне ауысып отырады. Мұндай болмаған жағдайда рұқсат ету белгісінің ұзақтығы интервал ұзақтығына сәйкес болуы тиіс.

Осы мақсатта Ә. Молдағұлова даңғылы мен Ағайынды Жұбановтар көшесінің қиылысында адаптивті басқаруды ұйымдастыруға макет жасалды. Макетте осы мақсатта Arduino робот техникасының үзілісті іздестіру алгоритмі үшін қатысу детекторлары жолдың екі жағына орналастырылып микропроцессорға жалғанды.

Arduino платасына бағдаршамдарың жұмыс істеу алгоритмі бағдарлама ретінде жазылған. Бағдаршам белгілерінің қосылу алгоритмі төмендегі 2-кестеде берілген [4,5,6].

Кептелістер жоқ кезде, бағдаршам белгілерінің қосылып-сөнілу алгоритмі.

2-кесте – Бағдаршам белгілерінің қосылу алгоритмі

| Бағдаршамдар статусы | A1 | A1_Plus | A2 | ZH | Келесі статусқа көшу уақытының минималды интервалы (мс) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | 14000 |
| 1 | | | | | 2000 |
| 2 | | | | | 1000 |
| 3 | | | | | 6000 |
| 4 | | | | | 2000 |
| 5 | | | | | 7000 |
| 6 | | | | | 2000 |
| 7 | | | | | 1000 |
| 8 | | | | | 0 |

Бағдарлама статус 8-ден статус 0-ге көшіп, алгоритм орындалуын жалғастырады. Кестеде келтірілгендей, бағдаршам фазалары алдын ала берілген уақыт интервалдарына сәйкес өзгереді. Егер HC-SR04 UNO детекторы белгіленген шекке дейін көлік бар екенін анықтаса, бағдарлама кептелісті өңдейтін арнайы алгоритмге көшеді (3-кесте).

Бағдаршамдар статусы 0, 1, 2, 3, 4 кезінде, HC-SR04 UNO қатысу детекторы, қиылысқа келген көлік ағынындағы көлікке дейінгі қашықтықты қосымша өлшейді. Егер белгілі уақыт аралығында бұл қашықтық белгіленген қашықтықтан кем болса, жолда кептеліс туралы сигнал береді. Кептелісті азайту үшін, бағдарлама бағдаршамның арнайы қосылу алгоритмін жүргізеді.

3-кесте – Бағдаршамның арнайы қосылу алгоритмі

| Бағдаршамдар статусы | A1 | A1_Plus | A2 | ZH | Келесі статусқа көшу уақытының минималды интервалы (мс) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | 2000 |
| 1 | | | | | 1000 |
| 2 | | | | | 2000 |
| 3 | |  | | | 7000 |

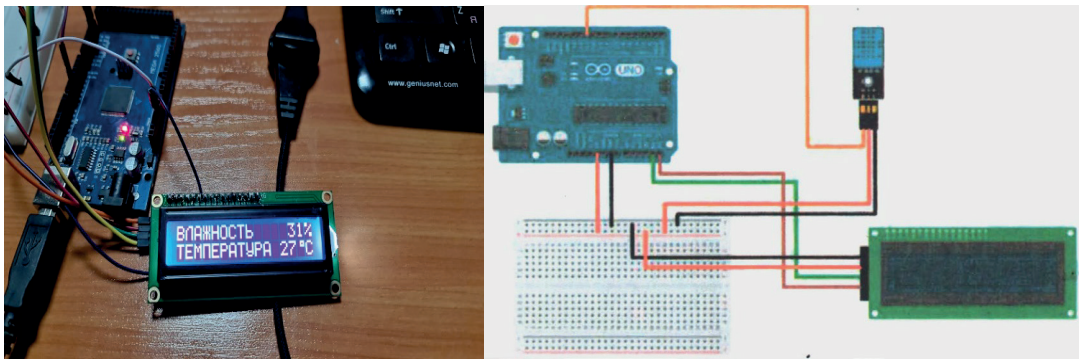
Бағдарлама статус 3-тен 2-ші кестедегі статус 6-ға көшіп, бірінші алгоритм орындалуын жалғастырады.

– сары және қызыл бағдаршамдардың сигналдарының қосылуын білдіреді.

– жасыл бағдаршам сигналының жыпылықтауын білдіреді.

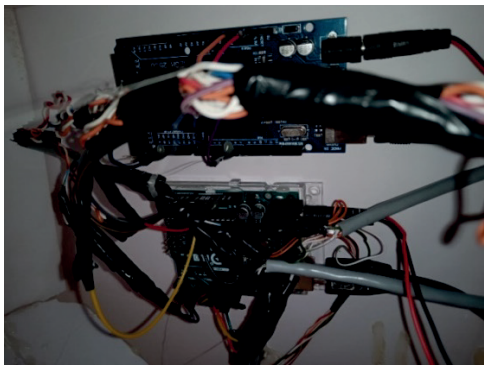
Макетке жүргізушілердің қозғалыс кезінде қауіпсіздігі мен толыққанды жұмысын қамтамасыз ету үшін Arduino микроконтроллеріне ылғалдылық пен ауа температурасын көрсететін DHT11 датчигі және LCD дисплейді (LCD дисплей – ақпаратты көрнекі түрде көрсетуге арналған сұйық кристалдарға негізделген

электрондық құрылғы) іске қосу қарастырылды (4-сурет) [7]. 4-суретте DHT11 датчигі және LCD дисплейдің қосылу құрылымы айқын көрінеді.




4-сурет – Ылғалдылық пен ауа температурасын көрсететін DHT11датчигі мен LCD дисплейді Arduino платасына жалғау сұлбасы

Яғни, макетте қолданылып отырған жабдықтар өздерінің атқаратын жұмыстарына байланысты жеке-жеке Arduino платаларына жалғанып, жұмыс бағдарламаларымен қамтамасыз етілді (5-сурет).



5-сурет – Макеттегі жабдықтардың Arduino платаларына қосылуы

Жалпы осы Arduino жабдықтары қосылып жұмыс істеп тұрған реттелетін Ә. Молдағұлова даңғылы – Ағайынды Жұбановтар көшесінің қиылысының макеті төмендегі суретте бейнеленген (6-сурет).

6-сурет – Қиылыс макеті

Бұл макетті оқу үдерісінде қолданып, білім алушыларға әртүрлі нұсқада көлік ағындарының қарқындылығы, бағдаршамдардың реттеу циклдарының ұзақтығы, экипаж уақыты берілсе, олардың компьютерде бағдарламалар жазуына үлесін қосады.

Ұсынылып отырған макет құрылғысы көше-жол торабының реттелетін қиылысында бағдаршамның көлік ағынының қарқындылығына бейімделу жұмысын қарастырады. Зерттеу жұмысының басты артықшылығы – нақты уақыттағы көлік ағынына жауап беретін арзан әрі техникалық жағынан іске асыруға болатын платформа негізінде адаптивті басқару моделін жасау. HC-SR04 типті байланыссыз детекторлардың қолданылуы және Arduino микроконтроллерімен біріктіру – жүйенің қарапайымдылығы мен оқу үдерісінде тиімділігін көрсетеді.

Ә. Молдағұлова даңғылы – Ағайынды Жұбановтар көшесінің қиылысында жүргізілген нақты зерттеу нәтижелері тәуліктің қарбалас уақыттарындағы көлік ағыны қарқындылығына қарай бағдаршам фазаларын бейімдеудің қажеттілігін айқын көрсетті. Осы қажеттілікке техникалық жағынан мақалада ұсынылып отырған макет жауап бере алды. Сонымен қатар, макетте қосымша DHT11 температура мен ылғалдылық датчигінің қосылуы, LCD дисплей арқылы мәлімет көрсету – жүйенің кеңейтілген мүмкіндіктерін көрсетеді.

Халықаралық ғылыми еңбектерге назар аударайық, мысалы, Gunjal et al. [8] өз зерттеуінде нақты полигондық тәжірибе жүргізбей, тек модельдеу ортасына негізделгенін атап көрсетеді. Бұл біздің жағдайда да өзекті екенін атап өткен жөн: ұсынылып отырған макет нақты қалалық жағдайда сынақтан өткізілмеген. Яғни, макет зертханалық және оқу мақсатында тиімді, бірақ оның практикалық тұрғыда қолданылуы үшін нақты жол қозғалысы мәліметтерін жинақтау мен өңдеуді қажет етеді.

Zhanq et al. [9] MARL (көп агентті машиналық оқыту) негізінде күрделі алгоритмдерді ұсынғанымен, олардың кемшілігі – түсіндірілуі қиын шешімдер мен жоғары есептеу қуатын қажет ететіндігінде. Бұл тұста біздің жүргізген зерттеудің артықшылығы – есептеудің тиімділігі мен қарапайымдылығында. Бірақ, көп жағдайларда бағдаршам фазаларын оңтайландыру алгоритмдері кеңірек көлік

ағынының қозғалыс мәліметтерін қажет етеді, ал біздің жұмыста пайдаланылған алгоритмнің шешім қабылдау диапазоны шектеулі.

Mahajan et al. [10] экологиялық тиімділік мәселесі қозғалған. Бұл біздің жүйеге болашақта қосылуы мүмкін CO2 деңгейін өлшейтін сенсорлар немесе тұрақты қозғалысты экологиялық тұрғыда оңтайландыру бағытында зерттеу қажет екендігін көрсетеді. Ал Donsante [11] адаптивті басқарудың кеңейтілген интеграциясын – қоғамдық көлік, смарт қала жүйелерімен байланысын қарастырады, ал бізде көше-жол торабындағы қиылыста қоғамдық көлікке басымшылдық қарастырылмағандықтан, жүйе көлік құралдарының барлық түрлеріне жұмыс істейді.

Қорыта келгенде, зерттеу жұмысы қарапайым әрі нақты нәтижеге бағытталған, оқу тәжірибелік тұрғыдан құнды жоба болып табылады. Ол толыққанды зияткерлік көлік жүйесіне бастама ретінде қаралуы мүмкін. Болашақ зерттеулерде нақты деректермен байытылған, смарт инфрақұрылыммен байланысқан кеңейтілген нұсқасын жасауға болады. Сонымен қатар, экологиялық және әлеуметтік әсер көрсеткіштерін де қосу маңызды бағыт болмақ.

**Қорытынды**

Локалды қиылыстарда қозғалысты басқару көрсеткіштерін есептеу блогі, яғни бағдаршам объектілері жұмысының әртүрлі көрсеткіштері кезінде көлік ағынының жүріс-тұрысын толық зерттейтін, математикалық баға мен критерийлер көмегімен осы эксперименттің тиімділігін бағалау және зерттелетін қиылыстың оптималды жұмыс режимі туралы шешім шығару имитациялық эксперимент жүргізуге мүмкіндік береді.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Сауханов, Н. С.** Жол қозғалысын басқару әдістері: Оқу құралы. – Ақтөбе. : «ПринтА» баспаханасы, 2020. – 440 б.

2 **Кременец, Ю. А., Печерский, М. П., Афанасьев, М. Б.** Технические средства организации дорожного движения: Учеб. для вузов. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.

3 Быстрый старт. Первые шаги по освоению Arduino. – Maxkit.ru, 2023 ж., 80 с.

4 Изучаем Python. – М.: Эрик, 2017. – 496 с.

5 Python & Arduino. Просто, быстро и красиво, AviPaperno11 мар 019, дереккөз: Python & Arduino. Просто, быстро и красиво / Хабр. – [Электронды ресурс]. – https://habr.com/ru/articles/443326/

6 Как связать Arduino и Python, cervelo-russia.ru, 14.10.2023, [Электронды ресурс]. – https://cervelo-russia.ru/kak-svyazat-arduino-i-python

7 Arduino With Python: Getting Started, Christopher Bailey, дереккөз: [Электронды ресурс]. – https://realpython.com/courses/arduino-python/

8 **Gunjal, S. S., Satpute, K. A., Lanke, S. S., Jagdale, S. S.** Modeling and simulation of adaptive traffic control systems: electrical engineering techniques for

urban applications // International Journal of Electrical Power System and Technology (UK). – 2024. – Vol. 10. – № 2. – P. 1–8.

9 **Zhang, Y., Zheng, G., Liu, Z., Li, Q., Zeng, H.** MARLens: understanding multi-agent reinforcement learning for traffic signal control via visual analytics [Electronic resource] // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (USA). – 2024. – https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3392587. – [Электронды ресурс]. – URL: https://arxiv.org/pdf/2410.01364

10 **Mahajan, N., Rai, N., Srivastava, A., Yadav, A.** Optimizing smart cities traffic flow for the carbon emission control through modern technologies [Electronic resource] // 2024 International Conference on Signal Processing and Advance Research in Computing (SPARC-2024) (IEEE, USA). – 2024. – https://doi.org/10.1109/sparc61891.2024.10828884. – [Электронды ресурс]. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10828884/

11 **Donsante, M.** Model predictive control of cyber-physical systems: дис. … PhD (Doctor of Philosophy) / M. Donsante. – Italy, 2024. – [Электронды ресурс]. – URL: https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/155024

REFERENCES

1 **Saukhanov, N. S.** Zhol kozgalycyn baskaru adisteri [Traffic management methods] [Text]. – Aktobe : PrintA Publishing, 2020. – 440 p.

2 **Kremenets, Yu. A., Pecherskii, M. P., & Afanasyev, M. B.** Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya: ucheb. dlya vuzov [Technical means of traffic management: a textbook for universities] [Text]. – Moscow : IKTs Akademkniga, 2005. – 279 p.

3 Bystryi start. Pervye shagi po osvoeniyu Arduino [Quick Start: First Steps to Mastering Arduino] [Text]. – Maxkit.ru, 2023. – 80 p.

4 Izuchaem Python. [Learning Python] [Text]. – Moscow : Erik, 2017. – 496 p.

5 **Paperno, A.** Python & Arduino: Prosto, bystro i krasivo [Python & Arduino: Simple, Fast and Beautiful] [Text]. – Habr, 2019. – Retrieved from: [Electronic resource]. – https://habr.com/ru/articles/443326/

6 Kak svyazat' Arduino i Python. [How to connect Arduino and Python] [Text]. – cervelo-russia.ru, 2023. – Retrieved from: [Electronic resource]. – https://cervelo-russia.ru/kak-svyazat-arduino-i-python

7 **Bailey, C.** Arduino with Python: Getting Started [Text]. – RealPython. – Retrieved from: [Electronic resource]. – https://realpython.com/courses/arduino-python/

8 **Gunjal, S. S., Satpute, K. A., Lanke, S. S., Jagdale, S. S.** Modeling and simulation of adaptive traffic control systems: electrical engineering techniques for urban applications [Electronic resource] // International Journal of Electrical Power System and Technology (UK). – 2024. – Vol. 10. – № 2. – P. 1–8.

9 **Zhang, Y., Zheng, G., Liu, Z., Li, Q., Zeng, H.** MARLens: understanding multi-agent reinforcement learning for traffic signal control via visual analytics // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (USA). — 2024. — https://doi.

org/10.1109/TVCG.2024.3392587. – [Electronic resource]. – URL: https://arxiv.org/pdf/2410.01364.

10 **Mahajan, N., Rai, N., Srivastava, A., Yadav, A.** Optimizing smart cities traffic flow for the carbon emission control through modern technologies [Electronic resource] // 2024 International Conference on Signal Processing and Advance Research in Computing (SPARC-2024) (IEEE, USA). – 2024. – https://doi.org/10.1109/sparc61891.2024.10828884. – [Electronic resource]. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10828884/

11 **Donsante, M.** Model predictive control of cyber-physical systems: PhD dissertation / M. Donsante. – Italy, 2024. – [Electronic resource]. – URL: https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/155024

24.04.25 ж. баспаға түсті.
20.06.25 ж. түзетулерімен түсті.
02.07.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Н. С. Сауханов[1], *М. Б. Имагамбетов[2], Г. М. Ордабаева[3], Б. У. Жаманбаев[4], Н. М. Мырзабеков[5]***

[1,2,3]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республики Казахстан, г. Актобе;

[4,5]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 24.04.25.
Поступило с исправлениями 20.06.25.
Принято в печать 20.07.25.

## МАКЕТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА РЕГУЛИРУЕМОМ ПЕРЕКРЕСТКЕ

*В статье рассматривается методика анализа изменения сигнализации светофора на регулируемых перекрестках в связи с изменением транспортного потока, происходящим на улично-дорожной сети города. Если не учитывать интенсивность транспортного потока на различных перекрестках улично-дорожной сети, которая меняется в часы пик в течение дня, то заторы и загрязнение воздуха на перекрестках возрастут из-за локальной работы светофоров. Возникновение транспортных заторов приводит к снижению пропускной способности транспортных развязок, увеличению количества остановок транспортных средств и дорожно-транспортных происшествий. С этой целью в статье рассмотрен макет сборки программы на микроконтроллере Arduino на проспекте А. Молдагуловой, который в первое время является главной дорогой, в связи со спецификой светофорной сигнализации транспортного потока на перекрестке с высокой транспортной интенсивностью города Актобе. Адаптивное управление, передаваемое на светофорные знаки по информации об интенсивности транспортного потока, поступающего от детектора транспорта в час пик, позволяет повысить*

*пропускную способность светофорных знаков, передачу информации, уменьшить экологические условия, возникающие перед перекрестком и под его влиянием. Кроме того, для информации, поступающей от детектора транспортного средства, контроллер светофора должен быть гибким, поскольку интенсивность транспортного потока не одинакова в час пик и в другое время дня.*

*Ключевые слова: транспортные потоки, сигналы светофора, Arduino, детекторы присутствия, поиск разрыва, макет перекрестка.*

***N. S. Saukhanov[1], *M. B. Imagambetov[2], G. M. Ordabeva[3], B. U. Zhamanbayev[4], N. M. Myrzabekov[5]***

[1,2,3]Aktobe Reqional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[4,5]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 24.04.25.
Received in revised form 20.06.25.
Accepted for publication 02.07.25.

## ADAPTIVE TRAFFIC CONTROL MODEL AT A SIGNALIZED INTERSECTION

*The article examines a methodology for analyzing the change in traffic signal timing at regulated intersections, in relation to changes in traffic flow occurring on the city's street network. If the intensity of traffic flow at various intersections of the street network, which fluctuates during peak hours throughout the day, is not taken into account, traffic congestion and air pollution at the intersections will increase due to the localized operation of traffic lights. The occurrence of traffic jams leads to a decrease in the capacity of transport interchanges, an increase in the number of vehicle stops, and road accidents. To address this, the article presents a prototype of a program assembly on an Arduino microcontroller for A. Moldagulova Avenue, which is initially the main road due to the specifics of the traffic signal system at an intersection with high traffic intensity in the city of Aktobe. Adaptive control, transmitted to the traffic lights based on information about traffic flow intensity received from a vehicle detector during peak hours, allows for increased capacity of the traffic lights, improved information transmission, and a reduction in environmental conditions occurring before and under the influence of the intersection. Furthermore, for the information received from the vehicle detector, the traffic light controller must be flexible, as traffic flow intensity is not the same during peak hours as it is at other times of the day.*

*Keywords: traffic flows, traffic signals, Arduino, presence detectors, gap search, crossroad layout.*

ҒТАМР 73.29.81

https://doi.org/10.48081/SNNU8152

***Н. Т. Тулепбек[1], А. О. Оралбекова[2], Б. С. Ахметов[3]***
[1]Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті мекемесі,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3600-4255
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4030-0740
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5622-2233
*e-mail: tntalmaty0503@gmail.com

# *ТЕМІР ЖОЛ КӨЛІГІНДЕГІ МАРШАЛ СТАНЦИЯЛАРЫН БАСҚАРУДЫ КОМПЬЮТЕРЛЕНДІРУ*

*Мақалада сұрыптау станцияларын автоматтандырудың қазіргі жағдайы мен даму тенденциялары, оның ішінде олардың тиімділігіне әсер ететін негізгі технологиялық және ұйымдастырушылық аспектілері талданады. Шешімдердің сәйкес келмеуі, ақпараттық жүйелердің жеткіліксіз интеграциясы, жабдықтың тозуы және процестерді синхрондау үлгілерінің жоқтығы сияқты негізгі проблемалар анықталды. Автоматтандырылған жүйелерді жобалаудың орталықтандырылған архитектурадан бөлінген және интеллектуалдандыруға дейінгі тәсілдер эволюциясы қарастырылады, бұл технологиялық процестердің күрделене түсуіне және де ақпарат көлемінің ұлғаюына бейімделуге көмектеседі. Басқару дәлдігін арттыру және ресурстарды оңтайландыру үшін интеллектуалды технологиялардың маңыздылығы қарастырылып және атап өтілді. Бұл шешімдер (вагондардың жылдамдығын реттеу және бағыттама бұрмаларын бақылау), олардың қарапайымдылығына қарамастан, автоматтандыру технологияларын одан әрі дамытуға негіз болды. 1970–1980 жылдар аралығында есептеу техникасының дамуымен сұрыптау процестерін орталықтандырылған басқаруды қамтамасыз ететін автоматтандырылған басқару жүйелері ( әрі қарай АБЖ) пайда болды. Осы кезеңде басты назар тежегішті басқару және вагон қозғалысын басқару сияқты жеке функцияларды автоматтандыруға аударылды. Дегенмен, орталықтандырылған жүйелер жеткіліксіз икемділікке, ақауларға төзімділікке және үлкен көлемдегі деректерді өңдеуге шектеулі мүмкіндіктерге байланысты айтарлықтай шектеулерге ие болды.*

*Кілтті сөздер: автоматтандыру, сұрыптау станциялары, тиімділік, интеграция, ақпаратты технологиялар, интеллектуалды технологиялар.*

**Кіріспе**

Сұрыптау станцияларын (СұрСт) автоматтандыру тарихы 20 ғасырдың ортасынан басталады, ол кезде темір жол көлігінің (ТЖК) дамуымен сұрыптау процестерінің өнімділігі мен сенімділігін арттыру қажеттілігі арта түсті [1, 7–14-бб.]Автоматтандырудың алғашқы әрекеттері вагондардың жылдамдығын реттеу және бұрмаларды басқару сияқты жеке технологиялық операцияларды

басқару үшін механикалық және электрлік құрылғыларды енгізуге бағытталған. Бұл шешімдер өздерінің қарабайырлығына қарамастан, автоматтандыру технологияларының одан әрі дамуына негіз болды. 1970–1980 жылдары есептеуіш техниканың дамуымен сұрыптау процестерін орталықтандырылған басқаруды қамтамасыз ететін автоматтандырылған басқару жүйелері (АБЖ) пайда болды. Бұл кезеңде тежегіштерді басқару және автомобильдердің қозғалысын бақылау сияқты жеке функцияларды автоматтандыруға басты назар аударылды. Дегенмен, орталықтандырылған жүйелер жеткіліксіз икемділікке, ақауларға төзімділікке және үлкен көлемдегі деректерді өңдеуге шектеулі мүмкіндіктерге байланысты айтарлықтай шектеулерге ие болды. 20 ғасырдың аяғынан бастап көптеген есептеу түйіндерінің өзара әрекеттесуіне негізделген автоматтандыру жүйелеріне көшу басталды. Бұл жүйелер басқаруды орталықсыздандыруды қамтамасыз етті, ақауларға төзімділікті арттырды және вагон ағынын болжау және жабдықтың жағдайын бақылау сияқты жаңа функцияларды біріктіруге мүмкіндік берді. Сонымен қатар технологиялық процестерді оңтайландыру үшін деректерді талдау алгоритмдерін қолдана отырып, интеллектуалды жүйелердің алғашқы элементтері белсенді түрде енгізіле бастады. СұрСт автоматикасының қазіргі даму кезеңі цифрландыру технологияларын енгізумен сипатталады. Бұл кезеңнің негізгі ерекшеліктерінің бірі деректерді орталықтандырылған сақтау мен өңдеуге мүмкіндік беретін, нақты уақыт режимінде оларға қол жеткізуді қамтамасыз ететін бұлтты технологияларды пайдалану болып табылады, бұл әртүрлі ішкі жүйелер арасында операциялық синхрондау қажет болатын таратылған жүйелерді басқару үшін өте маңызды. Үлкен деректер зауыттың жұмысы туралы тарихи және ағымдағы деректерді талдау үшін пайдаланылады, бұл кедергілерді анықтауға, жүктемелерді болжауға және ресурстарды оңтайландыруға мүмкіндік береді. Интернет заттары (IoT) инфрақұрылым объектілері мен жылжымалы құрамда орнатылған сенсорлар мен құрылғылардан мәліметтерді жинауды қамтамасыз етеді, бұл шешім қабылдаудың дәлдігі мен жылдамдығын айтарлықтай арттырады. Заманауи автоматтандыру жүйелерінің ерекшелігі олардың тұтынушылармен (жөнелтушілер мен жүк алушылар) өзара әрекеттесуді жақсартуға бағытталғанын ескеруде. Клиенттік жүйелерді сұрыптау станцияларын автоматтандырылған басқару жүйесімен интеграциялау вагондардың орналасқан жері, жүктің жағдайы және жұмыс уақыты туралы деректерге жедел қол жеткізуді қамтамасыз ететін ақпарат алмасу процесін автоматтандыруға мүмкіндік береді. Мұндай мүмкіндіктер логистикалық процестердің ашықтығы мен тұтынушылардың қанағаттану деңгейін арттырады, сондай-ақ темір жолдың бәсекеге қабілеттілігін арттыруға ықпал етеді.

Зерттеудің мақсаты. Сұрыптау станцияларын автоматтандырудың ағымдағы жай-күйі мен даму үрдістерін талдау, сұрыптау станциясы ТП АБЖ үшін технологияларды интеграциялаудағы негізгі проблемалар мен сын-тегеуріндерді анықтау, сондай-ақ зияткерлік технологияларды пайдалануды және архитектуралардың эволюциясын ескере отырып, автоматты басқару жүйелерінің жұмыс тиімділігін арттыру үшін тәсілдерді әзірлеу.

**Материалдар мен әдістер**

Көлік саласын, әсіресе теміржол көлігін (бұдан әрі – ТЖК) қоса алғанда, Қазақстан Республикасының (бұдан әрі – ҚР) қазіргі заманғы экономикасының қалыптасу жағдайында ақпараттық технологиялар (бұдан әрі – АТ) және ақпараттық жүйелер (бұдан әрі – АЖ) саласында елеулі өзгерістер орын алуда [1, 7–14-бб.] Бұл өзгерістер басқарудың тиімділігін арттыруға және ҚР көлік инфрақұрылымының тұрақты дамуын қамтамасыз етуге бағытталған. Атап айтқанда, Қазақстанның 2030 жылға дейінгі көліктік–логистикалық әлеуетін дамыту тұжырымдамасына сәйкес [3] негізгі міндеттердің бірі жүктер мен контейнерлерді басқарудың, бақылаудың және сәйкестендірудің интеграцияланған ақпараттық жүйелерін енгізу есебінен көлік қызметтерінің қолжетімділігі мен жоғары сапасын қамтамасыз ету болып табылады.

ҚР Теміржол желісіне 800–ге жуық теміржол станциясы кіреді, оның ішінде сұрыптау [4, 147–158-бб.] (мысалы, Қарағанды-Сұрыптау станциясы, Алматы станциясы, Шымкент Сұрыптау станциясы және т.б.), бірақ олардың едәуір бөлігі автоматтандыру мен цифрландырудың қазіргі заманғы талаптарына сәйкес келмейді. Осы объектілерде заманауи АЖ әзірлеу мен енгізудің өзектілігі өнімділікті арттыруға, басқарудың дәлдігіне және ҚР ТЖК жұмысындағы шығындарды қысқартуға бірқатар жүйелік міндеттерді шешу қажеттілігіне байланысты, бұл тиісінше теміржол саласын ақпараттандыру саласындағы ағымдағы жай-күйді және бар проблемаларды терең талдауды талап етеді.

Қазіргі уақытта осы салаға тән бірнеше негізгі тенденциялар мен сын-қатерлерді бөліп көрсетуге болады: қолданыстағы есептеу базасында шешілетін міндеттер тізімін кеңейту; жедел хабарламаларды қалыптастыру және нақты уақыт режимінде басқарушылық шешімдер қабылдау қажеттілігі; әр түрлі мақсаттағы ақпараттық жүйелер санын көбейту; ақпараттандыру құралдары мен технологияларын дамыту [5, 3-8 бб.]; күрделілігі, ауқымдылығы және интеграциясы ТЖК-де АЖ жобалау, жаңғырту және пайдалану процестері; басқару міндеттерін интеллектуализациялау.

ТЖК–дағы бизнес-процестердің тиімділігінде негізгі рөлдердің бірін атқаратын сұрыптау станцияларын автоматтандыруға және ақпараттандыруға байланысты проблемаларға ерекше назар аудару қажет. Бұл проблемаларға жекелеген шешімдердің үйлесімсіздігі, олардың қайталануы, қаржы ресурстарын ұтымсыз пайдалану және ҚР сұрыптау станцияның әлсіз техникалық жарақтандырылуы жатады. Мысалы, мұндай объектілердегі дерекқор серверлерінің (ДС) және қосымшалар серверлерінің тозуы Ресей Федерациясында және ТМД-ның басқа мемлекеттерінде 50–90 % дейін жетеді [7, 268-286- бб.] және олардың қызмет ету мерзімі, [6] сәйкес, шамамен үш жыл. Сонымен қатар, ескірген бағдарламалық өнімдер және жеткіліксіз дамыған деректер желісі кең таралған [8, 608- бб.]қосулы ТЖК жалпы алғанда. Клиенттерді интернет арқылы қосу кезінде трафиктің жыл сайынғы өсуі кем дегенде 30 % құрайтынын ескеру қажет [8, 608-бб.] Басқа маңызды мәселелерге мыналар жатады: жабдықты жеткіліксіздігі және қолданылатын жүйелердің әртүрлілігі; орталықтандырылған деректер қоймаларының болмауы;

ақпаратты қолмен енгізудің басым болуы. Мұның бәрі ТЖК-де күрделі АЖ жобалауға жүйелік тәсілдің жоқтығын көрсетеді. Халықаралық тәжірибе көрсеткендей, АҚШ–тағы АЖ жобаларының шамамен 54 %–ы архитектуралық шешімдердің жеткіліксіз пысықталуына байланысты сәтсіздікке ұшырады [6]. Соңғы жылдары АЖ архитектурасын әзірлеуге жұмсалған уақыт жобаның жалпы ұзақтығының 10–15 %-дан 50 %-на дейін ұлғайды, бұл маңызды, өйткені жүйенің архитектурасы тұжырымдаманы, техникалық тапсырманы, эскиздік және техникалық жобаларды әзірлеуді қоса алғанда, жобалаудың бастапқы кезеңдерінде қалыптасады. Сұрыптау станциясында заманауи автоматтандыру жүйелерін әзірлеуге, жаңартуға және енгізуге байланысты аталған қиындықтар жоғарыда аталған мәселелерді шешудің ғылыми негізделген тәсілдерін іздеудің өзектілігін көрсетеді.

Модельдеу әдістерін қолдана отырып, сұрыптау станциялары мен дөңестердің жұмысын жақсарту мәселесін шешуге, ТМД елдерінің көптеген ғалымдары, атап айтқанда Л. г. Аверьянов, В. М. Акулиничев, Е. В. Архангельск, С. А. Бессоненко ССт-да пойыздарды тарату процестерін автоматтандырылған және басқарудың математикалық модельдерін, әдістерін, алгоритмдері мен техникалық құралдарын жасауға үлкен үлес қосқан., Бирюков Н.Г., Бобровский В. И., Большаков О. А., Бочаров А. П., Бутько Т. В., Быкадоров С. А., Вернигора Р. В., Жуковицкий И. В., Игнатков К. А., Исаков О. А., Карбивский Ф. А., Кегенбеков Ж. К., Керимкулова Д. А., Кибалов Е. Б., Кибитова Р., Климова Е. В., Косолапов А. А., Косорига Ю. А., Ломотько Д. В., Малашкин В. В., Матюхин В. Г., Мусаев Ж., Науменко П. П., Носков В. Я., Оруджов Р. Н., Панкратов В. И., Платонов А. Н., Попов А.Т., Савицкий А. Г., Сафонова А. И., Сафрис Л. В., Толмачева Е. И., Туркебаев М., Чередников Н. А., Шафит Е. М., Шиш В. А., Югрина О. П. сонымен қатар шетелдік мамандар, атап айтқанда Abdullaev R., Ahmadi S. A., Bosyi D., Bychkov I., Chen H., Chen J., Chuijiang G., Dilmurod B., Dulobov D., Fan L., Gorbova O. V., Grevtsov S., Hanna K., islomjon A., Jian J. L., Konyukhov V. Y., Lempert A., Lu L., Majidi R. S., Mirehei M., Nurzhaubayev M., Olentsevich A. A., Rosado D. G., Saidivaliev S., Shakhriyor D., Skalozub V., Yulia B., Zhukovytskyi I., Zokhid T. және басқалары. Үлкен ғылыми-практикалық тәжірибе сұрыптау станцияларын автоматтандыру жүйелерін дамытудың қазіргі жағдайында ССт-тағы автоматтандырылған технологиялық процестердің пайдалану сипаттамаларын арттырудың ресурс үнемдеу әдістерін жасауға мүмкіндік береді.

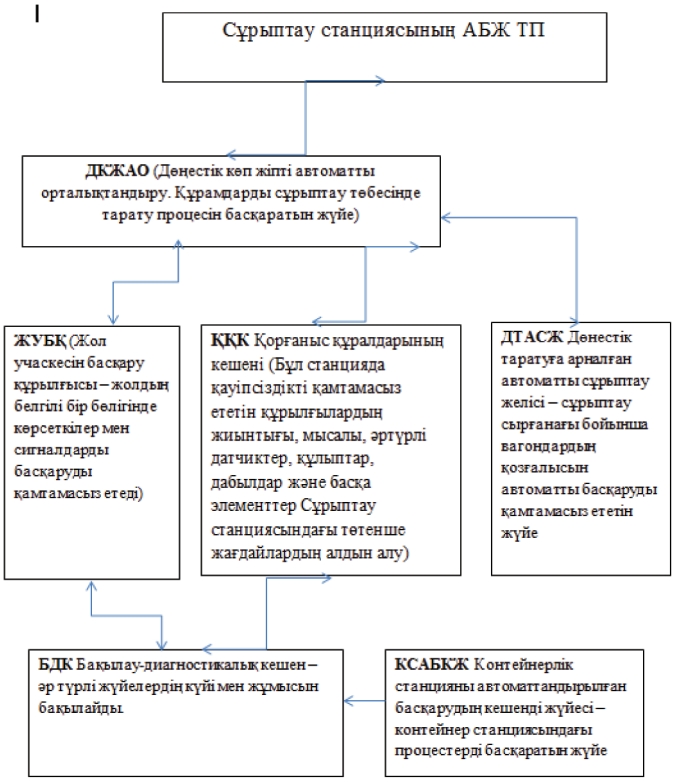
Темір жол көлігіндегі автоматтандыру жүйелерінің архитектураларын жобалау процесі соңғы онжылдықтарда айтарлықтай эволюциядан өтті, бұл технологиялардың дамуына, жүйелердің функционалдығы мен сенімділігіне қойылатын талаптардың артуына, сондай-ақ теміржол тасымалы кезінде автоматтандыру объектілерінің күрделенуіне байланысты болды. Сұрыптау станцияларын күрделі технологиялық қондырғылар ретінде автоматтандыру осы эволюцияны айқын көрсетеді. Осылайша, автоматтандыру жүйелерін дамытудың алғашқы кезеңдерінде орталықтандырылған архитектуралар басым болды [7, 268–286-бб.]Мұндай жүйелер темір жол көлігінде деректерді басқару

мен өңдеудің барлық негізгі функцияларын орындайтын бір немесе бірнеше орталық есептеу құрылғыларына негізделген. Орталықтандырылған жүйелер бірқатар артықшылықтарға ие болды, олардың ішінде мыналарды атап өткен жөн: жобалау мен енгізудің қарапайымдылығы; барлық есептеу ресурстарын бір жерде шоғырландыру; деректерді және оларды өңдеуді жеңілдетілген басқару. Алайда, темір жол көлігіндегі технологиялық процестердің күрделілігінің артуымен және өңделетін ақпарат көлемінің ұлғаюымен орталықтандырылған архитектуралар бірқатар шектеулерге тап болды, соның ішінде: шектеулі масштабтау; орталық түйіндерге жоғары жүктеме; жүйенің толық тоқтап қалуына әкелуі мүмкін орталық құрылғының істен шығуының осалдығы. Сұрыптау станцияларында орталықтандырылған жүйелер модераторларды басқару немесе вагондардың траекториясының негізгі есептеулерін орындау сияқты процестердің шектеулі санын басқару үшін қолданылды. Сондықтан есептеу технологиялары мен желілік инфрақұрылымдардың дамуымен таратылған архитектураларға көшу басталды, өйткені мұндай жүйелер көптеген есептеу түйіндерінің өзара әрекеттесуіне негізделді, олардың әрқайсысы белгілі бір функцияларды орындауға жауапты болды. Сұрыптау станцияларында таратылған архитектуралар, 1-суретті қараңыз, баяулатқышты басқару, маршрутты жоспарлау, жолдардың техникалық күйін бақылау және деректерді талдау сияқты көптеген ішкі жүйелерді біріктіруге мүмкіндік берді, бұл көптеген операциялардың синхронды орындалуын қамтамасыз етті және ССт тиімділігін арттыру үшін айтарлықтай.

**Нәтижелер мен талқылау**

АБЖ ТП және ТЖК АЖ эволюциясының қазіргі кезеңі жасанды интеллект, машиналық оқыту әдістерін және үлкен деректерді пайдаланатын зияткерлік архитектураларды енгізумен сипатталады. Бұл жүйелердің келесі ерекшеліктері бар: өзін-өзі оқыту, яғни технологиялық процестердегі өзгерістерге бейімделу мүмкіндігі; нақты уақыттағы деректерді біріктіру, яғни үлкен көлемдегі деректерді өңдеу минималды кідіріспен жүзеге асырылады; деректерді талдау және операторларға ұсыныстар қалыптастыру AI жүйелерімен қамтамасыз етілген кезде шешімдерді интеллектуалды қолдау.

Сұрыптау станциясы үшін интеллектуалды архитектуралар жүктемені болжау, вагон ағынын оңтайландыру және төтенше жағдайлардың алдын алу сияқты мәселелерді шешуде шешуші рөл атқарады. Мысалы, сұрыптау станцияларын басқарудың заманауи жүйелері вагондардың ағымдағы параметрлерін ғана емес, сонымен қатар олардың траекторияларын дәлірек есептеуге мүмкіндік беретін тарихи деректерді де ескеруі мүмкін.




1-сурет – АБЖ ТП сұрыптау станциясының типтік архитектурасы (материалдар бойынша [1 – 10])

Соңғы онжылдықтардағы есептеу техникасы мен ақпараттық технологияның дамуы ТЖК-дағы әртүрлі процестерді автоматтандыру үшін қолданылатын ақпараттық жүйелерге қойылатын талаптар мен принциптерді түсінуде айтарлықтай өзгерістерге әкелді. Ғылыми қауымдастықты біріктіретін іргелі ғылыми көзқарастар мен модельдердің жиынтығы болып табылады. Парадигма теміржол көлігі үшін осындай ақпараттық жүйенің дамытудың негізгі тәсілдерін анықтайды [1, 7–14-бб.] Ол ТЖК-дегі АЖ ғылыми дамуының сабақтастығын қамтамасыз етеді және жаңа тұжырымдамалар мен зерттеулер жасау үшін негізін қалыптастырады. Бастапқыда АЖ-ге қойылатын негізгі талап, оның ішінде ТЖК-де қолданылатын өлшеу, бақылау және басқару тапсырмаларын орындау үшін қажетті жоғары есептеу жылдамдығы мен жылдамдықты қамтамасыз ету болды. Өндірісті бақылау мен басқарудың автоматтандырылған жүйелері (ББАЖ), технологиялық процестерді басқарудың автоматтандырылған жүйелері (ТПБАЖ) және ақпараттық басқару жүйелері сияқты есептеу жүйелеріне баса назар аударылды. Интерфейстер мен деректерге қол жеткізу мәселелері екінші дәрежелі ретінде қарастырылды.

Ақпараттық ғасырдың басталуымен және интернет сияқты желілік технологиялардың белсенді дамуымен жаңа парадигмаға көшу болды, оның

шеңберінде АЖ есептеу құрылғыларының әртүрлі түрлерін біріктіретін және нақты уақыттағы деректерге қол жеткізуді қамтамасыз ететін әмбебап платформалар ретінде қабылдана бастады. Негізгі назар ақпараттың қолжетімділігін қамтамасыз етуге және деректермен үздіксіз алмасу жағдайында жұмыс істей алатын аумақтық бөлінген жүйелерді құруға ауысты. ТЖК-дегі АЖ дамуының қазіргі кезеңі жаңа парадигманың пайда болуымен сипатталады [11, 30–40-бб.], онда негізгі талап ақпараттың қол жетімділігі ғана емес, сонымен қатар оның сапасы болып табылады, ол сәйкесінше шешім қабылдау үшін деректердің өзектілігін, сенімділігі мен пайдалылығын қамтиды. Пайдаланушылар темір жол көлігіндегі бизнес-процестерді автоматтандыру мен интеллектуализациялаудың жоғары дәрежесін қамтамасыз ете алатын интеллектуалды шешімдерді күтеді. Мұндай идеяларды жүзеге асырудың алғашқы мысалдарының бірі-Жапонияда 1981 жылы жасалған бесінші буын стратегиялық есептеу машиналарының жобасы [12, 50-57-бб.; 13, 213–223-бб.]Бұл жоба жасанды интеллект әдістеріне негізделген және интеллектуалды интерфейсті құруды көздеді. Алайда, сол кездегі технологияның жоғары құны мен жеткіліксіз деңгейіне байланысты жоба кең таралмады.

Қазіргі уақытта жасанды интеллект технологияларының дамуы жүйелерді интеллектуализациялау идеяларын жандандыруға мүмкіндік берді, бұл әсіресе сұрыптау станцияларын автоматтандыруды шешуші рөл атқаратын теміржол саласына қатысты. «Ақылды» локомотивтер мен станциялардың өзара әрекеттесуіне негізделген интеллектуалды теміржол көлігіне көшу басым міндеттердің біріне айналуда [13, 213–223-бб.].

Әлемдегі жетекші көлік ұйымдары (мысалы, UIC – International union of railways Халықаралық теміржол одағы) қолдайтын интеллектуалды жүйелер (бұдан әрі-Интеллектуалды станция) [14, 67-б.]), көбірек қолданылуда. Олар басқару сапасын жақсартуды, персоналдың жұмысын жеңілдетуді, операторлардың штаттық және авариялық жағдайларда іс-қимылын бақылауды, сондай-ақ тасымалдау процесінің сенімділігін, қауіпсіздігін және тиімділігін арттыруға ықпал ететін жабдықтың жай-күйін жедел диагностикалауды қамтамасыз етеді. Жоғарыда айтылғандардың негізінде қазіргі заманғы интеллектуализация тенденцияларын ескере отырып, сұрыптау станцияларын автоматтандыру үшін ақпараттық құрылымдарды қалыптастыру әдістері мен модельдерін дамыту теміржол саласының негізгі міндеттерін шешуге ықпал ететін ғылыми зерттеулердің негізгі бағыты болып табылады деп айтуға болады.

АЖ-нің негізгі құрылымдық компоненттері жүйенің талаптарына сәйкес тапсырмалардың орындалуын қамтамасыз ететін пайдаланушылар мен автоматтандыру құралдар кешенінен тұрады. Бұдан басқа, АЖ-нің толыққанды жұмыс істеуі үшін қамтамасыз етудің әртүрлі түрлері бөлінеді, мысалы: жүйенің функцияларын іске асыруды қамтамасыз ететін ДҚ; БҚ, ақпараттық ресурстар және оларға қол жеткізу тетіктерін қамтитын ақпараттық қамтамасыз ету (АҚ); аппараттық құралдарды қамтитын техникалық қамтамасыздандыру (ТҚ); жүйе компоненттерінің өзара іс-қимылын реттейтін ұйымдастырушылық және әдістемелік қамтамасыз ету; алгоритмдер мен интерфейстерді қолдайтын

математикалық және лингвистикалық қамтамасыз ету; жүйені пайдаланудың нормативтік шеңберін айқындайтын құқықтық қамтамасыз ету.

Сұрыптау станциясының жұмысын автоматтандыру үшін функционалды жүйелер мен ішкі жүйелердің құрылымын бөлу ерекше маңызға ие, бұл автоматтандырылған функциялар мен міндеттердің құрамы мен сипаттамаларын сипаттауды қамтиды, бұл сәйкесінше жүйе компоненттерінің интеграциясы мен өзара әрекеттесуінің жоғары дәрежесін қамтамасыз ететін ақпараттық құрылымдарды қалыптастыруға мүмкіндік береді және аумақтық бөлінген теміржол инфрақұрылымы объектілері үшін маңызды [15, 27–122-бб.] Осылайша, сұрыптау станциясын автоматтандыру үшін әзірленген ақпараттық құрылымдардың жүйелік архитектурасы күрделі және көп қабатты зерттеу нысаны болып табылады. Оның қалыптасуы техникалық және функционалдық сипаттамалардан бастап ұйымдастырушылық және әдістемелік принциптерге дейінгі әртүрлі аспектілерді ескеруді талап етеді.

Ақпараттық жүйені жобалау және пайдалану кезінде қабылданған парадигмаға байланысты, оның ішінде теміржол көлігі немесе сұрыптау станциясы үшін жергілікті, АЖ функционалдығы мен тиімділігін қамтамасыз етудің әртүрлі компоненттеріне баса назар аударылады. Есептеу жүйелері үшін басты назар өнімділік пен өнімділікті қамтамасыз ететін техникалық қамтамасыз етуге (ТҚ), сондай-ақ есептеу процесін ұйымдастыратын бағдарламалық жасақтамаға аударылады. Ақпараттық жүйе үшін желілік интеграция мен өзара іс-қимылға жауап беретін және желілік құрылымдар мен деректерді беру арналарын іске асыратын деректер қоры ұсынған ақпараттық қамтамасыз ету (АҚ) шешуші рөл атқарады. Интеллектуалды жүйелерде білімді ұсыну мен өңдеудің модельдері мен әдістері, базалық қоры түріндегі ақпараттық қамтамасыздандыру, сондай-ақ логикалық және функционалды бағдарламалау тілдерін, сараптамалық жүйелердің қабықшаларын және пайдаланушылармен өзара әрекеттесуге арналған арнайы интерфейстерді қамтитын интеллектуалды коммуникация тілдері басым. Мұндай жүйелердегі техникалық қамтамасыз ету ақылды деректермен жұмыс істеу үшін қажетті енгізу және шығару құрылғыларын қамтиды. Диссертацияда темір жол көлігі қарастырылғандықтан, ТЖК үшін осындай көп қабатты АЖ архитектурасын поезбен бейнелі түрде салыстыруға болады [13, 213–223-бб.], мұнда берілген мақсатқа қарай қозғалысты қамтамасыз ететін локомотив жүйенің мүмкіндіктерін белгілейтін және оның негізгі сипаттамаларын анықтайтын негізгі техникалық құралдарды (ТҚ) бейнелейді. Алайда, «локомотивтен» кейінгі қамтамасыз ету түрлерінің «құрамы» оның қуатын ескерусіз күрделі бола алмайды.

Мысалы, тежегіш позицияларындағы ағытпалардың айналу жылдамдығын реттеу сияқты күрделі сұрыптау станциясының процестерін басқару алгоритмдерін пайдалану контроллерлердің жоғары өнімділігін қажет етеді. Егер өнімділік мұндай алгоритмдерді орындау үшін жеткіліксіз болса, бұл басқарудағы қателіктерге әкелуі мүмкін. Сол сияқты, жүйе орындайтын тапсырмалар санының артуы немесе қызмет көрсетуге мұқтаж клиенттер санының артуы есептеу ресурстары мен байланыс арналарының өткізу қабілеттілігін

ескеруді талап етеді. Мұндай бағалауды елемеу жоғары жүктемелер кезінде жүйенің бұзылуына әкелуі мүмкін, бұл қабылданатын шешімдердің сәтсіздігіне немесе сапасының төмендеуіне әкеледі. Сондықтан, «локомотивті» таңдау – қамтамасыз ету түрлерінің «құрамының» функционалдылығының берілген деңгейін қолдауға қабілетті негізгі техникалық құралдар, темір жол көлігі үшін жобалау және жаңғырту кезіндегі басым міндеттердің бірі болып табылады. Бұл әсіресе теміржолдағы сұрыптау станциясы үшін өзекті, мұнда процестерді автоматтандыру міндеттердің күрделілігі, пайдаланушылар саны мен қол жетімді есептеу ресурстары арасындағы теңгерімді талап етеді, ал оңтайлы жүйенің барлық компоненттерінің үйлесімі динамикалық және маңызды міндеттер жағдайында осындай жүйелердің сенімділігін, тұрақтылығын және жұмыс істеу тиімділігін қамтамасыз етеді.

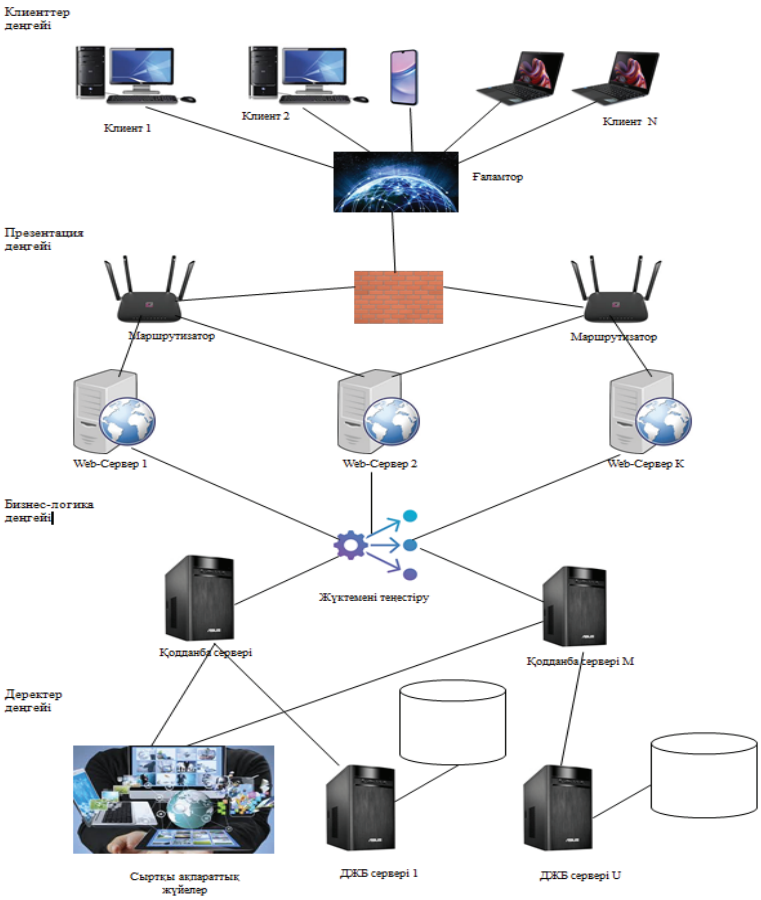
Сұрыптау станцияларын автоматтандыруға байланысты ғылыми, техникалық және ұйымдастырушылық міндеттерді шешу үшін автоматтандырылған басқару жүйелерін (АБЖ) бірқатар жалпы қабылданған белгілер бойынша түбегейлі жіктеу керектігін ескеруде. Мұндай жіктеу жобалаудың алғашқы кезеңдерінде аналогтарды таңдау, жұмысты жоспарлау кезінде қажетті ресурстарды бағалау, сондай–ақ технологиялық процестерді басқарудың автоматтандырылған жүйелерінің ғылыми-техникалық деңгейін анықтау үшін қажет. Негізгі жіктеу белгілері ретінде келесі критерийлер қолданылады [15, 27-122 бб.]: кәсіпорынның ұйымдық–өндірістік құрылымындағы технологиялық басқару объектісі мен АБЖ алатын деңгей; уақыт бойынша технологиялық процестің сипаты; басқару объектісінің шартты ақпараттық қуаты; функционалдық сенімділік деңгейі; жүйенің жұмыс істеу түрі.

Сұрыптау станциясының ұйымдық-өндірістік иерархиясы тұрғысынан сұрыптау станцияларын басқарудың автоматтандырылған жүйелері жеке технологиялық агрегаттар деңгейінде де, тұтастай алғанда станцияны басқарудың интеграцияланған жүйелері деңгейінде де технологиялық процестерді басқаруды қамтамасыз ететін көп деңгейлі жүйелер класына жатады.

2-суретте теміржол көлігіндегі А типтік төрт деңгейлі моделі көрсетілген. Мұндай схема үлкен көлемдегі деректерді өңдеуден бастап сенімділік пен процестерді оңтайландыруға дейінгі Сұрыптау станциясының алдында тұрған негізгі мәселелерді шешуге мүмкіндік береді.

Бұл модель сұрыптау станцияларын автоматтандырудың заманауи талаптарына сәйкес келетін жүйенің интеграциясын, масштабталуын және сенімділігін қамтамасыз ету мақсатында құрылған. Модельдегі әр деңгей ССт-те автоматтандыру мәселелерін шешуге ықпал ететін нақты функцияларды орындайтынын ескеріңіз. Сонымен, бірінші деңгей, деректер деңгейі, технологиялық процестер туралы ақпаратты сақтайтын және басқаратын мәліметтер базасын басқару серверлерін (ДҚБЖ) қамтиды. Бұл серверлер вагондардың қозғалысы, инфрақұрылым жағдайы және операцияларды жоспарлау нәтижелері туралы ақпаратты қоса алғанда, үлкен көлемдегі деректерді өңдеуге негіз болады. Бірнеше ДҚБЖ серверлерінің болуы (1-ден U-ге дейін) жүктемені бөлуге мүмкіндік береді, бұл ақауларға төзімділікті

жақсартады және жалпы жүйенің өнімділігін арттырады. Екінші деңгейде, бизнес-логика деңгейінде қосымшалар серверлері орналасқан (1-ден М-ге дейін). Олар басқару алгоритмдерін орындауға, деректерді талдауға және шешім қабылдауға жауап береді. Техникалық тұрғыдан бұл деңгей оңтайландыру әдістерін жүзеге асырудың негізгі компоненттерін қамтиды, мысалы, ақпараттық ағындарды бағыттауға және/немесе жүйенің жүктемесін бағалауға арналған генетикалық Алгоритмдер (ГА) және т.б. бұл деңгей сонымен қатар операцияларды жоспарлау кезінде қосымша деректерді ескеруге мүмкіндік беретін сыртқы ақпараттық жүйелермен интеграцияны қамтамасыз етеді. Үшінші деңгей, презентация деңгейі пайдаланушыларға ыңғайлы интерфейстер арқылы ақпаратқа қол жеткізуге мүмкіндік беретін веб-серверлерді (1-ден К-ге дейін) қамтиды. Мұнда жүктемені теңестірудің заманауи технологиялары қолданылады, бұл кіріс сұрауларын таратуға және жүйенің шамадан тыс жүктелуіне жол бермейді. Бұл тәсіл ССт-тің ең жоғары жүктемелері жағдайында жүйенің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін өте маңызды.




2-сурет – ТЖК-дағы АБЖ ТП төрт деңгейлі моделі

Сонымен, төртінші деңгей – бұл клиенттердің деңгейі. Бұл Интернет арқылы жүйемен өзара әрекеттесетін пайдаланушылардың соңғы құрылғыларын (1-ден N-ге дейін) білдіреді. Мысалы, бұл операторлардың, диспетчерлердің және сұрыптау станциясын басқаруды қамтамасыз ететін басқа қызметкерлердің жұмыс станциялары болуы мүмкін. Деңгейлер арасындағы байланыс ақпарат ағындарын тиімді бағыттауды қамтамасыз ететін маршрутизаторлар арқылы жүзеге асырылады. Тиісінше, 2-суретте көрсетілген ТП АБЖ архитектурасының сұрыптау станциясының міндеттерімен байланысы ТП АБЖ (және/немесе АЖ) есептеу ядросында қолданылатын әдістер мен модельдерге негізделгенін атап өтеміз. Мысалы, жүйенің жүктемесін талдау және ағындардың динамикалық бағытталуын қамтамасыз ету үшін жаппай қызмет көрсету теориясының әдістері қолданылады, ал серверлер арасында деректерді бөлуді оңтайландыру графикалық теорияны қолдану арқылы жүзеге асырылады. Жүктемені теңестіру деңгейінің болуы жүйенің ақауларға төзімділігін арттыру мәселелерін шешумен тікелей байланысты, бұл сәтсіздіктер кезінде шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

**Қорытынды**

1 Олардың жұмыс тиімділігіне әсер ететін негізгі технологиялық және ұйымдастырушылық аспектілерді қоса алғанда, сұрыптау станцияларын автоматтандырудың ағымдағы жағдайы мен даму тенденциялары талданды. Сұрыптау станцияларын автоматтандыру интеллектуалды алгоритмдер мен заманауи жүйелік архитектураларды қоса алғанда, әртүрлі ішкі жүйелер мен технологияларды біріктіруді қажет ететін күрделі пәнаралық міндет екені анықталды.

2 Бұл саладағы негізгі сын-қатерлер жекелеген шешімдердің үйлесімсіздігі, ақпараттық жүйелердің жеткіліксіз интеграциясы, жабдықтың тозуының жоғары дәрежесі, сондай-ақ процестердің синхрондалуын және Сұрыптау станциясы мен оның АБЖ ТП жұмысындағы өзгерістерге тұрақтылықты қамтамасыз етуге қабілетті ақпараттық құрылымдар моделінің болмауы болып қала беретіні көрсетілген.

3 Орталықтандырылған архитектуралардан бастап, үлестірілген және интеллектуалды жүйелерге көшетін автоматтандырылған жүйелерді жобалау тәсілдерінің эволюциясы технологиялық процестердің күрделенуіне және өңделетін ақпарат көлемінің ұлғаюына бейімделуге мүмкіндік береді. Бұл процесте басқарудың дәлдігін арттыруға, тәуекелдерді азайтуға және Сұрыптау станциясының АБЖ ресурстарын оңтайландыруға ықпал ететін интеллектуалды технологиялар маңызды рөл атқаратыны көрсетілген.

## ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Мусаев, Ж., Туркебаев, М., Кибитова, Р.** Перспективы развития железнодорожного транспорта Казахстана // Вестник КазАТК. – 2021. – № 118(3). – С. 7–14.

2 **Дедов, А., Фролова, С. О.** Современное состояние и перспективы развития железнодорожного транспорта Казахстана в рамках Единого экономического пространства // Редакционный совет. – 2015. – С. 62.

3 Концепция развития транспортно–логистического потенциала Казахстана. [Электронный ресурс]. Доступ по ссылке – [Электронды ресурс]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2200001116

4 **Кегенбеков, Ж. К., Керимкулова, Д. А.** Анализ современного состояния железнодорожной сети Казахстана // Научные проблемы водного транспорта. – 2019. – № 60. – С. 147–158.

5 **Бочаров, А. П., Науменко, П. П., Карбивский, Ф. А., & Шиш, В. А.** Разработка и внедрение корпоративной информационной системы: основные положения и проблемы // Информационно–управляющие системы на ЖДТ. – 2012. – № 5. – С. 3–8.

6 **Dave P.** System Design Strategies // An ESRI White Paper. February. : - 2003.

7 **Жуковицкий, И. В., Косолапов, А. А.** Моделирование в процессе проектирования информационных систем на железнодорожном транспорте // Монография. : – 2016. – С. 268–286.

8 **Михалёва А. И.** Системные технологии моделирования сложных систем // Монография под общей редакцией проф. - Днепр : НМетАУ-ИВК «Системные технологии». – 2016. – С. 608. ISBN 978-966-2596-19-9

9 **Косорига, Ю. А.** Оценка эффективности компьютерных систем управления маршрутами на сортировочных горках // Информационно управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2014. – С. 54–54.

10 Пат. 2578703 Российская Федерация, С1. Система определения координат вагонов в парке станции // Носков, В. Я., Аверьянов, Л. Г., Игнатков, К. А. (2016). Год публикации: 2016, Номер заявки: 2014151848/11 Дата регистрации: 22.12.2014 Дата публикации: 27.03.2016

11 **Акулиничев, В. М., Попов, А. Т., Платонов, А. Н.** Проблемы взаимодействия промышленной транспортной системы и полигона примыкания МПС // Проблемы наращивания мощности железнодорожных станций и узлов. – 1990. – С. 30–40.

12 **Бобровский, В. И., Вернигора, Р. В., Малашкин, В. В.** Количественная оценка технико–технологических параметров железнодорожных станций на основе эргатических моделей // Наука и прогресс транспорта // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2007. – № 16. – С. 50–57.

13 **Косолапов, А. А.** Информатизация общества: философско–антропологические проблемы // Наука и прогресс транспорта // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2015. – № 4 (58). – С. 213–223.

14 **Majidi, R. S., Mirehei, M., & Ahmadi, S. A.** Comparative study on Iran railway and members of international union of railways (UIC) // International journal of advanced and applied sciences. – 2016. – № 3(9). – P. 67–77.

15 **Skalozub, V., Zhukovytskyi, I., Bosyi, D., Lakhno, V.** Usage of Specialized Intellectual and Artificial Intelligence Systems to Improve Railway Transport Technologies // In : Sładkowski, A. (eds) Using Artificial Intelligence to Solve Transportation Problems : Studies in Systems, Decision and Control, Vol 563. – 2024. – P. 27–122. Springer, Cham. – https://doi.org/10.1007/978–3–031–69487–5_2

16 **Шафит, Е. М., Жуковицкий, И. В., Косолапов, А. А.** Принципы построения интегрированной автоматизированной системы управления технологическими процессами на сортировочной станции // Информ.–управляющие системы на ж.–д. транспорте. – 1996. – № 1 (2). – С. 36–41.

REFERENCES

1 **Musaev, J., Turkebaev, M., Kibitova, R.** Perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta Kazahstana [Prospects for the development of railway transport in Kazakhstan] // KazATK Bulletin. – 2021. – № 118(3). – P. 7–14.

2 **Dedov, A., Frolova, S. O.** Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta Kazahstana v ramkah Edinogo ekonomicheskogo prostranstva [The current state and prospects of development of railway transport in Kazakhstan within the framework of the Single Economic Space] // Editorial Board. – 2015. – P. 62.

3 Koncepciya razvitiya transportno–logisticheskogo potenciala Kazahstana [Concept of development of transport and logistics potential of Kazakhstan]. [Electronic resource]. Link access – https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2200001116

4 **Kegenbekov, J. K., Kerimkulova, D. A.** Analiz sovremennogo sostoyaniya zheleznodorozhnoj seti Kazahstana [Analysis of the current state of the railway network in Kazakhstan // Scientific Problems of Water Transport]. – 2019. – № 60. – P. 147–158.

5 **Bocharov, A. P., Naumenko, P. P., Karbivsky, F. A., Shish, V. A.** Razrabotka i vnedrenie korporativnoj informacionnoj sistemy: osnovnye polozheniya i problemy. Informacionno–upravlyayushie sistemy na ZhDT [Development and implementation of a corporate information system: main provisions and problems] // Information and control systems at railway stations. – 2012. – № 5. – P. 3–8.

6 **Dave, P.** System Design Strategies // An ESRI White Paper. February. – 2003.

7 **Zhukovitsky, I. V., Kosolapov, A. A.** Modelirovanie v processe proektirovaniya informacionnyh sistem na zheleznodorozhnom transporte [Modeling in the process of designing information systems in railway transport] // The monograph. – 2016. – P. 268–286.

8 **Mikhalev A. I.** Sistemnye tehnologii modelirovaniya slozhnyh sistem [System technologies for modeling complex systems] // Monograph Under the general editorship of Professor Dnipro : NMetAU-IVK «System Technologies». – 2016. – P. 608. ISBN 978-966-2596-19-9

9 **Kosoriga, Yu. A.** Ocenka effektivnosti kompyuternyh sistem upravleniya marshrutami na sortirovochnyh gorkah [Evaluation of the effectiveness of computer

route management systems on sorting slides] // Information management systems in railway transport. : – 2014. – P. 54–54.

10 Patent 2578703 Russian Federation C1. Sistema opredeleniya koordinat vagonov v parke stancii [A system for determining the coordinates of wagons in the station's fleet] // Noskov, V. Ya., Averyanov, L. G., Ignatkov, K. A. (2016). Year of publication: - 2016. Application number: 2014151848/11 Registration date: 22.12.2014 Publication date: 27.03.2016.

11 **Akulinichev, V. M., Popov, A. T., Platonov, A. N.** Problemy vzaimodejstviya promyshlennoj transportnoj sistemy i poligona primykaniya MPS [Problems of interaction between the industrial transport system and the landfill adjacent to the Ministry of Transport // In Problems of increasing the capacity of railway stations and junctions]. – 1990. – P. 30–40.

12 **Bobrovsky, V. I., Vernigora, R. V., Malashkin, V. V.** Kolichestvennaya ocenka tehniko–tehnologicheskih parametrov zheleznodorozhnyh stancij na osnove ergaticheskih modelej [Quantitative assessment of technical and technological parameters of railway stations based on ergatic models. Science and progress of transport] // Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport. – 2007. – № 16. – P. 50–57.

13 **Kosolapov, A. A.** Informatizaciya obshestva : filosofsko–antropologicheskie problemy. Nauka i progress transporta [Informatization of society: philosophical and anthropological problems : Science and progress of transport] // Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 4 (58). – P. 213–223.

14 **Majidi, R. S., Mirehei, M., & Ahmadi, S. A.** Comparative study on Iran railway and members of international union of railways (UIC) // International journal of advanced and applied sciences. – 2016. – № 3(9). – P. 67–77.

15 **Skalozub, V., Zhukovytskyi, I., Bosyi, D., Lakhno, V.** Usage of Specialized Intellectual and Artificial Intelligence Systems to Improve Railway Transport Technologies. In : Sładkowski, A. (eds) Using Artificial Intelligence to Solve Transportation Problems : Studies in Systems, Decision and Control, Vol 563. – 2024. – P. 27–122. 27–122. Springer, Cham. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-69487-5_2

16 **Shafit, E. M., Zhukovitsky, I. V., & Kosolapov, A. A.** Principy postroeniya integrirovannoj avtomatizirovannoj sistemy upravleniya tehnologicheskimi processami na sortirovochnoj stancii [Principles of building an integrated automated process control system at a marshalling yard] // Inform.–control systems for railway transport. – 1996. – № 1 (2). – P. 36–41.

31.01.25 ж. баспаға түсті.
17.03.25 ж. түзетулерімен түсті.
29.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Н. Т. Тулепбек[1], А. О. Оралбекова[2], Б. С. Ахметов[3]***
[1,2,3]Международный транспортно-гуманитарный университет,
Республики Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 31.01.25.
Поступило с исправлениями 17.03.25.
Принято в печать 29.03.25.

# КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СОРТИРОВОЧНЫМИ СТАНЦИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*В статье анализируется текущее состояние и тенденции развития автоматизации сортировочных станций, включая ключевые технологические и организационные аспекты, влияющие на их эффективность. Выявлены основные проблемы, такие как несовместимость решений, недостаточная интеграция информационных систем, износ оборудования и отсутствие моделей для синхронизации процессов. Рассматривается эволюция подходов к проектированию автоматизированных систем от централизованных архитектур к распределённым и интеллектуальным, что способствует адаптации к усложнению технологических процессов и увеличению объёмов информации. Подчеркивается важность интеллектуальных технологий для повышения точности управления и оптимизации ресурсов. Эти решения (регулирование скорости вагонов и управление стрелочными переводами), несмотря на свою примитивность, стали основой для дальнейшего развития технологий автоматизации. С развитием вычислительной техники в 1970–1980-х годах появились автоматизированные системы управления (АСУ), которые обеспечивали централизованное управление сортировочными процессами. В этот период основной акцент делался на автоматизацию отдельных функций, таких как управление замедлителями и контроль за движением вагонов. Однако централизованные системы имели существенные ограничения, связанные с недостаточной гибкостью, низкой отказоустойчивостью и ограниченной возможностью обработки больших объемов данных.*

*Ключевые слова: автоматизация, сортировочные станции, эффективность, интеграция, информационные технологии, интеллектуальные технологии.*

***N. T. Tulepbek[1], A. O. Oralbekova[2], B. S. Akhmetov[3]***
[1,2,3]Institution «International University Transport and Humanities»,
Republic of Kazakhstan, Almaty
Received 31.01.25.
Received in revised form 17.03.25.
Accepted for publication 29.03.25.

## COMPUTERIZATION OF MARSHALLING YARD MANAGEMENT IN RAILWAY TRANSPORT

*The article analyzes the current state and trends in the development of automation of marshalling yards, including key technological and organizational aspects that affect their effectiveness. The main problems such as incompatibility of solutions, insufficient integration of information systems, wear and tear of equipment and lack of models for synchronization of processes are revealed. The evolution of approaches to the design of automated systems from centralized architectures to distributed and intelligent ones is considered, which contributes to adaptation to the complexity of technological processes and the increase in information volumes. The importance of intelligent technologies for improving control accuracy and optimizing resources is emphasized. These solutions (regulation of wagon speed and control of switches), despite their primitiveness, became the basis for further development of automation technologies. With the development of computer technology in the 1970-1980s, automated control systems (ACS) appeared, which provided centralized control of marshalling processes. During this period, the main emphasis was on the automation of individual functions, such as retarder control and wagon movement control. However, centralized systems had significant limitations associated with insufficient flexibility, low fault tolerance and limited ability to process large volumes of data.*

*Keywords: automation, marshalling yards, efficiency, integration, information technologies, intelligent technologies.*

ҒТАМР 73.29.17

https://doi.org/10.48081/PVCX2453

***Ж. Е. Шукаманов[1], Г. А. Сүлейменова[2], С. Павлов[3]**

[1]М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Қазақстан Республикасы, Тараз қ.;
[2]М. Тынышбаев атындағы ALT университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Винница Ұлттық Техникалық университеті, Украина Республикасы, Винница қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3017-7133
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7099-8441
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0051-5560
*e-mail: shukamanov@bk.ru

# ПОЙЫЗДАР ҚОЗҒАЛЫСЫН ИНТЕРВАЛДЫ РЕТТЕУДІҢ ӘРТҮРЛІ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ АРАЛЫҚТЫҢ ӨТКІЗУ ҚАБІЛЕТІН МОДЕЛЬДЕУ

*Бұл мақалада теміржол желісінде пойыздар қозғалысының қауіпсіздігін және өткізу қабілетін қамтамасыз ету мақсатында қолданылатын жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау және радиоблоктау жүйелерінің жұмыс принциптері талданды. Әр жүйенің құрылымдық және функционалдық ерекшеліктері сипатталып, қозғалысты интервалды реттеу механизмдері мен пойыздардың орын ауыстыру логикасы математикалық модельдеу әдістері арқылы зерттелді.*

*Зерттеу барысында аралық ұзындығы, пойыздардың бірқалыпты қозғалыс жылдамдығы, тежеу жолы, қауіпсіз интервал және кезекшілердің әрекет ету уақыты сынды негізгі параметрлер ескеріліп, әр жүйенің өткізу қабілетіне сандық талдау жүргізілді. Модельдік симуляция нәтижелері әрбір жүйенің техникалық мүмкіндіктері мен шектеулерін нақты көрсетті.*

*Типтік жағдайдағы есептеулерге сәйкес, өткізу қабілетінің көрсеткіштері жартылай автоматты блоктау жүйесінде шамамен 9,6 пойыз/сағат, автоматты блоктауда – 21,9 пойыз/сағат, ал радиоблоктауда – 60 пойыз/сағат деңгейінде анықталды. Бұл нәтижелер тиісті жүйелердің интервалды басқару дәлдігіне, пойыздар арасындағы қашықтықты өлшеу әдістеріне және белгі беру құралдарының деңгейіне тікелей байланысты екендігін көрсетті.*

*Жүйелердің салыстырмалы тиімділігі диаграммалар және басқа да визуалды құралдар арқылы айқындалды, бұл техникалық шешім қабылдау барысында инжинирингтік негіздеме жасауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері заманауи теміржол желісінде цифрлық басқару жүйелерін, атап айтқанда радиоблоктау технологияларын енгізудің өзектілігін және оның көлік логистикасындағы стратегиялық артықшылықтарын дәлелдейді.*

*Кілтті сөздер: пойыз қозғалысы, интервалды реттеу, өткізу қабілеті, жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау, радиоблоктау, модельдеу.*

**Кіріспе**

Қазіргі заманғы теміржол көлігі – жолаушылар мен жүктерді тиімді, үнемді және қауіпсіз тасымалдауды қамтамасыз ететін күрделі көліктік-коммуникациялық жүйе. Пойыздардың қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ету, бағыттамалық құрылғылар мен белгі беру жүйелерін үйлестіру – теміржол саласындағы басты міндеттердің бірі. Бұл тұрғыда қозғалысты басқару жүйелері, әсіресе пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелері, магистральдық және учаскелік теміржол желілерінде шешуші рөл атқарады [1, 415–417-бб.].

Пойыздар қозғалысын интервалды реттеу – пойыздардың бір бағытта, бір жолмен қауіпсіз арақашықтықта қозғалуын қамтамасыз ететін жүйе. Интервалды реттеу жүйелерінің негізгі мақсаты – поездық интервалды сақтау, аралықтарда пойыздардың соқтығысуын болдырмау және белгі беру құрылғылары арқылы қозғалысты реттеу болып табылады [2; 3].

Қазіргі таңда Қазақстан Республикасының теміржол инфрақұрылымында кеңінен қолданылатын интервалды реттеу жүйелерін негізгі үш топқа бөліп қарастыруға болады: жартылай автоматты блоктау жүйелері, автоматты блоктау жүйелері және радиоблоктау жүйелері болып табылады.

Аралықтың өткізу қабілетін модельдеу – пойыз қозғалысын тиімді әрі қауіпсіз ұйымдастырудың маңызды құралы. Жартылай автоматты, автоматты және радиоблоктау жүйелерінің ерекшеліктерін салыстыра отырып модельдеу арқылы әр жүйенің артықшылықтары мен шектеулерін бағалап, оңтайлы шешім қабылдауға болады. Бұл қозғалыс кестесін тиімді құруға, пойыз өтімділігін арттыруға және жаңа технологияларды енгізудің негіздемесін жасауға мүмкіндік береді. Сондықтан модельдеу теміржол инфрақұрылымын дамыту мен жаңғыртуда өзекті рөл атқарады [4, 47–48-бб.].

**Материалдар мен әдістер**

Аралықтың өткізу қабілетін модельдеу және бағалау – теміржол көлігін тиімді ұйымдастырудың маңызды бөлігі. Пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйесіне қарай, аралықтың өткізу қабілеті әртүрлі болады және бұл мән арнайы формулалар арқылы есептеледі [5, 2–3-бб.].

Жалпы интервалды реттеу жүйелеріне байланысты аралықтың өткізу қабілетін есептеу үшін келесі негізгі параметрлер қарастырылады:

- аралықтың ұзындығы – $L$ *(м)*;
- пойыз құрамының ұзындығы – $l$ *(м)*;
- пойыз құрамының орташа жылдамдығы – $V\left(\frac{м}{с}\right)$;
- қауіпсіз интервал – $T_{қауіпсіз}$;
- бекет бойынша кезекшілерге берілетін уақыт – $T_{кезекші}$;
- пойыздың блок-учаскеде өтуі үшін қажетті уақыт – $T_{блок}$.

Аралықтың өткізу қабілеті N белгілі бір уақыт аралығында жүретін пойыздар саны ретінде анықталады:

$$N=\frac{3600}{T_{аралық}} \quad (1)$$

мұндағы $T_{аралық}$ – пойыздардың аралығындағы толық цикл уақыты (секундпен).

Бұл уақыт келесі формула бойынша анықталады:

$$T_{аралық}=T_{қауіпсіз}+T_{блок}+T_{кезекші} \quad (2)$$

мұндағы $T_{блок}$ келесі формуламен анықталады:

$$T_{блок}=\frac{L+l}{V} \quad (3)$$

Жартылай автоматты блоктауда барлық уақыт параметрлері ескерілсе, автоматты блоктау және радиоблоктау жүйелерінде кезекші уақыты ескерілмейді. Сонымен қатар, радиоблоктау жүйелерінде блок-телім уақыты болмайды, себебі ол қозғалысқа байланысты динамикалық түрде қалыптасады.

Нәтижелер және талқылау

Жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау және радиоблоктау жүйелеріндегі өткізу қабілеттілікті өзара салыстыру мақсатында, үлгілік ретінде жалпыға бірдей келесідей параметрлер алынды:

– аралықтың ұзындығы – 6000 метр (6 км);

– пойыз құрамының ұзындығы – 300 метр;

– пойыздың орташа жылдамдығы – 80 км/сағ (22 м/с);

– қауіпсіз интервал – 60 секунд;

– бекет бойынша кезекшілерге берілетін уақыт – 30 секунд.

Жоғарыда көрсетілген әдістерді және берілген параметрлерді ескере отыра, пойыздар қозғалысын интервалды реттеудің әрбір жүйесі үшін аралықтың өткізу қабілеті келесідей есептеледі:

Жартылай автоматты блоктау жүйесінде пойыз құрамының аралықты толық жүріп өтуге кететін уақыты:

$$T_{блок}=\frac{L+l}{V}=\frac{6000+300}{22}=\frac{6300}{22}=286,36 \quad \text{с}$$

Автоматты блоктау жүйесінде пойыз құрамының аралықты толық жүріп өтуге кететін уақыты келесідей есептеледі.

Автоматты блоктау жүйесі бірнеше блок-телімдерге бөлінетіні мәлім. Әр блок-телімге пойыз құрамы кіріп, алдыңғы блок-телім босаса, келесі пойыз құрамы кіре алады. Қауіпсіз интервал сақталады, бірақ бекет кезекшісінің қатысуы болмайды [6, 122–124-бб.].

Үлгілік жағдайда берілген аралық 3 блок-телімге бөлінген делік (әрқайсысы 2000 м). Сонда:

$$T_{блок}=\frac{L+l}{V}=\frac{2000+300}{22}=\frac{2300}{22}=104,55 \quad \text{с}$$

Ал радиоблоктау жүйесінде пойыз құрамдарының нақты орналасуы үнемі есептеліп отырады, сондықтан бұл жүйеде қозғалмалы блок-телімдері түсінігі бар, ал арақашықтық динамикалық түрде реттеледі. Қауіпсіз интервал – тек тежеу уақытына байланысты болады. Бекет кезекшілерінің уақыты қолданылмайды [7, 48-50-бб.].

Сондай-ақ, аналитикалық әдістермен қатар, Python тілінде SimPy және Matplotlib кітапханаларын пайдалана отырып, PyCharm ортасында пойыздардың қозғалысын дискретті-оқиғалы модельдеуі жүргізілді (Сурет 1). Жартылай автоматты блоктау (ЖАБ), автоматты блоктау (АБ) және радиоблоктау (РБ) жүйелері үшін жеке сценарийлер құрылды. Әр сценарийде бастапқы алынған параметрлер қолданылды, яғни: аралық ұзындығы – 6000 метр, пойыз жылдамдығы – 22 м/с (80 км/сағ), қауіпсіз интервал – 60 секунд, ал ЖАБ үшін қосымша кезекші рұқсатын беру уақыты – 30 секунд.

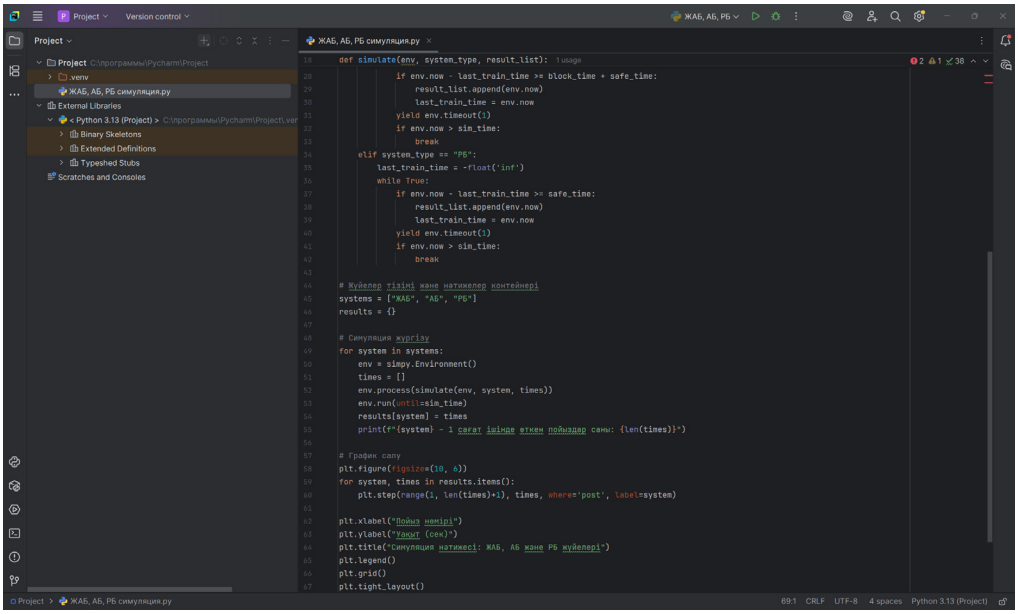
Әр модель бір сағаттық уақыт интервалында іске қосылды. Нәтижесінде:

– ЖАБ симуляциясы – 9 пойыз/сағат;

– АБ симуляциясы – 21 пойыз/сағат;

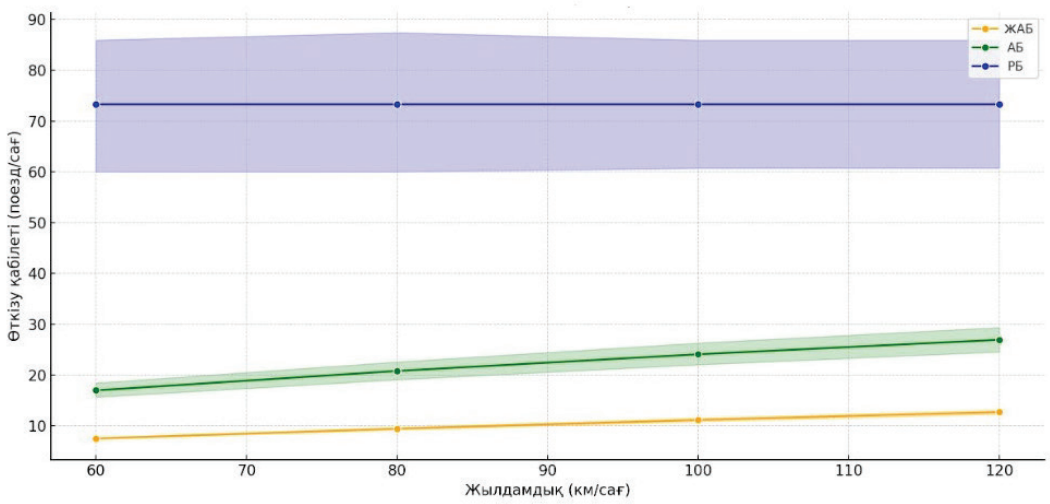
– РБ симуляциясы – 60 пойыз/сағат өткізу қабілетін көрсетті.

Нәтижелер теориялық (аналитикалық) есептеулермен толық сәйкестікте болды.




1-сурет – ЖАБ, АБ және РБ жүйелерінің Python тілінде модельденуі (PyCharm ортасында SimPy және Matplotlib кітапханасы негізінде)

Демек, үш жүйеде де жылдамдық артқан сайын, аралықтың өткізу қабілеті де артатынын байқаймыз. Диаграмма 1.




1-диаграмма – Пойыз жылдамдығының өткізу қабілетіне әсері

Пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерінің жалпы интервал уақытын есептеу үшін, пойыз құрамынан кейінгі келесі пойыз құрамының аралыққа кіруі үшін келесі шарт орындалуы керек [8; 9; 10].

Жартылай автоматты блоктау жүйесінде:

$$T_{аралық}=T_{қауіпсіз}+T_{блок}+T_{кезекші}=286,36+60+30=376,36 \quad \text{с}$$

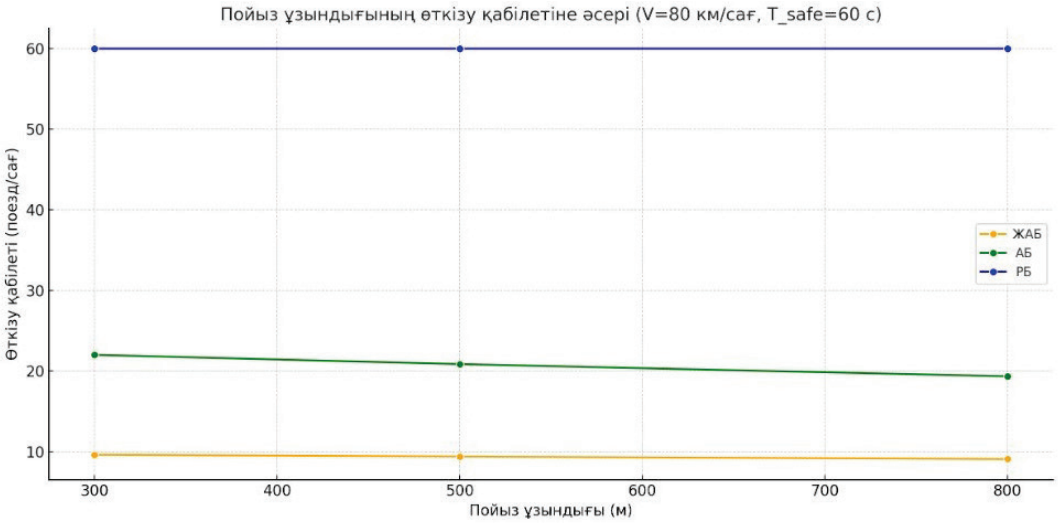
Ал автоматты блоктау жүйесінде:

$$T_{аралық}=T_{қауіпсіз}+T_{блок}=104,55+60=164,55 \quad \text{с}$$

Радиоблоктау жүйесі үшін қабылданған минималды уақыт аралығы – қауіпсіз интервал мен пойыздың ұзындығын ескере отырып, тежеу есебі (қысқаша түрде):

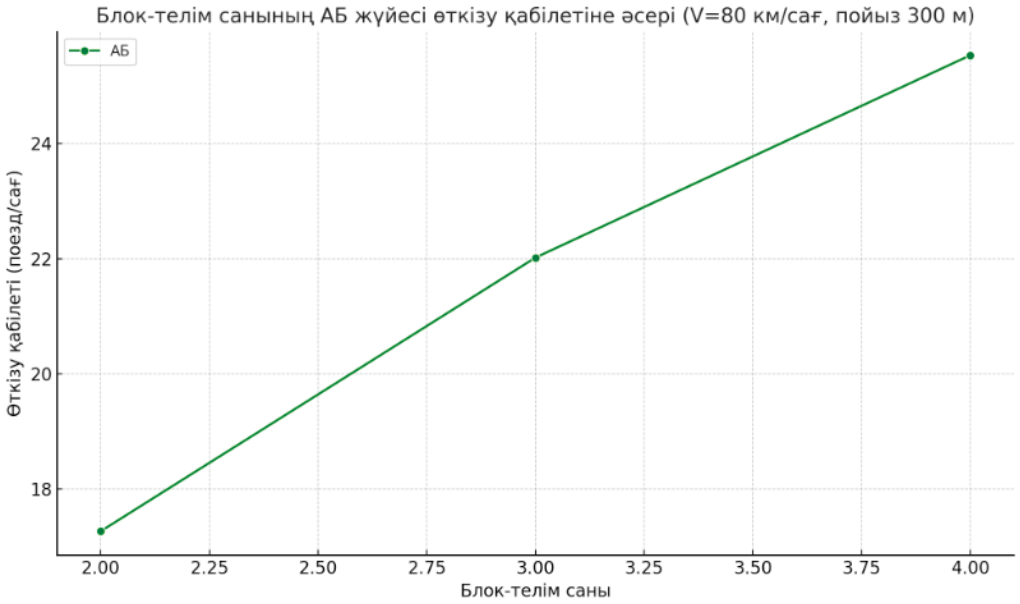
$$T_{аралық}=T_{блок}=60 \quad \text{с}$$

2 диаграммада пойыз ұзындығының аралықтың өткізу қабілетіне тәуелділік графигі келтірілген. Бұл ретте, ЖАБ және АБ жүйелерінің өткізу қабілеті төмендейтінін байқауға болады. Ал, радиоблоктау жүйесі бұл параметрге тәуелді емес, себебі ол тек қауіпсіз интервалмен ғана шектеледі.



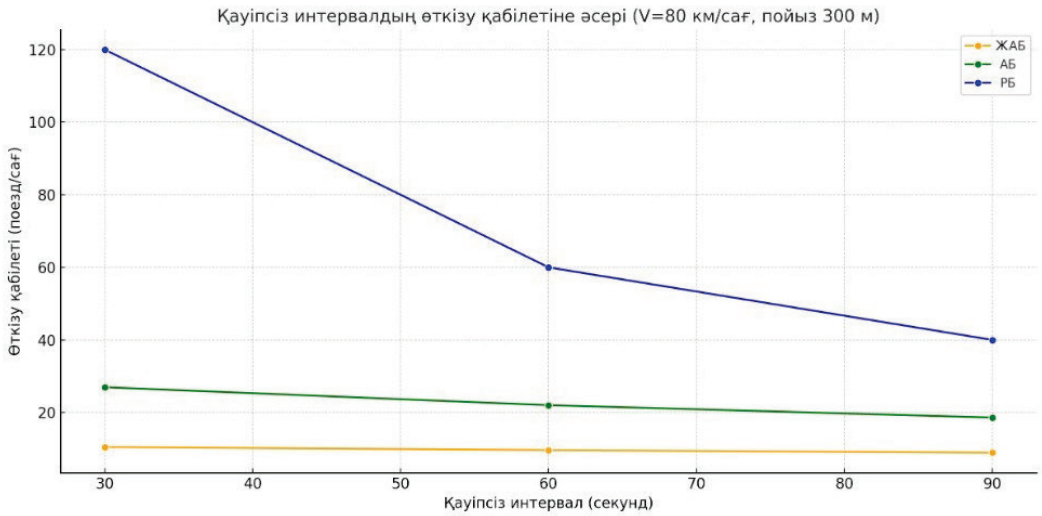

2-диаграмма – Пойыз ұзындығының аралықтың өткізу қабілетіне әсері

Аралықтың блок-телімдерге бөлінуіне байланысты блок-телім саны артқан сайын, автоматты блоктау жүйесінің өткізу қабілеті жоғарлайтынын байқауға болады (Диаграмма 3). Себебі аралық бірнеше бөлікке бөлінеді және пойыздар бір-бірінен қысқа қашықтықта қозғала алады.




3-диаграмма – Блок-телім санының аралықтың өткізу қабілетіне әсері

Ал 4 диаграммада қауіпсіз интервал артқан сайын барлық жүйелердің өткізу қабілеті төмендейтінін байқауға болады.




4-диаграмма – Қауіпсіз интервалдың аралықтың өткізу қабілетіне әсері

Жоғарыдағы көрсеткіштерді ескере отыра, 1 сағат ішінде аралықтың өткізу қабілеті үш жүйе үшін келесідей есептеледі.

Жартылай автоматты блоктау жүйесінде:

$$N_{жартылай\ автоматты\ блоктау} = \frac{3600}{T_{аралық}} = \frac{3600}{376,36} = 9,6 \quad \text{пойыз/сағат}$$

Автоматты блоктау жүйелері үшін:

$$N_{автоматты\ блоктау} = \frac{3600}{T_{аралық}} = \frac{3600}{164,55} = 21,88 \quad \text{пойыз/сағат}$$

Радиоблоктау жүйелері үшін:

$$N_{радиоблоктау} = \frac{3600}{T_{аралық}} = \frac{3600}{60} = 60 \quad \text{пойыз/сағат}$$

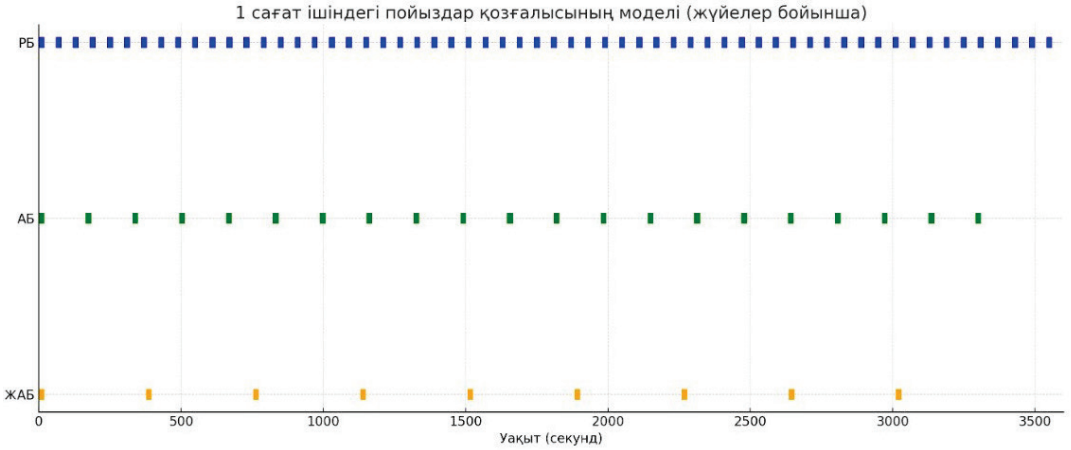
Зерттеу нәтижесінде жартылай автоматты блоктау, автоматты блоктау және радиоблоктау жүйелерінің өткізу қабілеті бірдей бастапқы параметрлер негізінде салыстырылды. Үлгілік жағдайда пойыз қозғалысы келесі шарттармен модельденді: аралық ұзындығы – 6000 метр, пойыз ұзындығы – 300 метр, қозғалыс жылдамдығы – 80 км/сағ (22 м/с), қауіпсіз интервал – 60 секунд, ал жартылай автоматты жүйедегі бекет кезекшісінің орташа уақыты – 30 секунд деп алынды.

Жартылай автоматты блоктау жағдайында, пойыздар тек аралықты толық өтіп, кезекші рұқсат бергеннен кейін ғана қозғалысты жалғастыра алады. Осы шектеулерге байланысты өткізу қабілеті шамамен 9,6 пойыз/сағат деңгейінде болды.

Автоматты блоктау жүйесінде аралық бірнеше блокқа бөлінеді және белгі беру автоматты түрде әрекет етеді. Мұндай жағдайда қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ете отырып, 21,9 пойыз/сағат өткізуге мүмкіндік туады.

Радиоблоктау жүйесінде блоктарға тәуелділік жойылып, пойыздар арасындағы арақашықтық нақты координаттар мен тежеу жолына негізделіп динамикалық түрде бақыланады. Бұл әдіс арқылы жүйе 60 пойыз/сағат өткізуге қабілетті екенін көрсетті.

Жоғарыда көрсетілген үш жүйе бойынша 1 сағат көлемінде жүріп өтетін пойыз құрамдарының сандық визуализациясы 5 диаграммада көрсетілді.




5-диаграмма – 1 сағат көлемінде жүріп өтетін пойыз құрамдарының сандық визуализациясы

Қорытындылай келе, интервалды реттеу жүйесінің түрі теміржол телімінің өткізу қабілетіне тікелей әсер етеді. Жүйе неғұрлым технологиялық жағынан жетілген болса, соғұрлым пойыздар қозғалысы жиілеп, теміржол желісінің тиімділігі артады. Радиоблоктау жүйесі – қазіргі заманғы ең озық әдіс ретінде, пойыздарды тығыз әрі қауіпсіз өткізуді қамтамасыз етіп, теміржол желісінің өткізу мүмкіндігін бірнеше есеге арттырады.

Қаржыландыру. Мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым Комитетінің қаржылық қолдауымен, ИРН AP22685501 «Пойыздар қозғалысын интервалды реттеу жүйелерінің темір жол желілерінің өткізу қабілеттілігіне әсерін бағалау» жобасы аясында жүзеге асырылды.

**Қорытынды**

Интервалды реттеу жүйелерінің түрі теміржолдың телімінің өткізу мүмкіндігіне елеулі әсер етеді. Жартылай автоматты жүйе қауіпсіздік тұрғысынан тиімді болғанымен, оның өнімділігі шектеулі. Автоматты блоктау жүйесі әлдеқайда тиімді, алайда нақты уақыттағы мәліметтермен жұмыс істейтін радиоблоктау жүйесі қазіргі заманғы жоғары жүктемелі желілер үшін ең ұтымды шешім болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Сансызбай, Қ., Орунбеков, М., Шукаманов, Ж., Тасболатова, Л., Сагмединов, Д.** Общие тенденции развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики на сети железных дорог Казахстана. Вестник КазАТК. – 2022. – № 2. – С. 414–424.

2 **Кожемяко, С. В., Труфанов, В. В.** Моделирование интервалов между поездами в условиях цифровизации железнодорожного транспорта. // Транспортное дело России. – 2021. – № 3. – С. 55–61.

3 **Никитин, В. М., Астафьев, В. Н.** Повышение пропускной способности железнодорожных участков с использованием современных систем диспетчеризации. // Научный вестник МИИТа. – 2020. – № 4. – С. 32–38.

4 **Урлапов, С. А., Алексеев, А. С.** Анализ эффективности радиоблокировки на перегонных участках железных дорог. // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2020. – № 1. – С. 47–52.

5 **Pachl, J.** Railway Operation and Control. – Hamburg: VTD Rail Publishing. – 2018. – 184 p.

6 **Bashiri, M., Abbassi, M.** A Simulation-based approach for train scheduling considering block systems. In: Simulation Modelling Practice and Theory. – 2015. – Vol. 57. – P. 120–135.

7 **Folega, P., Irlik, M., Kochan, A., Wojnar, G.** Railway Line Capacity Relative to Additional Block Division. – 2024. – 36(1). – P. 42–54.

8 **Tao, X., Zhou, Y., Mei, Y., Fujita, H.** Parallel simulation of high-speed trains controlled by radio block centers using Spark cloud. Journal of Rail Transport Planning Management. – 2023. – Vol.15. – P. 471–492

9 **Zhang, Y., Wang, Y., Xu, W.** Capacity evaluation of railway lines under moving block-signaling system. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 124. – P. 102918.

10 **Liu, R., Ning, B., Tang, T.** Optimizing train headways under Communication-Based Train Control (CBTC) for metro lines. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23. – P. 1276–1285.

REFERENCES

1 **Sansyzbai, K., Orunbekov, M., Shukamanov, Zh., Tasbolatova, L., Sagmedinov, D.** Obshchie tendencii razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki na seti zheleznyh dorog Kazahstana [General trends in the development of railway automation and telemechanics systems on the railway network of Kazakhstan]. Vestnik KazATK. – 2022. – № 2. – P. 414–424.

2 **Kozhemyako, S. V., Trufanov, V. V.** Modelirovanie intervalov mezhdu poezdami v usloviyah cifrovizacii zheleznodorozhnogo transporta [Simulation of train intervals in the context of digitalization of railway transport]. // Transportnoe delo Rossii. – 2021. – № 3. – P. 55–61.

3 **Nikitin, V. M., Astaf'ev, V. N.** Povyshenie propusknoj sposobnosti zheleznodorozhnyh uchastkov s ispol'zovaniem sovremennyh sistem dispetcherizacii [Increasing the capacity of railway sections using modern dispatching systems]. // Nauchnyj vestnik MIITa. – 2020. – № 4. – P. 32–38.

4 **Urlapov, S. A., Alekseev, A. S.** Analiz effektivnosti radioblokirovki na peregonnyh uchastkah zheleznyh dorog [Analysis of the effectiveness of radio blocking on railway sections]. // Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologij i upravleniya. – 2020. – № 1. – P. 47–52.

5 **Pachl, J.** Railway Operation and Control. – Hamburg: VTD Rail Publishing. – 2018. – 184 p.

6 **Bashiri, M., Abbassi, M.** A Simulation-based approach for train scheduling considering block systems. In: Simulation Modelling Practice and Theory. – 2015. – Vol. 57. – P. 120–135.

7 **Folega, P., Irlik, M., Kochan, A., Wojnar, G.** Railway Line Capacity Relative to Additional Block Division. – 2024. – 36(1). – P. 42–54.

8 **Tao, X., Zhou, Y., Mei, Y., Fujita, H.** Parallel simulation of high-speed trains controlled by radio block centers using Spark cloud. Journal of Rail Transport Planning Management. – 2023. – Vol.15. – P. 471–492.

9 **Zhang, Y., Wang, Y., Xu, W.** Capacity evaluation of railway lines under moving block-signaling system. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 124. – P. 102918.

10 **Liu, R., Ning, B., Tang, T.** Optimizing train headways under Communication-Based Train Control (CBTC) for metro lines. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23. – P. 1276–1285.

17.06.25 ж. баспаға түсті.
25.06.25 ж. түзетулерімен түсті.
14.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Ж. Е. Шукаманов[1], Г. А. Сүлейменова[2], С. Павлов[3]**
[1]Таразский университет имени М. Х. Дулати, Республика Казахстан, г. Тараз;
[2]ALT университет имени М.Тынышпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Винницкий национальный технический университет,
Республика Украина, г. Винница.
Поступило в редакцию 17.06.25.
Поступило с исправлениями 25.06.25.
Принято в печать 14.08.25.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕГОНА В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

*В данной статье проанализированы принципы работы систем полуавтоматической блокировки, автоматической блокировки и радиоблокировки, применяемых в целях обеспечения безопасности движения поездов и пропускной способности на железнодорожной линии. Описаны структурные и функциональные особенности каждой системы, изучены механизмы интервальной регуляции движения и логика перемещения поездов с помощью методов математического моделирования.*

*В ходе исследования был проведен количественный анализ пропускной способности каждой системы с учетом таких основных параметров, как длина интервала, плавная скорость движения поездов, тормозной путь, безопасный интервал и время действия дежурных. Результаты моделирования наглядно продемонстрировали технические возможности и ограничения каждой системы.*

*Согласно расчетам в типовых условиях, показатели пропускной способности определялись в системе полуавтоматической блокировки на уровне около 9,6 поездов/час, в автоматической блокировке – 21,9 поездов/час, а в радиоблокировке – 60 поездов/час. Эти результаты показали, что соответствующие системы напрямую связаны с точностью управления интервалами, методами измерения расстояний между поездами и уровнем средств сигнализации.*

*Сравнительная эффективность систем была определена с помощью диаграмм и других визуальных средств, что позволяет проводить инженерное обоснование при принятии технических решений. Кроме того, результаты исследования доказывают актуальность внедрения цифровых систем управления в современной железнодорожной сети, в частности технологии радиоблокировки, и ее стратегические преимущества в транспортной логистике.*

*Ключевые слова: движение поездов, интервальное регулирование, пропускная способность, полуавтоматическая блокировка, автоматическая блокировка, радиоблокировка, моделирование.*

***Zh. Shukamanov[1], G. Suleimenova[2], S. Pavlov[3]***
[1]M. H. Dulati Taraz University, Republic of Kazakhstan, Taraz;
[2]ALT University named after M.Tynyshpaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Vinnytsia National Technical University, Ukraine, Vinnytsia.
Received 17.06.25.
Received in revised form 25.06.25.
Accepted for publication 14.08.25.

## SIMULATION OF THE BANDWIDTH OF THE INTERVAL IN VARIOUS SYSTEMS OF INTERVAL REGULATION OF TRAIN MOVEMENT

*This article analyzed the principles of operation of semi-automatic blocking, automatic blocking and radio blocking systems used in order to ensure the safety and throughput of train traffic on the railway network. The structural and functional features of each system were described, the mechanisms of interval regulation of*

*movement and the logic of train displacement were studied using mathematical modeling methods.*

*In the course of the study, a quantitative analysis of the throughput of each system was carried out, taking into account such basic parameters as the length of the interval, the speed of smooth movement of trains, the braking path, the safe interval and the time of action of the duty. The results of the model simulation clearly demonstrated the technical capabilities and limitations of each system.*

*According to calculations in typical conditions, the throughput indicators were determined in the semi – automatic blocking system at the level of about 9.6 trains/hour, in automatic blocking – 21.9 trains/hour, and in radio blocking – 60 trains/hour. These results showed that the relevant systems directly depend on the accuracy of interval control, methods for measuring distances between trains, and the level of signaling devices.*

*The relative efficiency of the systems has been determined using diagrams and other visual tools, which makes it possible to create an engineering justification in the process of making a technical decision. In addition, the results of the study prove the relevance of the introduction of digital control systems in the modern railway network, in particular radio blocking technologies, and its strategic advantages in transport logistics.*

*Keywords: train movement, interval control, throughput, semi-automatic blocking, automatic blocking, radio blocking, simulation.*

***СТРОИТЕЛЬСТВО***

МРНТИ 67.11.31

https://doi.org/10.48081/ZENW9685

***В. А. Никитин[1], К. Т. Саканов[2], К. Т. Макашев[3]***

[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4905-2576

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2897-2947

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2971-6322

*e-mail: nik07.vv@gmail.com

# *ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БАЛОК ИЗ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА И СТАЛЕФИБРОБЕТОНА*

*В данной работе исследуется проектирование железобетонных и сталефибробетонных балок с акцентом на их армирование, несущую способность, деформационные характеристики и экономическую эффективность. Рассмотрены три возможных варианта армирования железобетонной балки с учетом требуемой площади рабочей арматуры и конструктивных особенностей: использование 2 стержней диаметром 28 мм., 3 стержней диаметром 25 мм. и 4 стержней диаметром 20 мм. Анализ показал, что наиболее эффективными с точки зрения несущей способности и экономии материала являются варианты с 2 стержнями диаметром 28 мм. и 4 стержнями диаметром 20 мм., при этом вариант с 3 стержнями диаметром 25 мм. не оправдывает перерасход материала. В случае применения сталефибробетона класса В25 было продемонстрировано снижение расхода арматуры на 15% при сохранении несущей способности и улучшении деформационных характеристик, что выражается в уменьшении прогиба на 14%. Применение сталефибробетона позволило также снизить трудозатраты на 25-30% и сократить сроки монтажа. Важным аспектом является также использование преднапряженной арматуры, что способствует снижению величины прогибов и уменьшению трещинообразования. Исследование показало высокую эффективность применения современных строительных материалов и технологий, способствующих улучшению эксплуатационных характеристик конструкций при снижении их стоимости и трудозатрат.*

*Ключевые слова: трещиностойкость, деформативность, сталефибробетон, железобетонная балка, арматура, тяжелый бетон.*

**Введение**

Бетонные и железобетонные конструкции составляют основу современного строительства, обеспечивая несущую способность и устойчивость зданий и сооружений. Однако одной из главных проблем, влияющих на их долговечность и эксплуатационные свойства, является образование трещин и чрезмерных

деформаций. Эти процессы не только снижают надежность и безопасность конструкций, но и вызывают значительные экономические потери, связанные с необходимостью усиления с целью восстановления экспериментальных требований.

Железобетонные конструкции подвержены образованию трещин под влиянием различных факторов. Одной из ключевых причин является силовое воздействие, при котором нагрузки превышают допустимые значения, вызывая разрушение конструкций. Еще одним значимым фактором выступает усадка бетона в процессе высыхания, приводящая к внутренним напряжениям и растрескиванию. К аналогичным последствиям ведут температурные колебания, провоцирующие различные деформации бетона и стальной арматуры. Отдельного внимания заслуживает коррозия металлических элементов, которая развивается при повреждении защитного слоя и усиливает деформационные процессы. Немаловажную роль играют и ошибки, допущенные на этапах проектирования или строительства, такие как недостаточное армирование, применение низкокачественных материалов или нарушение технологических норм.

В изгибаемых элементах трещины подразделяются на несколько типов в зависимости от природы их возникновения. Конструкционные дефекты образуются при превышении пределов прочности на растяжение и располагаются преимущественно перпендикулярно оси элемента. Усадочные трещины проявляются на начальных стадиях твердения бетонной смеси, тогда как температурные чаще встречаются в массивных конструкциях, испытывающих значительные перепады нагрева и охлаждения. Технологические дефекты становятся следствием нарушений в процессе укладки и ухода за бетоном.

Последствия трещинообразования могут быть крайне серьезными. Во - первых, снижается несущая способность конструкции, что ставит под угрозу ее прочность. Во - вторых, проникновение влаги через трещины ускоряет коррозию арматуры, сокращая срок ее службы объекта. В - третьих, чрезмерные деформации делают эксплуатацию невозможной из-за потери безопасности [1]. Наконец, финансовые затраты на восстановительные работы значительно возрастают, что негативно сказывается на экономической эффективности конструкции.

Для повышения надежности конструкций требуются современные методы, направленные на увеличение их трещиностойкости. Эффективным решением может стать оптимизация армирования, включая использование композитных материалов вместо традиционной стали, а также применение численного моделирования в «Лира САПР». Этот подход позволяет заранее прогнозировать поведение конструкции под нагрузкой и вносить необходимые корректировки еще на этапе проектирования [2, с. 3].

Основной целью исследования является разработка методики оценки трещиностойкости и прогиба изгибаемых железобетонных элементов с использованием возможностей «Лира САПР». В рамках работы анализируются изначальный подбор арматуры, в последствии изменения арматуры и бетона для достижения удовлетворительных показателей, в том числе и экономических.

**Материалы и методы**

Вопросы трещиностойкости и деформативности железобетонных конструкций активно исследуются в научной литературе. Например, Трёкин, Н. Н., Кодыш, Э. Н., Андрян, К. Р. предложили методику расчета трещинообразования в изгибаемых элементах круглого сечения, используя нелинейную деформационную модель и билинейную диаграмму состояния бетона [2].

Запруцкий, А. А. и Шляхова, Е. А. изучили влияние вида крупного заполнителя на прочность бетона при растяжении, предложив метод оперативного контроля трещиностойкости [3].

Маилян, Д. Р., Несветаев, Г. В. и Коллеганов, Н. А. разработали методику определения трещинообразующих усилий в железобетонных балках, учитывая влияние точности экспериментальных данных на расчетные зависимости [4].

Для исследования выбран тяжелый бетон класса В25 [5] который широко применяется в строительстве благодаря оптимальному сочетанию прочности, долговечности и экономичности, а также сталефибробетон В25 с добавкой стальной фибры.

Основные характеристики бетона В25:

– прочность на сжатие - 25 МПа (нормативное значение) или 28,5–32,5 МПа (фактическая прочность через 28 суток);

– марка по морозостойкости (F) - F100 - F200, в зависимости от добавок;

– марка по водонепроницаемости (W) - W4 - W6, может повышаться с применением гидрофобных добавок;

– модуль упругости - 30000 МПа (зависит от заполнителей и возраста бетона).

В качестве арматуры выбрана сталь класса А500С [6], которая отличается высокими механическими свойствами и соответствует современным стандартам.

Основные характеристики арматуры А500С:

– класс прочности - 500 МПа (предел текучести);

– диаметры - Ø6 - 40 мм (чаще всего Ø12 - Ø32);

расчётное сопротивление - 435 МПа (растяжение), 400 МПа (сжатие).

Для численного моделирования в программном комплексе «Лира САПР» была выбрана железобетонная балка с геометрическими параметрами, используемым при строительстве промышленных зданий. В данном примере был выбран машиностроительный цех, главная балка на 1 этаже.

Исходные данные для обеих балок:

– длина пролета 6 метров. Расчетная длина пролета – 5,9 м.;

– прямоугольное сечение 200×400 мм.;

– рабочая высота - 370 мм.;

– бетон тяжелый класса В25;

– сталефибробетон класса В25 (осевое растяжение – 2,4 МПа, осевое сжатие – 18,5 МПа, модуль упругости – 35000 МПа);

– продольная рабочая арматура класса А500С;

– попереченая арматура класса А240;

– постоянная равномерно-распределенная нагрузка - 14 кН/м.;

– длительная равномерно-распределенная нагрузка - 8 кН/м.;

– кратковременная равномерно-распределенная нагрузка - 10 кН/м.

Выбор данных параметров обусловлен их распространенностью в строительной практике, что позволяет обеспечить актуальность и практическую значимость исследования.

**Результаты и обсуждение**

Проведен расчет площади продольной рабочей арматуры, а также конструктивного и поперечного армирования балки. В основу вычислений положены сочетания нагрузок, включающие постоянные, длительные и кратковременные. Расчет выполнен по предельным состояниям в соответствии с действующими нормами.

Определение параметров армирования выполнено с учетом действующих изгибающих моментов и поперечных сил. Продольная арматура рассчитана на восприятие основных усилий, конструктивное армирование обеспечивает целостность конструкции, а поперечное – прочность к сдвигающим напряжениям.

Результаты расчета прошли проверку на соответствие требованиям по прочности, жесткости и трещиностойкости [7].

| ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ |
|---|
| Сечения - см<br>Длины - м<br>Напряжения - Mpa<br>N,Qy,Qz - кН<br>Mkp,My,Mz - кН*м |
| **ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ** |
| Класс бетона - C20/25<br>fck = 20 ; fctk = 1.5 ; Ec = 30000 ;<br>Класс продольной арматуры X - A500<br>fyk = 500 ; Es = 200000 ;<br>Класс поперечной арматуры - A240<br>fyk = 240 ; Es = 200000 ;<br>Расстояние к центру тяжести арматуры: снизу = 3 сверху = 3 сбоку = 3.<br>Диаметр арматурных стержней 28 мм<br><br>Максимальный диаметр 28.00 мм |

Рисунок 1 – Характеристики материалов для заданной балки

| АРМАТУРА<br>Режим: Подбор арматуры | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AU1 | AU2 | AU3 | AU4 | AS1 | AS2 | AS3 | AS4 | % | ASW1 | ASW2 | Тр.крат. | Тр.длит. |
| Сечение: 1 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 11.61 | 2.84 | | | 17.71 | 2.07 | | 0.18 | |
| | | | | 11.61 | 2.84 | | | 17.71 | | | | |
| Сечение: 2 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 11.77 | 3.04 | | | 18.15 | 2.07 | | 0.18 | |
| | | | | 11.77 | 3.04 | | | 18.15 | | | | |
| Сечение: 3 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 11.93 | 3.16 | | | 18.50 | 2.07 | | 0.18 | |
| | | | | 11.93 | 3.16 | | | 18.50 | | | | |
| Сечение: 4 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 12.01 | 3.24 | | | 18.69 | 2.07 | | 0.18 | |
| | | | | 12.01 | 3.24 | | | 18.69 | | | | |
| Сечение: 5 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 12.01 | 3.28 | | | 18.74 | | | 0.18 | |
| | | | | 12.01 | 3.28 | | | 18.74 | | | | |

Рисунок 2 – Подбор арматуры для заданной балки

При проектировании железобетонной балки была определена требуемая площадь продольной рабочей арматуры, составившая 12,01 см². Рассмотрим возможные варианты армирования и проведем их комплексный анализ с

учетом несущей способности, конструктивных особенностей и экономической эффективности.

Возможны три варианта армирования с учетом требуемой площади:

– использование 2 стержней диаметром 28 мм. (фактическая площадь 12,32 см²);

– 3 стержней диаметром 25 мм. (14,73 см²);

– 4 стержней диаметром 20 мм (12,56 см²).

Все варианты удовлетворяют нормативным требованиям по минимальной площади сечения, однако имеют существенные различия.

С точки зрения несущей способности наиболее рациональными являются варианты с 2⌀28 и 4⌀20, так как они обеспечивают площадь, наиболее близкую к расчетной. Превышение составляет 2,6 % и 4,6 % соответственно. При этом все стержни располагаются на одном расстоянии от сжатой грани сечения.

Вариант с 3⌀25 дает значительное превышение площади - 22,6 %, что приводит к неоправданному перерасходу материала без существенного увеличения прочности конструкции.

Конструктивные особенности различных вариантов имеют свои преимущества и недостатки. Крупные стержни диаметром 28 мм. обеспечивают меньшее количество стыков, что повышает надежность конструкции, но могут создавать сложности при размещении в узких сечениях, в особенности в заданной балке 20х40 см. и требуют более тщательной анкеровки. Мелкие стержни диаметром 20 мм., напротив, обеспечивают лучшее распределение в сечении и большую гибкость при монтаже, однако увеличивают количество стыков, что требует особого внимания к зонам сопряжений.

Экономический анализ показывает, что вариант с 4 стержнями диаметром 20 мм. является наиболее выгодным. Несмотря на больший метраж арматуры по сравнению с вариантом 2⌀28, стоимость материала оказывается ниже за счет более выгодной цены мелких диаметров. При этом трудозатраты на монтаж обоих вариантов сопоставимы, так как увеличение количества стержней компенсируется удобством работы с ними.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что оптимальным выбором является армирование 4 стержнями диаметром 20 мм. Этот вариант обеспечивает необходимую несущую способность при наиболее экономически выгодных условиях и достаточной конструктивной надежности. Вариант с 3 стержнями диаметром 25 мм. не рекомендуется к применению из-за нерационального расхода материала.

Подробный анализ конструктивной и поперечной арматуры в данном исследовании не предусмотрен.

На рисунке 2 показано кратковременное раскрытие трещин, значение равное 0,18 мм. Условие трещиностойкости выполняется, так как не должно превышать более 0,4 мм.

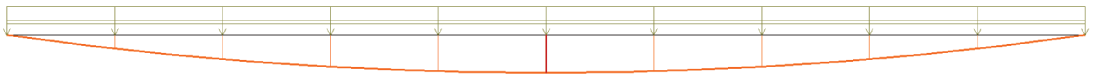


Рисунок 3 – Эпюра изгибающих моментов

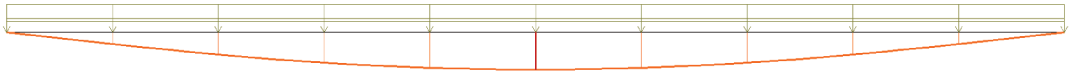


Рисунок 4 – Эпюра прогиба

На эпюре изгибающих моментов видно, что величина момента 120 кН*м. На эпюре прогиба, прогиб равен 14 мм, что соответствует условию L/250, где для заданной балки критический прогиб равен 24 мм.

Для того, чтобы повысить прочностные характеристики заданной балки, проанализируем использование сталефибробетона класса В25.

**АРМАТУРА**
**Режим: Подбор арматуры**

| AU1 | AU2 | AU3 | AU4 | AS1 | AS2 | AS3 | AS4 | % | ASW1 | ASW2 | Тр.крат. | Тр.длит. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сечение: 1 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 10.03 | | | | 12.29 | | | 0.30 | 0.30 |
| | | | | 8.81 | | | | 10.80 | | | | |
| Сечение: 2 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 10.10 | | | | 12.38 | | | 0.30 | 0.30 |
| | | | | 9.05 | | | | 11.09 | | | | |
| Сечение: 3 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 10.15 | | | | 12.44 | | | 0.30 | 0.30 |
| | | | | 9.17 | | | | 11.24 | | | | |
| Сечение: 4 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 10.18 | | | | 12.48 | | | 0.30 | 0.30 |
| | | | | 9.29 | | | | 11.39 | | | | |
| Сечение: 5 Несимметричное армирование | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 10.19 | | | | 12.49 | | | 0.30 | 0.30 |
| | | | | 9.29 | | | | 11.39 | | | | |

Рисунок 5 – Подбор арматуры для балки из сталефибробетона

При проектировании сталефибробетонной балки была определена требуемая площадь продольной рабочей арматуры, составившая 10,19 см$^2$., что на 15 % меньше при использовании тяжелого бетона В25.

Рассмотрим возможные варианты армирования и проведем их комплексный анализ с учетом несущей способности, конструктивных особенностей и экономической эффективности. Для обеспечения необходимой площади армирования возможны три варианта:

– использование 2 стержней диаметром 28 мм. (фактическая площадь 12,32 см$^2$);

– 3 стержней диаметром 22 мм. (11,41 см$^2$);

– 4 стержней диаметром 20 мм (12,56 см$^2$).

Учитывая конструктивные требования и технико-экономические показатели, наиболее выгодным вариантом будет использовать 3 стержня диаметром 22 мм. [8].

Сталефибробетонная балка, сечением 20×40 см., при сохранении изгибающего момента на уровне 120 кН*м., демонстрирует улучшение деформационных характеристик конструкции. Экспериментальные данные показывают снижение

величины прогиба с 14 мм. до 12 мм., что составляет 85,7 % от исходного значения и полностью удовлетворяет нормативному требованию.

Особенностью сталефибробетона является возможность полного исключения конструктивного и поперечного армирования, что обеспечивает экономию стальной арматуры на 15–20 % без снижения несущей способности. Однако следует учитывать, что фибровое армирование начинает эффективно работать только после достижения критического раскрытия трещин 0,3 мм., что на 0,12 мм. превышает аналогичный показатель для тяжелого бетона класса В25. Данное обстоятельство требует особого внимания при проектировании элементов, работающих в условиях повышенных требований к трещиностойкости [9].

С экономической точки зрения применение сталефибробетона позволяет сократить трудозатраты на 25–30 %, снизить стоимость конструкции на 12–15 % и уменьшить сроки монтажа на 20 %. При этом необходимо обеспечить строгий контроль качества бетонирования и использовать фибру с гарантированными характеристиками. Полученные результаты свидетельствуют о технической целесообразности и экономической эффективности применения сталефибробетона в рассматриваемых условиях нагружения [10].

Одним из эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик является применение преднапряженной арматуры. Введение предварительного напряжения создаёт в бетоне сжимающие напряжения, которые компенсируют растягивающие усилия от внешних нагрузок. Это позволяет не только уменьшить величину прогибов на 25–40 %, но и существенно снизить вероятность образования трещин, а также ограничить их раскрытие в процессе эксплуатации.

Наряду с преднапряжением, значительное влияние на деформативность конструкции оказывают процессы усадки бетона. Усадочные деформации развиваются в течение всего периода твердения бетона и могут достигать существенных величин. Особенно это касается конструкций с большими поверхностями испарения, где скорость высыхания бетона значительно возрастает. Для компенсации усадочных деформаций рекомендуется применять специальные добавки, снижающие усадку, или использовать конструктивные решения, позволяющие равномерно распределить возникающие напряжения.

Отдельного рассмотрения заслуживает влияние условий высыхания бетона на его деформативные характеристики. При интенсивном испарении влаги с поверхности могут возникать дополнительные напряжения, приводящие к преждевременному образованию трещин. Для минимизации этого эффекта необходимо обеспечить оптимальные условия твердения, включая поддержание влажностного режима и температурного контроля в начальный период набора прочности. Комплексный учёт всех перечисленных факторов позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики конструкции, обеспечив её долговечность и надёжность в течение всего срока службы [11].

**Вывод**

Проведенное исследование позволило выявить ключевые направления оптимизации деформативности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных

элементов. Результаты анализа подтверждают, что достижение необходимых эксплуатационных характеристик требует комплексного подхода, учитывающего как материальные, так и конструктивные факторы.

Применение современных материалов, включая сталефибробетон и композитную арматуру, демонстрирует значительный потенциал для улучшения технико-экономических показателей конструкций. В частности, использование сталефибробетона класса В25 позволило снизить прогибы на 14 % и сократить расход традиционной арматуры на 15 % при сохранении несущей способности. Однако эффективность таких решений напрямую зависит от соблюдения технологических требований, особенно в части контроля трещинообразования на ранних стадиях твердения бетона.

Особое внимание в работе уделено методике численного моделирования в программном комплексе «Лира САПР», которая обеспечивает точный прогноз деформационных характеристик на этапе проектирования. Установлено, что учет факторов усадки, ползучести и условий высыхания бетона позволяет минимизировать риски преждевременного трещинообразования.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка комбинированных решений, сочетающих преимущества преднапряженной арматуры, фибрового армирования и модифицированных бетонных смесей. Это позволит создать конструкции с оптимальным соотношением прочности, долговечности и экономической эффективности, соответствующие современным требованиям строительной отрасли.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Саканов, К. Т.** Несущая способность, жесткость и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов с учетом влияния формы их поперечного сечения : Диссертация. – М. : 1985. – 195 с.

2 **Трёкин, Н. Н., Кодыш, Э. Н., Андрян, К. Р.** Трещиностойкость железобетонных конструкций круглых сечений // Academia. Архитектура и строительство. – 2022. – № 3. – С. 104–109.

3 **Запруцкий, А. А., Шляхова, Е. А.** Способ повышения трещиностойкости железобетонных свай квадратного сечения // Молодой исследователь Дона. – 2019. – № 5(20). – С. 17–22.

4 **Маилян, Д. Р., Несветаев, Г. В., Коллеганов, Н. А.** К определению трещиностойкости железобетонных балок из различных видов бетона // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 1. – С. 1–16.

5 ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2016. – 32 с.

6 ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2017. – 24 с.

7 СП РК EN 1992-1-1:2004/2011. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Алматы : КазНИИСА, 2016. – 259 с.

8 НТП РК 02-01-1.1-2011. Проектирование бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых бетонов без предварительного напряжения арматуры. - Астана : КазНИИСА, 2015. – 258 с.

9 **Капустин, Д. Е.** Влияние параметров дисперсного армирования на ползучесть высокопрочного сталефибробетона // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13. – № 1. – С. 98–108.

10 Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete : ACI 544.4R-18 / Reported by ACI Committee 544. – Farmington Hills: American Concrete Institute, 2018. – P. 7–8.

11 **Байков, В. Н., Сигалов, Э. Е.** Железобетонные конструкции : общий курс : учебник для вузов / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – 6-е изд., репринтное. – М. : ООО «БАСТЕТ», 2009. – 768 с.

REFERENCES

1 **Sakanov, K. T.** Nesushchaya sposobnost’, zhestkost’ i treshchinostoikost’ izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s uchetom vliyaniya formy ikh poperechnogo secheniya : dissertatsiya [Load-Bearing Capacity, Stiffness, and Crack Resistance of Flexural Reinforced Concrete Elements Considering the Cross-Section Shape]. – Moscow, 1985. – 195 p.

2 **Trekin, N. N., Kodysh, E. N., Andryan, K. R.** Treshchinostoikost’ zhelezobetonnykh konstruktsii kruglykh sechenii [Crack Resistance of Reinforced Concrete Structures with Circular Sections] // Academia. Arkhitektura i stroitel’stvo [Academia. Architecture and Construction]. – 2022. – № 3. – P. 104–109.

3 **Zaprutskiy, A. A., Shlyakhova, E. A.** Sposob povysheniya treshchinostoikosti zhelezobetonnykh svay kvadratnogo secheniya [Method for Increasing the Crack Resistance of Reinforced Concrete Piles with Square Cross-Section] // Molodoy issledovatel’ Dona [Young Researcher of the Don]. – 2019. – № 5(20). – P. 17–22.

4 **Mailyan, D. R., Nesvetaev, G. V., Kolleganov, N. A.** K opredeleniyu treshchinostoikosti zhelezobetonnykh balok iz razlichnykh vidov betona [On the Determination of Crack Resistance of Reinforced Concrete Beams Made from Different Types of Concrete] // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. – 2023. – № 1. – P. 1–16.

5 GOST 26633-2015. Betony tyazhelye i melkoyzernistye. Tekhnicheskie usloviya [Heavyweight and Fine-Grained Concretes. Specifications]. – Moscow: Standartinform, 2016. – 32 p.

6 GOST 34028-2016. Prokat armaturnyy dlya zhelezobetonnykh konstruktsiy. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Reinforcement Steel for Reinforced Concrete Structures. General Specifications]. – Moscow: Standartinform, 2017. – 24 p.

7 SP RK EN 1992-1-1:2004/2011. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy. Chast’ 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy [Design of Reinforced Concrete

Structures. Part 1-1. General Rules and Rules for Buildings]. – Almaty: KazNIISA, 2016. – 259 p.

8 NTP RK 02-01-1.1-2011. Proektirovanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy iz tyazhelykh betonov bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury [Design of Concrete and Reinforced Concrete Structures from Heavyweight Concrete Without Prestressing Reinforcement]. – Astana: KazNIISA, 2015. – 258 p.

9 **Kapustin, D. E.** Vliyanie parametrov dispersnogo armirovaniya na polzuchest' vysokoprochnogo stalefibrobetona [Effect of Dispersed Reinforcement Parameters on the Creep of High-Strength Steel Fiber Concrete] // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. – 2023. – Vol. 13, № 1. – P. 98–108.

10 Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete : ACI 544.4R-18 / Reported by ACI Committee 544. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2018. – P. 7–8.

11 **Baykov, V. N., Sigalov, E. E.** Zhelezobetonnyye konstruktsii: obshchiy kurs: uchebnik dlya vuzov [Reinforced Concrete Structures: General Course: Textbook for Universities] / V. N. Baykov, E. E. Sigalov. – 6th ed., reprint. – Moscow: OOO «BASTET», 2009. – 768 p.

Поступило в редакцию 13.05.25.
Поступило с исправлениями 27.05.25.
Принято в печать 03.06.25.

***В. А. Никитин[1], К. Т. Саканов[2], К. Т. Макашев[3]***
[1,2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
13.05.25 ж. баспаға түсті.
27.05.25 ж. түзетулерімен түсті.
03.06.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## АУЫР БЕТОН МЕН БОЛАТ ТАЛШЫҚТЫ БЕТОННАН ЖАСАЛҒАН АРҚАЛЫҚТАРДЫҢ ЖАРЫҚШАҒАҚТЫЛЫҒЫ МЕН ДЕФОРМАЦИЯҒА БЕЙІМДІЛІГІ

*Бұл жұмыста темірбетонды және сталефибробетонды балкалардың жобалауы зерттеліп, олардың армирлеу, көтеру қабілеті, деформациялық сипаттамалары мен экономикалық тиімділігіне акцент жасалған. Темірбетонды балканың армирлеу үшін жұмыс арматурасының қажетті алаңы мен конструктивтік ерекшеліктерін ескере отырып, үш мүмкін болатын армирлеу нұсқалары қарастырылған: диаметрі 28 мм болатын 2 стерженьді, диаметрі 25 мм болатын 3 стерженьді және диаметрі 20 мм болатын 4 стерженьді қолдану. Талдау нәтижелері бойынша көтеру қабілеті мен материалды үнемдеу тұрғысынан ең тиімді нұсқалар 28 мм диаметрлі 2 стержень мен 20 мм диаметрлі 4 стержень болып табылады, ал 25 мм диаметрлі 3 стерженьді нұсқа материалды артық жұмсауды оправдамайды. В25 класты сталефибробетон қолданылған жағдайда, арматыны 15%-ға үнемдеу сақталған көтеру қабілеті мен деформациялық*

*сипаттамалардың жақсаруы көрсетілді, бұл прогибтің 14%-ға азаюымен көрінеді. Сталефибробетон қолдану сондай-ақ еңбектік шығындарды 25-30%-ға азайтуға және монтаждау мерзімдерін қысқартуға мүмкіндік берді. Маңызды аспект ретінде алдын ала кернеулі арматураның қолданылуы да қарастырылды, бұл прогибтің мөлшерін азайтуға және жарықшақтардың пайда болуын төмендетуге ықпал етеді. Зерттеу қазіргі заманғы құрылыс материалдары мен технологияларын қолданудың жоғары тиімділігін көрсетіп, конструкциялардың пайдалану сипаттамаларын жақсартып, олардың құны мен еңбектік шығындарын азайтуға көмектесетінін дәлелдеді.*

*Кілтті сөздер: жарықшағақтылық, деформацияға бейімділік, болат талшықты бетон, темірбетон арқалық, арматура, ауыр бетон.*

***V. A. Nikitin[1], K. T. Sakanov[2], K. T. Makashev[3]***
[1,2,3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 13.05.25.
Received in revised form 27.05.25.
Accepted for publication 03.06.25.

## CRACK RESISTANCE AND DEFORMABILITY OF BEAMS MADE OF HEAVYWEIGHT CONCRETE AND STEEL FIBER-REINFORCED CONCRETE

*This paper investigates the design of reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete beams, with an emphasis on their reinforcement, load-bearing capacity, deformation characteristics, and economic efficiency. Three possible reinforcement options for the reinforced concrete beam were considered, taking into account the required area of the working reinforcement and the structural features: the use of 2 bars with a diameter of 28 mm, 3 bars with a diameter of 25 mm, and 4 bars with a diameter of 20 mm. The analysis showed that the most effective options in terms of load-bearing capacity and material savings are those with 2 bars with a diameter of 28 mm and 4 bars with a diameter of 20 mm, while the option with 3 bars with a diameter of 25 mm does not justify the excess material consumption. When using B25 class steel fiber-reinforced concrete, a 15 % reduction in reinforcement consumption was demonstrated while maintaining the load-bearing capacity and improving the deformation characteristics, as evidenced by a 14 % reduction in deflection. The use of steel fiber-reinforced concrete also allowed for a 25–30 % reduction in labor costs and a shortening of installation times.*

*An important aspect is the use of prestressed reinforcement, which helps reduce deflection and minimize crack formation. The study demonstrated the high efficiency of modern construction materials and technologies, contributing to the improvement of the operational characteristics of structures while reducing their cost and labor costs.*

*Keywords: crack resistance, deformability, steel fiber-reinforced concrete, reinforced concrete beam, reinforcement, heavyweight concrete.*

МРНТИ 67.07.01

https://doi.org/10.48081/HBZX4057

***Д. С. Свидерская[1], Ю. И. Мазина[2], *М. С. Лебедева[3]***

[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3329-1126

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-2538-0044

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3059-8779

*e-mail: shinonomebless@gmail.com

# *АРХИТЕКТУРА КАК ИСКУССТВО СОЗДАНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭСТЕТИКИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ*

*Эволюционируя, общественные пространства приобрели больший функционал, стали менее хаотичными, но их роль в последнее время перестает учитываться из-за распространения плотной застройки, в результате чего сокращается озеленение, влияющее на экологическую составляющую, практически упраздняются дворовые пространства, что создает проблему безопасности детей и жителей в целом.*

*В связи с этим, в данной статье рассматривается архитектура как процесс, считающий в себе принципы функциональности, гармонии и эстетики и направленный на создание общественных пространств, являющихся неотъемлемой частью городской среды и оказывающих значительное влияние на качество жизни населения.*

*Понимание роли архитектуры как особого вида искусства, в контексте формирования общественных пространств, имеет значение и в отношении к устойчивому развитию общества, социальной интеграции и экологической ответственности. В этой связи, необходим мониторинг и глубокий анализ того, как сочетается эстетика и функциональность, и какое влияние это в совокупности может оказать на восприятие пространства и улучшение повседневной жизни населения.*

*В специфику анализа общественных пространств вошли такие факторы как: принципы, по которым проектируются общественные пространства (стили, материала, спектр функциональных задач); принципы восприятия архитектурной среды с точки зрения психологии, эстетики и функциональности; примеры успешных архитектурных решений в контексте исторического наследия и современных вызовов, таких как урбанизация и экологические ограничения;*

*В статье представлены рекомендации по улучшению организации существующих общественных пространств, с точки зрения возможности применения их в нашем регионе в соответствии с юридическими и социальными нормами.*

*Ключевые слова: общественное пространство, население, озеленения, безопасность, эстетические подходы, функциональность.*

**Введение**

Понятие «общественное пространство» появилось относительно недавно и пока не имеет окончательного определения, что связано с быстрыми социальными изменениями в современном обществе. Исследование развития таких пространств велось в основном с помощью изучения картин с изображением городских пейзажей XVII века. На них можно лицезреть, как люди проводили свой досуг, как менялся их быт и традиции с течением времени [1; 2]. Город и общество предстают как единый процесс – это и есть суть общественного пространства.

Важно отметить, что повышение качества общественного пространства положительно влияет на окружающую человека среду, психологическое восприятие горожан и облик города в целом. Общественные пространства должны преуспевать в большого количества функций. В понимание множественности функционала городской среды включаются такие факторы как безопасность, удобство, доступность, без барьерная среда, шумоизоляция, цвет, озеленение, художественные компоненты среды и многие другие компоненты, включающие инженерное обеспечение среды, возможность отдохнуть, сориентироваться, получить новые знания и многое другое [3].

В связи с этим понимание роли архитектуры как процесса, определяющего развитие общественных пространств, становится особенно актуальным в свете тенденций устойчивого развития, социальной инклюзивности и экологической ответственности. Актуальность данной работы обусловлена стремительным развитием новых методов и материалов, использующихся в современной архитектуре и развитием потребностей людей, все возрастающих требований к удобству, комфорту и безопасности. Цель – данного исследования выявить факторы, влияющие на гармонизацию общественных пространств и определить методику формирования архитектурной среды на основе этих факторов.

**Материалы и методы**

Исторические аспекты развития архитектурных пространств являются основной базой для исследования принципов их формирования. На начальном этапе изучены: эволюция подходов к созданию общественных пространств, влияние культурных и социальных факторов на архитектурное решение, художественные принципы, определяющие характеристику пространства и влияющие на его топонимику, запоминание и ориентирование. В результате чего можно выделить шесть качественных этапов развития общественных пространств:

– древние времена (XXII–VI вв. до н. э.) – образование первых открытых общественных пространств многофункционального использования, таких как храмовые комплексы требующие процессуальности и вовлечения в пространства в специфику религиозных ритуалов

– античный мир (VIII в. до н. э. – IV в. н. э.) – создание специальных общественных пространств, определяющих стилистику и семантическое значение пространства, принцип взаимодействия внутри пространства

– эпоха Средневековья (VI–XVI вв.) – характеризуется спецификой замкнутых закрытых пространств, не позволяющих интерпретировать их функции. В основе своей это пространства внутренних дворов и защитных стен.

– эпоха Возрождения, стиль барокко, классицизм (XV–XIX вв.) – формирование городских центров и площадей, способствующих четкому ранжированию пространства на главные и второстепенные. В этот развития архитектурных пространств магистрали рассматриваются как важные артерии объединяющие и упорядочивающие все части города. Восприятие пространства должно быть акцентировано, направлено, организовано.

– капиталистические города XX в – сложность общей планировки структуры городов, образование общественных центров, элементы которой получили иерархическое соподчинение в соответствии с теми системами, которые применялись в практике градостроительства того времени;

– современное состояние, XXI – организация пространственной структуры современных городских центров, основывается на тех же системах, что и в прошлом веке. Однако тенденция к изменению общественных функций, и возможности трансформировать пространства в связи с мероприятиями и запросами разных социальных групп, повлияло на изменение их качественных и количественных характеристик [4].

Анализируя изменение параметров общественных функций и появление возможности их трансформируемости и мобильности, выявляется необходимость в организации пространств многоцелевого назначения нового качества. Для современного этапа развития общественных пространств свойственна многофункциональность, возможность реализации различных сценариев на одном пространстве, смешение нескольких видов деятельности. Выдвигаются новые требования горожан к городской среде. Теперь недостаточно стандартного набора элементов для создания комфортного общественного пространства. Важна трансформация их облика в зависимости от проводимого мероприятия.

В связи с этим, дальнейшее исследование было направлено на анализ основных подходов к проектированию общественных пространств с точки зрения эстетики и функциональности:

– контекст и идентичность места – с эстетической стороны проект должен гармонировать с окружением по материалам и форме, отражая местный характер через традиции и природные мотивы;

– универсальность и доступность для широкого круга пользователей, включая людей с ограниченными возможностями;

– многозадачность общественного пространства, которое должно быть многофункциональным, адаптируясь под мероприятия;

– гибкость пространства может проявляться через подвижные элементы архитектуры - складные скамейки, трансформируемые ландшафтные элементы, служащие визуальными акцентами.

Кроме того, важным аспектом проектирования общественных пространств является обеспечение безопасности. Важно учитывать освещенность, видимость,

а также доступность местности для экстренных служб. Пространство должно быть удобным и комфортным, включая такие элементы, как скамейки, укрытия от дождя, туалеты. Элементы безопасности должны быть не только практичными, но и эстетичными, гармонируя с общим стилем пространства. Хорошо спроектированные осветительные решения или защитные элементы могут одновременно выполнять эстетическую и функциональную роль. Современный этап развития общественных пространств характеризуется многофункциональностью, возможностью реализации различных сценариев в одном пространстве и смешением нескольких видов деятельности [5; 6].

Для понимания того, как наилучшим образом создавать общественные пространства, стоит изучить примеры успешных и неудачных общественных пространств, определяя ключевые аспекты, влияющие на их функциональность и восприятие. Для формирования полной картины были исследованы зарубежные примеры общественных пространств (таблица 1) и выявлено, что их представление не сильно отличается от отечественного [7; 8]. Понятие городского пространства всегда характеризуется субъектом и его окружением. Оно включает в себя систему потребностей, обусловленных образом жизни, географическим положением, особенностями мировосприятия, национальными традициями и т.п. Элементы, которые включаются в городскую среду обуславливают эстетическую реакцию на нее [9; 10].

Таблица 1 – Анализ зарубежных общественных пространств

| Страна | Социально-психологические представления | Концепция общественных пространств | Функциональность |
|---|---|---|---|
| Австралия | Общественные пространства открыты и доступны для всех людей, независимо от происхождения или статуса | Описывается как земля, отведенная для целей общественного пользования и защиты уникальных, экологических, социальных и культурных ценностей для нынешних и будущих поколений | Больше всего внимания в Австралии уделяют именно паркам и заповедникам, так как считается, что экологически чистые места положительно влияют на здоровье граждан. |
| Китай | К общественным пространствам относят, городские площади и парки, тротуары, публичные библиотеки и многие подобные здания | Для входа в общественное пространство не нужно платить взнос, так как это будет считаться дискриминацией. Места, где можно платить, такие как круглосуточные магазины, кафе и кинотеатры. Такие места называются «полуобщественными пространствами». | Все, что вне дома является общественным пространством |
| Россия | В соответствии с региональными особенностями общественные пространства имеют большие размеры. | Общественными пространствами, часто, становятся постиндустриальные территории. место, где люди проводят время, отдыхают, встречаются с друзьями - место, наполненное жизнью. «руины превращаются в полноценные туристические локации». | Заброшенные объекты, бывшие заводские территории, места, где аккумулируется традиционная русская культура |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Европа | Компактность и замкнутость западноевропейских ансамблей. Площади как театральная декорация в окружении архитектуры. Отсутствие открытых пространств. | Город как место мира и диалога. Улица для Европейцев негативный фактор, криминальное место, место действия. Площади выступают как публичное пространство, пространство для действий, выступлений, поэтому в понимании европейца площадь — это пространство, которое принадлежит всем | Для Европы общественное пространство – это пространство, наполненное политическими символами, например, памятниками выдающимся личностям |

Казахстан уникальная территория, где плотность населения одна из самых низких в мире 7,29 на 1 кв км. Возможность создавать общественные пространства формируется в зависимости от культурологических и социальных запросов.

В последнее время архитектура общественных пространств в Казахстане акцентирована на мемориальные, памятные места, места захоронений величайших людей, мыслителей, религиозных деятелей. Формируются общественные зоны в соответствии с принципами культурной политики государства, толерантности и национальной идентичности. Это определяет их многофункциональность.

Сегодня важными качествами общественных пространств в Казахстане является их семантика, знаковость и ассоциативность. Возникая в городской среде парки, скверы и мемориальные комплексы играют важную роль в композиционной организации города, но и становятся фактором визуальной информации при восприятии образа этих объектов. Принцип культурной идентичности с одной стороны, и семантическое значение Казахстана как страны, согревшей на своей территории огромное количество народностей в годы репрессий и войн, и периода торговых путей с другой определяют принципы архитектурной гармонии, формирующей общественные пространства Казахстане.

Рассмотрим негативные стороны общественных пространств на примере объектов разных городов Казахстана (таблица 2).

Таблица 2 – Негативные стороны общественных пространств

| Наименование объекта | Функциональность | Негативные факторы пространства |
|---|---|---|
| Площадь Республики в Алматы | Главный символ независимого Казахстана, место для главных политических мероприятий страны | Переполнена автомобилями и автобусами, что затрудняет движение пешеходов не функционирует как общественное пространство из-за высокой плотности движения, отсутствия зеленых насаждений и элементов для отдыха |
| **Центральный стадион Алматы** | Пространство в основном используется для проведения мероприятий, но совсем не подходит для ежедневных прогулок и занятий | С точки зрения эстетики, городское пространство в этой части часто критикуют за устаревший и неухоженный вид. Отсутствие достаточного количества зеленых насаждений и элементов, создающих приятную атмосферу, заставляет их выглядеть запущенными |

| | | |
|---|---|---|
| Дворец культуры имени Естая в Павлодаре | Площадь для Национальных праздников, народных гуляний | Площадь вокруг дворца не предназначена для пешеходов: она хоть и освещена большой парковкой, которая занимает треть пространства, но пространство вокруг площади значительно ограничивает передвижение пешеходов. Нехватка пешеходных переходов к самому городскому дворцу культуры, слишком широкие дороги, а самое главное – отсутствие пандусов существенно сокращает желающих прогуляться рядом, а уж тем более зайти во дворец. |
| Площадь Независимости в городе Караганды | Многофункциональный объект для проведения массовых мероприятий | Серость ландшафта, недостаток мест отдыха, таких как скамейки и беседки, монотонность зданий вокруг площади создают унылую атмосферу, выделяется только центральный монумент. |

Если говорить в целом о приведенных примерах, то следует обратить внимание, что общественные пространства часто страдают от плохого зонирования, недостатка зелёных насаждений, отсутствия удобства для пешеходов и общего игнорирования потребностей местных жителей. Такие пространства не только ухудшают качество жизни, но и влияют на восприятие городской среды в целом.

Но следует отметить и примеры лучших общественных пространств, на которые стоит равняться. Так, Набережная Павлодара является популярным общественным пространством, сочетающее в себе эстетику и функциональность. Расположена набережная в центре города и имеет удобный доступ для пешеходов и автомобилистов. Также есть бесплатные парковочные места для тех, кто предпочитает приезжать на личном транспорте. Вид на реку, зелень и природный ландшафт создают уютную атмосферу, положительно влияя на психологическое состояние горожан и посетителей. Наличие общественных туалетов и фуд-кортов дает возможность удовлетворения потребностей посетителей, а открытый бассейн для детей создает дополнительный досуг для маленьких гостей. Набережная имеет доступные пандусы и прочие удобства для людей с ограниченными возможностями, хорошее освещение делает ее безопасным и приятным местом для отдыха.

Также, в качестве успешного примера можно привести Спортивный комплекс «Медеу», который является популярным местом отдыха жителей и туристов. Чистый воздух и живописное расположение комплекса способствуют как физическому, так и душевному здоровью. Естественная красота этого места и великолепный лёд Медеу неподвластны времени и новомодным трендам. Каждый год тысячи туристов собираются, чтобы посмотреть на величие этого катка.

Еще одним лучшим примером является технопарк «Мир фантазий» в Шымкенте. Это местом отдыха как для семьи, так и для больших компаний друзей, где часто проводят различные мероприятия, благодаря имеющейся сцене и открытой площадки для концертов и прочих увеселительных мероприятий. Данный парк заслуживает внимания как с точки зрения эстетики, так и функциональности. Уникальный дизайн, основанный на фантазийных сюжетах, делает парк визуально привлекательным и запоминающимся. Разнообразные арт-объекты, сказочные фигуры и стилизованные архитектурные элементы создают

волшебную атмосферу. Изобилие зеленых насаждений, цветников и деревьев обеспечивает гармонию с природой, а также влияя на экологию и здоровье жителей. Вечернее освещение добавляет парку атмосферы. Подсвеченные фигуры и декоративные элементы создают ощущение сказки и привлекают посетителей в вечернее время, а также обеспечивает безопасность в поздние часы. Плюсом с точки зрения функциональности, несомненно, является то, что развлечения на территории парка подходят для всех возрастов. Аттракционы предназначены как для детей определенного возраста, так и для более взрослой аудитории. Наличие кафе, общественных туалетов и удобных дорожек делает пребывание в парке комфортным. В парке есть зоны для детей, подростков и взрослых, включая игровые площадки, аттракционы и зоны отдыха.

**Результаты и обсуждение**

Исследовав существующие проекты общественных пространств в нашей стране, важно выявить принципы и методы, которые могут быть использованы для архитектурных решений, требующих сбалансированного подхода, учитывающего как практические потребности, так и визуальную привлекательность.

К таким принципам и методам следует отнести:

– ориентацию на человека

– контекстуальность

– многофункциональность

– устойчивость

– инклюзивность

Способствуя улучшению социальной активности, экологии и общего восприятия городской среды следует проектировать общественные пространства, принимая во внимание рекомендации, сформировавшиеся при исследовании перечисленных в статье примеров общественных пространств:

– Социальная активность - общественные пространства должны стимулировать взаимодействие между людьми и создавать условия для совместного отдыха и различных видов деятельности.

– Разнообразие функциональных зон - при проектировании общественных пространств необходимо учитывать интересы различных групп населения, например, установить игровые площадки для детей, зоны отдыха для взрослых и доступные пандусы для людей с ограниченными возможностями.

– Распространение зеленых насаждений - озеленение общественных пространств улучшает эстетику и экологию.

– Энергосберегающие технологии - использование экологически чистых материалов, оснащение солнечными панелями, энергоэффективное освещение, системы сбора дождевой воды для полива зелёных насаждений способствует экономичному использованию городских ресурсов.

– Улучшение восприятия городской среды - Общественные пространства должны быть одновременно эстетически привлекательными и безопасными.

– Качество и долговечность материалов - следует использовать долговечные материалы, устойчивые к климатическим условиям и обеспечивающие продолжительный срок службы без потери эстетической стороны.

– Интеграция искусства - внедрение арт-объектов, такие как граффити и скульптуры помогают положительному восприятию городской среды.

– Продуманное освещение - для обеспечения безопасности и привлекательности общественных пространств, особенно в вечернее время, ключевым элементом станет гармоничное освещение местности.

– Сохранение культурного наследия - общественные места часто имеют историческое и культурное значение, выступая в качестве свидетельства наследия сообщества. Восстанавливая эти пространства, мы сохраняем и празднуем нашу культурную идентичность.

**Выводы**

В процессе развития города происходит переосмысление его значимости, обновляется образная выразительность элементов, составляющих архитектурно-пространственную среду. Наиболее универсальными в отношении изменений являются символические качества, такие как «ассоциативность» и «знаковость». Они могут быть взяты за основу трансформации образной выразительности архитектурно-пространственной среды любого города в соответствии с ее новыми значениями. Кроме того, играя важную роль в композиционной организации города, они становятся носителями визуальной информации при восприятии его образа. Для организации городского пространства чрезвычайно важны детали архитектурных масс, применение разного рода членений, пластики объемов, устройство проемов, использование разных фактур, материалов, цветовых соотношений. Произведения монументально-декоративного искусства, такие, как монументы, скульптуры, декоративные объемы, могут быть ведущим компонентом организации городского пространства, а могут работать как фрагмент фасада: панно, рельефы, орнаментальные композиции. В этой связи архитектуру необходимо рассматривать как процесс, создающий атмосферу для нашего настроения и здоровья. Надо понимать, что средства реализации архитектурного замысла заложены в методологии проектного мастерства, которое основано на правилах гармонизации, синтеза искусств, формообразования, пластики деталей и других закономерностей, заложенных в принципах композиции

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Баталина, Т. С.** Анализ особенностей формирования общественного пространства [Текст] / Т. С. Баталина // Бизнес и дизайн ревю. – 2017. – № 1(5). – С. 11–19.

2 **Abusaada, H., Elshater, A.** Competitiveness, distinctiveness and singularity in urban design : A systematic review and framework for smart cities. Sustainable Cities and Society. – 2021. – № 68.

3 **Зазуля, В. С.** Экологический комфорт и общественные пространства [Текст] / В. С. Зазуля // Урбанистика. – 2020. – № 3. – С. 75–90.

4 **Чернозипунникова, В. А., Дудина, Т. С.** История формирования общественных пространств России через призму изобразительного искусства XVIII – начала XXI в. [Текст] / В. А. Чернозипунникова, Т.С. Дудана // Творчество и современность. Сетевое издание. – 2019. – № 1 (9). – С. 49–56.

5 **Волкова, А. В., Глушенкова, К. В., Петрова, Е. Н.** Гуманизация общественных пространств как способ повышения качества городской среды [Электронный ресурс] / А. В. Волкова, К. В. Глушенкова, Е. Н. Петрова // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 1. – С. 45–50.

6 **Гаврилова, М. Ю., Гаврилов, А. М.** Преобразование общественных пространств на основе символической интерпретации элементов городской среды [Текст] / М.Ю. Гаврилова, А.М. Гаврилов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2021. – № 9. – С. 56–63.

7 **Сулялина, П. И.** Методы формирования общественных пространств: анализ зарубежных проектов [Текст] / П. И. Сулялина // Молодой ученый. – 2018. – № 17 (203). – С. 84–88.

8 **Kamińska, W., Mularczyk, M.** Attractiveness of Central Public Spaces in Small Polish Towns Based on a Spatial Order Analysis [Text] / W. Kamińska, M. Mularczyk // Land. – 2021. – № 10(12). – С. 1–30.

9 **Молосова, О. В.** Урбанизация в Австралии : проблемы и перспективы [Текст] / О.В. Молосова // ЮГО-ВОСТОЧНАЯ АЗИЯ: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ. – 2024. – Том 2, № 2 (63). – С. 242–252.

10 **Матвеева, Е. В, Курпатова, М. А.** Организация общественного пространства и экологические проблемы Китая [Текст] / Е. В. Матвеева, М. А. Курпатова // ПРАΞНМА. Проблемы визуальной семиотики (ПРАΞНМА. Journal of Visual Semiotics). – 2019. – № 2 (20). – С. 217–224.

REFERENCES

1 **Batalina, T. S.** Analiz osobennostej formirovaniya obshhestvennogo prostranstva [Analysis of the features of the formation of public space] [Text] / T. S. Batalina // Biznes i dizajn revyu. – 2017. – № 1(5). – P. 11–19.

2 **Abusaada, H., Elshater, A.** Competitiveness, distinctiveness and singularity in urban design: A systematic review and framework for smart cities. Sustainable Cities and Society. – 2021. – № 68.

3 **Zazulya, V. S.** E`kologicheskij komfort i obshhestvenny`e prostranstva [Ecological comfort and public spaces] [Text] / V. S. Zazulya // Urbanistika. – 2020. – № 3. – P. 75–90.

4 **Chernozipunnikova, V. A., Dudina, T. S.** Istoriya formirovaniya obshhestvenny`x prostranstv Rossii cherez prizmu izobrazitel`nogo iskusstva XVIII – nachala XXI v. [The history of the formation of public spaces in Russia through the prism of fine art of the 18th – early 21st centuries] [Text] / V. A. Chernozipunnikova, T. S. Dudina // Tvorchestvo i sovremennost`. Setevoe izdanie. – 2019. – № 1 (9). – P. 49–56.

5 **Volkova, A. V., Glushenkova, K. V., Petrova, E. N.** Gumanizaciya obshhestvenny`x prostranstv kak sposob povy`sheniya kachestva gorodskoj sredy` [Humanization of public spaces as a way to improve the quality of the urban environment] [Electronic resource] / A. V. Volkova, K. V. Glushenkova, E. N. Petrova // Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. – 2021. – № 1. – P. 45–50.

6 **Gavrilova, M. Yu., Gavrilov, A. M.** Preobrazovanie obshhestvenny`x prostranstv na osnove simvolicheskoj interpretacii e`lementov gorodskoj sredy` [Transformation of public spaces based on symbolic interpretation of urban environment elements] [Text] / M. Yu. Gavrilova, A. M. Gavrilov // Vestnik BGTU im. V. G. Shuxova. – 2021. – № 9. – P. 56–63.

7 **Sulyalina, P. I.** Metody` formirovaniya obshhestvenny`x prostranstv: analiz zarubezhny`x proektov [Methods of Forming Public Spaces: Analysis of Foreign Projects] [Text] / P. I. Sulyalina // Molodoj ucheny`j. – 2018. – № 17 (203). – P. 84–88.

8 **Kamińska, W., Mularczyk, M.** Attractiveness of Central Public Spaces in Small Polish Towns Based on a Spatial Order Analysis [Text] / W. Kamińska, M. Mularczyk // Land. – 2021. – № 10(12). – P. 1–30.

9 **Molosova, O. V.** Urbanizaciya v Avstralii : problemy` i perspektivy` [Urbanization in Australia : Problems and Prospects] [Text] / O.V. Molosova // YuGO-VOSTOChNAYa AZIYa: AKTUAL`NY`E PROBLEMY` RAZVITIYa. – 2024. – Том 2, № 2 (63). – P. 242–252.

10 **Matveeva, E. V., Kurpatova, M. A.** Organizaciya obshhestvennogo prostranstva i e`kologicheskie problemy` Kitaya [Organization of public space and environmental problems in China] [Text] / E. V. Matveeva, M. A. Kurpatova // ΠΡΑΞΗΜΑ. Problemy` vizual`noj semiotiki (ΠΡΑΞΗΜΑ. Journal of Visual Semiotics). – 2019. – № 2 (20). – P. 217–224.

Поступило в редакцию 26.04.25.
Поступило с исправлениями 05.05.25.
Принято в печать 26.05.25.

***Д. С. Свидерская[1], Ю. И. Мазина[2], *М. С. Лебедева[3]***
[1,2,3,]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
26.04.25 ж. баспаға түсті.
05.05.25 ж. түзетулерімен түсті.
26.05.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## СӘУЛЕТ ЭСТЕТИКА МЕН ФУНКЦИОНАЛДЫЛЫҚ ТҰРҒЫСЫНАН ҚОҒАМДЫҚ КЕҢІСТІКТЕР ҚҰРУ ӨНЕРІ РЕТІНДЕ

*Дами отырып, қоғамдық кеңістіктер үлкен функционалдылыққа ие болды, аз хаотикалық болды, бірақ олардың рөлі жақында тығыз дамудың таралуына байланысты ескерілмейді, нәтижесінде экологиялық құрамдас бөлікке әсер ететін көгалдандыру азаяды, аула кеңістігі іс жүзінде жойылады, бұл балалар мен жалпы тұрғындардың қауіпсіздігіне қиындық тудырады. Осыған*

*байланысты, бұл мақалада сәулет функционалдылық, үйлесімділік және эстетика принциптерін қарастыратын және қалалық ортаның ажырамас бөлігі болып табылатын және халықтың өмір сүру сапасына айтарлықтай әсер ететін қоғамдық кеңістіктерді құруға бағытталған процесс ретінде қарастырылады. Сәулет өнерінің ерекше өнер түрі ретіндегі рөлін қоғамдық кеңістікті қалыптастыру контекстінде түсіну қоғамның тұрақты дамуына, әлеуметтік интеграцияға және экологиялық жауапкершілікке қатысты да маңызды. Осыған байланысты эстетика мен функционалдылықтың қалай үйлесетінін және оның кеңістікті қабылдауға және халықтың күнделікті өмірін жақсартуға қандай әсер етуі мүмкін екенін бақылау және терең талдау қажет. Қоғамдық кеңістіктерді талдаудың ерекшеліктеріне мынадай факторлар кірді: қоғамдық кеңістіктер жобаланатын принциптер( стильдер, материалдар, функционалдық міндеттер спектрі); психология, эстетика және функционалдылық тұрғысынан сәулеттік ортаны қабылдау принциптері; тарихи мұра контекстіндегі сәтті архитектуралық шешімдердің мысалдары және урбанизация және экологиялық шектеулер сияқты заманауи сын-қатерлер; Мақалада қолданыстағы қоғамдық кеңістіктерді ұйымдастыруды жақсарту бойынша ұсыныстар, оларды біздің аймақта заңды және әлеуметтік нормаларға сәйкес қолдану мүмкіндігі тұрғысынан ұсынылған.*

*Кілтті сөздер: қоғамдық кеңістік, халық, көгалдандыру, қауіпсіздік, эстетикалық тәсілдер, функционалдылық.*

***D. S. Sviderskaya[1], Yu. I. Mazina[2], *M. S. Lebedeva[3]***
Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 26.04.25.
Received in revised form 25.05.25.
Accepted for publication 26.05.25.

## ARCHITECTURE AS THE ART OF CREATING PUBLIC SPACES IN TERMS OF AESTHETICS AND FUNCTIONALITY

*Evolving, public spaces have become more functional and less chaotic, but their role has recently ceased to be taken into account due to the spread of dense buildings, as a result of which landscaping affecting the environmental component is reduced, courtyard spaces are practically abolished, which creates a problem for the safety of children and residents in general. In this regard, this article considers architecture as a process that considers the principles of functionality, harmony and aesthetics and is aimed at creating public spaces that are an integral part of the urban environment and have a significant impact on the quality of life of the population. Understanding the role of architecture as a special kind of art in the context of the formation of public spaces is also important in relation to the sustainable development of society, social integration and environmental responsibility. In this regard, it is necessary to monitor and in-depth analyze how aesthetics and functionality are combined, and what impact this combined can have on the perception of space and the improvement of the daily life of the population. The specifics of the analysis of public spaces include such factors as: principles according to which public spaces are designed (styles,*

*materials, range of functional tasks); principles of perception of the architectural environment from the point of view of psychology, aesthetics and functionality; examples of successful architectural solutions in the context of historical heritage and modern challenges such as urbanization and environmental constraints; The article presents recommendations for improving the organization of existing public spaces, from the point of view of the possibility of their application in our region in accordance with legal and social norms.*

*Keywords: public space, population, landscaping, safety, aesthetic approaches, functionality.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

***Асангалиев Елібек Атрауұлы,*** Ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, доцент, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: EAsangaliev@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0003-4002-8350

***Асангалиев Елибек Атрауович,*** кандидат сельскохозяйственных наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: EAsangaliev@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0003-4002-8350

***Asangaliev Elibek Atrauovich,*** Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: EAsangaliev@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0003-4002-8350

***Аринова Сания Каскатаевна,*** PhD, аға оқытушы, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.arinova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1977-8157

***Аринова Сания Каскатаевна,*** PhD, ст.преподаватель, кафедра «Нанотехнологии и металлургии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: s.arinova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1977-8157

***Arinova Sania Kaskataevna,*** PhD, Senior Lecturer, Department of «Nanotechnology and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic Of Kazakhstan, e-mail: s.arinova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1977-8157

***Акбердин Александр Абдуллаевич,*** техника ғылымдарының докторы, профессор, Бор зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: Akberdon_38@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2562-1132

***Акбердин Александр Абдуллаевич,*** доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Бор Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: Akberdon_38@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2562-1132

***Akberdin Aleksandr,*** Doctor of technical sciences, professor, head of laboratory, Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Kazakhstan, e-mail: Akberdon_38@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2562-1132

***Адылканова Меруерт Адылканқызы,*** 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 Адылканқызы,*** 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

***Adylkanova Meruert Adylkankyz,*** PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail:e-mail: milka160281@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8193-116X

***Адамова Гульден Хасеновна,*** «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: guldenaa@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6933-6571

***Адамова Гульден Хасеновна,*** докторант по специальности «Металлургия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: guldenaa@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6933-6571

***Adamova Gulden,*** PhD student in Metallurgy, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Kazakhstan, e-mail: guldenaa@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6933-6571

***Абсадыков Бакыт Нарикбаевич,*** техника ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясының корреспондент-мүшесі, Сәтбаев университеті, 050013, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: b_absadykov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7829-0958

***Абсадыков Бакыт Нарикбаевич,*** доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной Академии наук Республики Казахстан, Сатпаев университет, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: b_absadykov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7829-0958

***Absadykov Bakhyt Narikbayevich,*** Doctor of technical sciences, professor, the Corresponding member of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Satbayev University, 050013, Almaty city, Republic of Kazakhstan, e-mail: b_absadykov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7829-0958

***Абишев Кайратолла Кайроллинович,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Қазақстан Ғылым және технологиялар институты» ЖШС, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.kairatolla@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2001-0428

***Абишев Кайратолла Кайроллинович,*** кандидат технических наук, профессор, ТОО «Казахстанский институт науки и технологий», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: a.kairatolla@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2001-0428

***Abishev Kairatolla Kairollinovich,*** Candidate of Technical Sciences, Professor, Kazakhstan Institute of Science and Technology LLP, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.kairatolla@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2001-0428

***Абишева Назерке Батырбековна,*** «Машинажасау» мамандығының докторанты, А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100024, Қазақстан Республикасы, e-mail: batyrbekovna.nazerke@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8564-0055

***Абишева Назерке Батырбековна,*** докторант по специальности «Машиностроение», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100024, Республика Казахстан, e-mail: batyrbekovna.nazerke@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8564-0055

***Abisheva Nazerke Batyrbekovna,*** PhD student in «Mechanical Engineering», Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, 100024, Republic of Kazakhstan, e-mail: batyrbekovna.nazerke@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8564-0055

***Абильдина Айжан Рымкулкызы,*** «Металлургия» білім беру бағдаламасы бойынша докторант, «Металлургия және жаңа материалдар» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: aizhan--1984@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-1705-1352

***Абильдина Айжан Рымкулкызы,*** докторант по образовательной программе «Металлургия», кафедра «Металлургия и новые материалы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: aizhan--1984@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-1705-1352

***Abildina Aizhan Rymkulkyzy,*** doctoral student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Department of «Metallurgy and new materials», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: aizhan--1984@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-1705-1352

***Абекова Айдана Жумагалиевна,*** ғылыми қызметкер, техника ғылымдарының магистрі; У. А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Алматы қ., 05000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

***Абекова Айдана Жумагалиевна,*** научный сотрудник, магистр технических наук, Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекоова, Алматы к., 05000, Республика Казахстан, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

***Abekova Aidana Zhumagalievna,*** Researcher, Master of Technical Sciences; Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Joldasbekov, Almaty, 05000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Abekova310792@gmail.com; https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

***Айдарова Мадина Турсынбековна,*** «Техникалық физика» мамандығы бойынша докторант, Физика орталығы, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: Madina.aidarova@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-9200-8058

***Айдарова Мадина Турсынбековна,*** докторант по специальности «Техническая физика», Центр физики, ВКТУ имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: Madina.aidarova@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-9200-8058

***Aidarova Madina Tursynbekovna,*** Doctoral candidate in the specialty «Technical Physics», Physics Center, VKTU named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: Madina.aidarova@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-9200-8058

***Алмагамбетов Марал Сарсенбаевич,*** техника ғылымдарының кандидаты, пирометаллургия менеджері, «ERG ғылыми-зерттеу және инжиниринг орталығы» ЖШС, Астана қ., 010017, Қазақстан Республикасы, e-mail: maral.almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0002-0477-7867

***Алмагамбетов Марал Сарсенбаевич,*** кандидат технических наук, менеджер по пирометаллургии, ТОО «Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG», г. Астана, 010017, Республика Казахстан, e-mail: maral.almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0002-0477-7867

***Almagambetov Maral Sarsenbayevich,*** Candidate of Technical Sciences, Pyrometallurgy Manager, ERG Scientific Research Engineering Center LLP, Astana, 010017, Republic of Kazakhstan, e-mail: maral.almagambetov@erg.kz, https://orcid.org/0009-0002-0477-7867

***Арыстанова Диана Мухамеджановна,*** «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Машинажасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.arystanova97@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3474-5549

***Арыстанова Диана Мухамеджановна,*** докторант по специальности «Металлургия», Факультет машиностроение, Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: d.arystanova97@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3474-5549

***Arystanova Diana Mukhamedzhanovna,*** Doctoral student in «Metallurgy», Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.arystanova97@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3474-5549

***Ахметов Аманкельды Серикбаевич,*** «Металлургия» мамандығы бойынша техника ғылымдарының кандидаты, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының аға ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

***Ахметов Аманкельды Серикбаевич,*** кандидат технических наук по специальности «Металлургия», ст. научник сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

***Akhmetov Amankeldy,*** Candidate of Technical Sciences in «Metallurgy», Senior Researcher at the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

***Ахметов Бахытжан Сражатдинович,*** техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы қ., 050063, Қазақстан Республикасы, e-mail: bakhytzhan.akhmetov.54@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5622-2233

***Ахметов Бахытжан Сражатдинович,*** доктор технических наук, профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, г. Алматы, 050063, Республика Казахстан, e-mail: bakhytzhan.akhmetov.54@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5622-2233

***Akhmetov Bakhytzhan Srazatdinovich,*** Doctor of Technical Sciences, professor, International University Transport and Humanities, Almaty, 050063, Republic of Kazakhstan, e-mail: bakhytzhan.akhmetov.54@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5622-2233

***Әбдірашит Асылбек Мирамханұлы,*** PhD, оқытушы, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасы, Техникалық факультет, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0718-3041

***Әбдірашит Асылбек Мирамханұлы,*** PhD, преподавтель кафедры «Металлургия и горное дело», Технический факультет, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0718-3041

***Abdirashit Assylbek Miramkhamuly,*** PhD, Lecturer of the Department of Metallurgy and Mining, Technical Faculty, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, 030000, Republic Kazakhstan, e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0718-3041

***Баятанова Ляйла Болатхановна,*** PhD, Халықаралық инженерия мектебінің қауымд. профессоры, Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, lbayatanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5630-4746

***Баятанова Ляйла Болатхановна,*** PhD, ассоц. профессор Международной школы инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: lbayatanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5630-4746

***Bayatanova Lyaila Bolatkanovna,*** PhD, Associate Professor, International School of Engineering, Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: lbayatanova@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5630-4746

***Бондарцев Давид Юрьевич,*** PhD, профессор АЭжБУ, ассоц. профессор ВАК, Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс университеті, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.bondartsev@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-8778-7851

***Бондарцев Давид Юрьевич,*** PhD, профессор АУЭС, ассоц.профессор ВАК, Алматинский университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: d.bondartsev@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-8778-7851

***Bondartsev David,*** PhD, professor of AUPET, Associate Professor HCC, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.bondartsev@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-8778-7851

***Бурумбаев Азамат Галимжанович,*** «Металлургия» мамандығы бойынша Қарағанды индустриялық университетінің докторанты «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5276-2259

***Бурумбаев Азамат Галимжанович,*** докторант Карагандинского индустриального университета по специальности «Металлургия», младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5276-2259

***Burumbayev Azamat,*** Doctoral student of Karaganda Industrial University in the specialty «Metallurgy», Junior researcher at the laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5276-2259

***Бажаев Нурлан Аманкулович,*** PhD, қауымд. профессор, Энергетика және машина жасау институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.bazhayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-8601-0688

***Бажаев Нурлан Аманкулович,*** ассоц. профессор, PhD, Институт энергетики и машиностроения, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: n.bazhayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-8601-0688

***Bazhayev Nurlan Amankulovich,*** Associate Professor, PhD, Institute of Energy and Mechanical Engineering, K. I. Satbayev Kazakh national research Technical university, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.bazhayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-8601-0688

***Байсеитова Еркеназ Аглановна,*** «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

***Байсеитова Еркеназ Аглановна,*** докторант по специальности «Металлургия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

***Bayseitova Erkenaz Aglanovna,*** Doctoral student in the specialty «Metallurgy», Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

***Басканбаева Динара Джумабаевна,*** PhD, қауымд.профессор, Satbayev University, 050013, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

***Басканбаева Динара Джумабаевна,*** PhD, ассоц. профессор, Satbayev University, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

***Baskanbayeva Dinara Dzhumabaevna,*** PhD, Associate Professor, Satbayev University, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

***Бектилевов Алдаберген Юсупович,*** PhD, «Көлік» бағыты бойынша қауымд. профессор, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.bektilevov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-0865-6023

***Бектилевов Алдаберген Юсупович*** PhD, ассоц. профессор направления «Транспорт» школы», Университет Сатпаев, г. Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.bektilevov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-0865-6023

***Bektilevov Aldabergen Yusupovich*** PhD, Associate Professor of the direction «Transport», Satbayev university, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.bektilevov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-0865-6023

***Бердімұратова Дидар Ибрагимқызы,*** «Механика және металлөңдеу» мамандығы бойынша докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: didar.b.93_9393@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-9612-8487

***Бердимуратова Дидар Ибрагимовна,*** докторант по специальности «Механика и метллообработка», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: didar.b.93_9393@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-9612-8487

***Berdimuratova Didar,*** Doctoral student in the specialty «Mechanics and metalworking», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: didar.b.93_9393@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-9612-8487

***Богомолов Алексей Витальевич,*** техникалық ғылымдар кандидаты, профессор, Металлургия кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

***Богомолов Алексей Витальевич,*** кандидат технических наук, профессор, кафедра Металлургия, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

***Bogomolov Alexey,*** Candidate of Engineering, Professor of Metallurgy department, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

***Бортебаев Сайын Абильханович,*** техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Satbayev University, 050013, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: s.bortebayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8761-3429

***Бортебаев Сайын Абильханович,*** кандидат технических наук, ассоц. профессор, Satbayev University, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: s.bortebayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8761-3429

***Bortebayev Saiyn Abilkhanovich,*** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Satbayev University, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan e-mail: s.bortebayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8761-3429

***Бульдяев Иван Владимирович,*** «Бустер ПРО» ЖШС инженері, 633010, Новосибирск қ., Ресей Федерациясы, e-mail: Buldyayev_ivan1978@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0842-1331

***Бульдяев Иван Владимирович,*** инженер ООО «Бустер ПРО», 633010, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: Buldyayev_ivan1978@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0842-1331

***Buldyayev Ivan Vladimirovich,*** Engineer, Booster Pro LLC, 633010, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: Buldyayev_ivan1978@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0842-1331

***Бухнер Петр,*** PhD, «Көлік техникасы» кафедрасы, Прагадағы Чехия техникалық университеті, Прага қ., 11000, Чехия Республикасы, e-mail: bouchner@lss.fd.cvut.cz, https://orcid.org/0000-0002-8308-1656

***Бухнер Петр,*** PhD, Кафедра «Транспортные средства», Чешский технический университет в Праге, г. Прага, 11000, Чешская Республика, e-mail: bouchner@lss.fd.cvut.cz, https://orcid.org/0000-0002-8308-1656

***Bouchner Petr,*** PhD, Professor, Department of Vehicles, Czech Technical University in Prague, Prague, 11000, Czech Republic, e-mail: bouchner@lss.fd.cvut.cz, https://orcid.org/0000-0002-8308-1656

***Быков Петр Олегович,*** техника ғылыми кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Инновациялық Еуразия университеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

***Быков Петр Олегович,*** кандидат технических наук, профессор, Факультет Инженерии, Инновационный Евразийский университет, Торайгыров Университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

***Bykov Petr Olegovich,*** Candidate of technical sciences, Professor, Faculty of Engineering, Innovative Eurasian University, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan
e-mail: Bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

***Вавилов Андрей Владимирович,*** техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, директор ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі ЖШС, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: avavilov@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-0356-0508

***Вавилов Андрей Владимирович,*** кандидат техничеких наук, ассоц. профессор, директор ТОО Научно-производственное объединение ИННОТЕХ, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: avavilov@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-0356-0508

***Vavilov Andrey Vladimirovich,*** Candidate of Technical Science, Associate Professor, Director of INNOTECH Scientific and Production Association LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: avavilov@yandex.kz https://orcid.org/0000-0003-0356-0508

***Генбач Александр Алексеевич,*** техникалық ғылымдарының докторы, профессор ВАК, Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс университеті, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.genbach@aues.kz, https://orcid.org/0009-0001-3819-4387

***Генбач Александр Алексеевич,*** доктор технических наук, профессор ВАК, Алматинский университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.genbach@aues.kz, https://orcid.org/0009-0001-3819-4387

***Genbach Alexander,*** Doctor of technical sciences, professor of AUPET, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.genbach@aues.kz, https://orcid.org/0009-0001-3819-4387

***Гурьянов Георгий Александрович,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі ЖШС, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

***Гурьянов Георгий Александрович,*** кандидат техничеких наук, профессор, руководитель проекта ТОО Научно-производственное объединение ИННОТЕХ, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

***Guryanov Georgiy Aleksandrovich,*** Candidate of Technical Sciences, Professor, Project Manager of INNOTECH Scientific and Production Association LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

***Даньярова Асия Саматовна,*** 8D07113 «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» ББББ бойынша докторанты, «Көлік инженериясы» кафедрасы, Көлік энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: d__b@bk.ru, https://orcid.org/0009-0003-8587-286X

***Даньярова Асия Саматовна,*** докторант по ОП 8D07113 «Транспорт, транспортная техника и технологии», кафедры «Транспортная инженерия», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: d__b@bk.ru, https://orcid.org/0009-0003-8587-286X

***Danyarova Assiya Samatovna,*** Doctoral student in EP 8D07113 «Transport, Transport Equipment and Technologies», Department of «Transport Engineering», Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: d__b@bk.ru, https://orcid.org/0009-0003-8587-286X

***Дашзэвэг Дарийга,*** оқытушы (ассистент), магистр, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Dashzeveg_d@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-1806-7615

***Дашзэвэг Дарийга,*** преподаватель (ассистент), магистр, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e–mail: Dashzeveg_d@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-1806-7615

***Dashzeveg Dariiga,*** Lecturer (Assistant), MSc, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Dashzeveg_d@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-1806-7615

***Джундибаев Валерий Ермекбаевич,*** техника ғылымдарының докторы, «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасының профессоры, Физика техника институты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail:

***Джундибаев Валерий Ермекбаевич,*** доктор технических наук, профессор кафедры «Космическая техника и технологии», Физико-Технический институт, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: dzhundibayev_v@

***Dzhundibayev Valery Ermekbayevich,*** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Space Engineering and Technologies», Institute of Physics and Technology, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: dzhundibayev_v@

dzhundibayev_v@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1348-8735

mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1348-8735

mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1348-8735

***Дюсебаев Ильяс,*** PhD, «Алматы Электрқалқан зауыты» ЖШС, Бас инженер, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8514-8300

***Дюсебаев Ильяс,*** PhD, ТОО «Алматинский завод Электрощит», Главный инженер, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8514-8300

***Dyussebayev Ilyas,*** PhD, LLP «Almaty Electroschit Plant», Chief Engineer, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8514-8300

***Ельмуратова Анна Федоровна,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Сәулет-құрылыс факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: elmuratova1@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-7344-2258

***Ельмуратова Анна Федоровна,*** кандидат технических наук, профессор, Факультет Архитектуры и строительства, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: elmuratova1@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-7344-2258

***Elmuratova Anna Fedorovna,*** Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Architecture and Construction, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: elmuratova1@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-7344-2258

***Елемесов Касым Коптлеуевич,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Энергетика және машина жасау институтының директоры, Satbayev University Алматы қ., 050013, 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, Республика Казахстан, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

***Yelemessov Kassym Koptleuevich,*** candidate of technical sciences, professor, Director of the Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

***Ержан Айдана,*** «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: aidana_kartu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6942-2020

***Ержан Айдана,*** докторант по специальности «Металлургия», кафедры «Нанотехнологии и металлургии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: aidana_kartu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6942-2020

***Yerzhan Aidana,*** PhD student in the specialty «Metallurgy», Department of « Nanotechnology and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: e-mail: aidana_kartu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6942-2020

***Есаулков Валерий*** Сергеевич, магистр, «Көлік техникасы және логистика» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: yessaulkov.val@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0153-8051

***Есаулков Валерий Сергеевич,*** магистр, кафедра «Транспортная техника и логистика», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: yessaulkov.val@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0153-8051

***Yessaulkov Valeriy Sergeevich,*** M. Eng., Department of Transport Equipment and Logistics, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: yessaulkov.val@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0153-8051

***Есиркепова Айым Бакытбековна,*** PhD, «Құрылыс материалдарын, бұйымдарын және конструкцияларын өндіру» мамандығы, А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100024, Қазақстан Республикасы, e-mail: yessirkepova85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4524-5135

***Есиркепова Айым Бакытбековна,*** PhD, специальность «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100024, Республика Казахстан, e-mail: yessirkepova85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4524-5135

***Yessirkepova Aiym Bakytbekovna,*** PhD, Specialty «Production of building materials, products and structures», Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, 100024, Republic of Kazakhstan, e-mail: yessirkepova85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4524-5135

***Жаканов Алибек Нуржанович,*** «Құрылыс материалдарын, бұйымдарын және құрастырылымдарын өндіру» мамандығы бойынша докторант, Сәулет–құрылыс факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Астана қ., 10000, Қазақстан Республикасы, e-mail: azhakanov8@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8747-3788

***Жаканов Алибек Нуржанович,*** докторант по специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», Архитектурно–строительный факультет, Евразийский Национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 10000, Республика Казахстан, e-mail: azhakanov8@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8747-3788

***Zhakanov Alibek Nurzhanovich,*** PhD student in the specialty «Production of building materials, products and structures», Faculty of Architecture and Civil Engineering, L. N. Gumilyov Eurasian National University Astana, 10000, Republic of Kazakhstan, e-mail: azhakanov8@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8747-3788

***Жаксыбекова Асыл Кайржановна,*** «Металлургиялық инженерия» мамандығы бойынша докторнат, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: assyla.zhaksybekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6168-4999

***Жаксыбекова Асыл Кайржановна,*** докторант специальности «металлургическая инженерия», факультет машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: assyla.zhaksybekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6168-4999

***Zhaksybekova Asyl Kairzhanovna,*** Doctoral student in the specialty «Metallurgical Engineering», Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: assyla.zhaksybekova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6168-4999

***Жақан Армат Медетұлы,*** «Металлургия» мамандығы бойынша Торайғыров университетінің докторанты, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: armat.01.01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3810-0528

***Жақан Армат Медетұлы,*** Докторант Торайгыров университета по специальности «Металлургия», Младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: armat.01.01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3810-0528

***Zhakan Armat Medetuly,*** Doctoral student of Toraigyrov University, specialty «Metallurgy», Junior Researcher at the laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: armat.01.01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3810-0528

***Жаманбаев Бауржан Уалиханович,*** PhD, 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, Евразиский национальный университет 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, L. N. Gumilyov Eurasian National University Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaman78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9027-9540

***Жандарбекова Асель Мергазиновна,*** техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы e-mail: Azhandarbekova@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-4905-4005

***Жандарбекова Асель Мергазиновна,*** кандидат технических наук, ст. преподаватель, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Azhandarbekova@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-4905-4005

***Zhandarbekova Assel Mergazinovna,*** Candidate of Technical Sciences,Senior Lecturer, Technical Faculty, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan e-mail: Azhandarbekova@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-4905-4005

***Жетесова Гульнара Сантаевна,*** техника ғылымдарының докторы, профессор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhetesova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6504-3405

***Жетесова Гульнара Сантаевна,*** доктор технических наук, профессор, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: zhetesova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6504-3405

***Zhetessova Gulnara,*** Doctor of Engineering, professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhetesova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6504-3405

***Жолдубаева Жумагуль Дюсенбаевна,*** PhD, доцент, Машинажасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.zholdubaeva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5664-249X

***Жолдубаева Жумагуль Дюсенбаевна,*** PhD, доцент, Факультет машиностроение, Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: zh.zholdubaeva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5664-249X

***Zholdubaeva Zhumagul Diusenbaevna,*** PhD, Associate Professor, Faculty of Mechanical, Karaganda Technical University named after Abilkas Saginov, Engineering, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.zholdubaeva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5664-249X

***Жүнісов Абылай Қайыртасұлы,*** техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Металлургия кафедрасының меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

***Жунусов Аблай Каиртасович,*** кандидат технических наук, ассоц. профессор, заведующий кафедрой Металлургия, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

***Zhunusov Ablay Kairtasovich,*** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

***Жүнісова Айгүл Қайыргелдіқызы,*** докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001 8842-6433

***Жунусова Айгуль Каиргельдиновна,*** докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

***Zhunusova Aigul Kairgeldinovna,*** Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001 8842-6433

***Жанкелді Әділет Жанкелдіұлы,*** PhD, қауымд. профессор, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, г. Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8174-4209

***Жанкелді Әділет Жанкелдіұлы,*** PhD, ассоц. профессор, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8174-4209

***Zhankeldi Adilet,*** PhD, associate professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8174-4209

***Зигангиров Сергей Анатольевич,*** докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: zigangirov1972@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

***Зигангиров Сергей Анатольевич,*** докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров Университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: zigangirov1972@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

***Zigangirov Sergey Anatol`evich,*** Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: zigangirov1972@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

***Имагамбетов Манарбек Болатович,*** ғылым магистрі, аға оқытушы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: imagambetov.m.b@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-7070-6523

***Имагамбетов Манарбек Болатович,*** магистр наук, ст.преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: imagambetov.m.b@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-7070-6523

***Imagambetov Manarbek Bolatovich,*** Master of Science, Senior lecturer, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aqtobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: imagambetov.m.b@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-7070-6523

***Исабек Зарина Рамазановна*** PhD, қауым.профессор, Машина жасау және стандарттау кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров атындағы университет, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ZarinaChina@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-8895-050X

***Исабек Зарина Рамазановна*** PhD, ассоц. профессор, кафедра «Машиностроение и стандартизация», Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ZarinaChina@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-8895-050X

***Issabek Zarina Ramazanovna*** PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Standardization, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ZarinaChina@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-8895-050X

***Исагулова Диана Аристотелевна,*** PhD, қауымд. профессоры, докторы, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: isagulovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

***Исагулова Диана Аристотелевна,*** PhD, ассоц. профессор, факультет машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: isagulovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

***Issagulova Diana Aristotelevna,*** PhD, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: isagulovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0166-0225

***Исагулов Аристотель Зейнуллинович,*** техника ғылымдарының докторы, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасының профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

***Исагулов Аристотель Зейнуллинович,*** доктор технических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии и металлургии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

***Isagulov Aristotel Zeinullinovich,*** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Nanotechnology and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic Of Kazakhstan, e-mail: aristotel@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2174-9072

***Искаков Бауыржан Мырзабекович,*** PhD, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасының оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7939-0210

***Искаков Бауыржан Мырзабекович,*** PhD, преподаватель кафедры «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7939-0210

***Iskakov Bauyrzhan,*** PhD, Lecturer at the Department of «Technology of Food, Food and Processing Industries» S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7939-0210

***Искаков Думан Серикович,*** Көлік бойынша директор, «Universal tech decisions» ЖШС, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: office@utd.kz, duman.iskakov@utd.kz, https://orcid.org/0009-0003-6598-2471

***Искаков Думан Серикович,*** Көлік бойынша директор, «Universal tech decisions» ЖШС, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: office@utd.kz, duman.iskakov@utd.kz, https://orcid.org/0009-0003-6598-2471

***Duman Iskakov Serikovic,*** Director of Transport, «Universal tech decisions» LLP, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: office@utd.kz, duman.iskakov@utd.kz, https://orcid.org/0009-0003-6598-2471

***Какимов Мухтарбек Муханович,*** техника ғылымдарының кандидаты, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасының меңгерушісі, профессор С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

***Какимов Мухтарбек Муханович,*** кандидат технических наук, Зав.кафедрой «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств» профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

***Kakimov Mukhtarbek,*** Candidate of technical sciences, Head of the Department of «Food Technology and Processing Products», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

***Калиева Орынтай Кабатаевна,*** профессор, аға оқытушы, Сәулет–құрылыс факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: oryntay.kalieva.@ mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4408-9152

***Калиева Орынтай Кабатаевна,*** ст. преподаватель, Факультет Архитектуры и строительства, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: oryntay.kalieva.@ mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4408-9152

***Kalieva Orintay Kabatayevna,*** Senior lecturer, Faculty of Architecture and Construction, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: oryntay.kalieva.@ mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4408-9152

***Камзанов Нұрбол Садықұлы,*** Транспорттық инженерия ОП жетекшісі, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050033, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

***Камзанов Нурбол Садыкаонвич,*** Руководитель ОП Транспортная инженерия Сәтбаев университеті, г. Алматы, 050033, Республика Казахстан, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

***Kamzanov Nurbul Sadykaonvich,*** Head of the Department of Transport Engineering, Satbayev University, Almaty, 050033, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

***Карсакова Нургуль Жолаевна,*** «Машинажасау» мамандығы бойынша докор PhD, А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100024, Қазақстан Республикасы, e-mail: Karsakova-87@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2002-1557

***Карсакова Нургуль Жолаевна,*** PhD, специальность «Машиностроение», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 100024, Республика Казахстан, e-mail: Karsakova-87@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2002-1557

***Karsakova Nurgul Zholaevna,*** PhD, specialty «Mechanical engineering», Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, 100024, Republic of Kazakhstan, e-mail: Karsakova-87@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2002-1557

***Касенов Амиржан Леонидович,*** техника ғылымдарының докторы, профессор, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: amirzhan-1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7715-1128

***Касенов Амиржан Леонидович,*** доктор технических наук, профессор, кафедра «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: amirzhan-1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7715-1128

***Kassenov Amirzhan,*** Doctor of Technical Sciences, Professor, Department «Technology of food, food and processing industries», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: amirzhan-1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7715-1128

***Касенов Асылбек Жумабекович,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140007, Қазақстан Республикасы, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

***Касенов Асылбек Жумабекович,*** кандидат технических наук, профессор, факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140007, Республика Казахстан, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

***Kasenov Asylbek Zhumabekovich,*** Candidate of technical sciences, professor, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140007, Republic of Kazakhstan, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

***Касымов Умирзак Тажигалиевич,*** техника ғылымдарының докторы, профессор, «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасы, Физика техника институты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kasimov.umirzak@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1391-6312

***Касымов Умирзак Тажигалиевич,*** доктор технических наук, профессор, кафедра «Космическая техника и технологии», Физико-Тезнический институт, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: kasimov.umirzak@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1391-6312

***Umirzak Tazhigalievich Kassymov,*** Doctor of Technical Sciences, Professor, Department «Space Engineering and Technologies», Institute of Physics and technology, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic Of Kazakhstan, e-mail: kasimov.umirzak@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1391-6312

***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

***Квон Светлана Сергеевна,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

***Квон Светлана Сергеевна,*** кандидат технических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии и металлургии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

***Kvon Svetlana Sergeevna,*** Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of «Nanotechnology and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic Of Kazakhstan, e-mail: svetlana.1311@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

***Келаманов Бауыржан Сатыбалдыұлы,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасы, Техникалық факультет, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bkelamanov@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7646-9513

***Келаманов Бауыржан Сатыбалдыулы,*** кандидат технических наук, профессор, кафедра «Металлургия и горное дело», Технический факультет, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: bkelamanov@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7646-9513

***Kelamanov Bauyrzhan Satybaldyuly,*** Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Metallurgy and Mining, Technical Faculty, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, 030000, Republic Kazakhstan, e-mail: bkelamanov@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7646-9513

***Ким Александр Сергеевич,*** техника ғылымдарының докторы, Бор зертханасының бас ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: boron_213@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0772-1268

***Ким Александр Сергеевич,*** доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лабораторией Бор, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г.Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: boron_213@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0772-1268

***Kim Aleksandr,*** Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of laboratory, Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Kazakhstan, boron_213@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0772-1268

***Ковалев Павел Валерьевич,*** техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Петр Великий атындағы Санкт-Петербург политехникалық университеті, Санкт-Петербург қ., 195251, Ресей Федерациясы, e-mail: @kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

***Ковалев Павел Валерьевич,*** кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, e-mail: @kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

***Kovalev Pavel Valer'evich,*** PhD, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: @kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

***Ковалева Татьяна Викторовна,*** PhD, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасының оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: Sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

***Ковалева Татьяна Викторовна,*** доктор PhD, преподаватель кафедры «Нанотехнологии и металлургии» Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: Sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

***Tatyana Viktorovna Kovaleva,*** PhD, Lecturer of the Department of «Nanotechnology and Metallurgy» Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: Sagilit@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1186-1805

***Кожагельдиев Бекмырза Жанабергенович,*** докторант, ғылыми қызметкер, Энергетика және машина жасау институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: bekmyrza.k@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9094-3015

***Кожагельдиев Бекмырза Жанабергенович,*** докторант, научный сотрудник, Институт энергетики и машиностроения, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: bekmyrza.k@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9094-3015

***Kozhageldiyev Bekmyrza,*** Doctoral Student, Institute of Energy and Mechanical Engineering, K. I. Satbayev Kazakh national research technical university, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: bekmyrza.k@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9094-3015

***Кокаева Гульнара Айтикеновна,*** техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессоры, «Технологиялық машиналар және жабдықтар» кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

***Кокаева Гульнара Айтикеновна,*** кандидат технических наук, ассоц. профессор, кафедра «Технологические машины и оборудование», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

***Kokayeva Gulnara,*** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technological Machines and Equipment, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.kokaeva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9571-5081

***Кокин Саид Болатович,*** ғылыми қызметкері, Қазақстан Ғылым және технологиялар институты, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: saidzhara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2461-2231

***Кокин Саид Болатович,*** научный сотрудник, Казахстанский институт науки и технологий, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: saidzhara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2461-2231

***Kokin Said Bolatovich,*** Research Associate, Kazakhstan Institute of Science and Technology, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: saidzhara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2461-2231

***Кольга Анатолий Дмитриевич,*** профессор, техника ғылымдарының докторы, Орал мемлекеттік аграрлық университеті, Екатеринбург қ., 620075, Ресей Федерациясы, e-mail: kad-55@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8761-3429

***Кольга Анатолий Дмитриевич,*** профессор, доктор технических наук, Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, 620075, Российская Федерациясы, e-mail: kad-55@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8761-3429

***Kolga Anatoly Dmitrievich,*** Professor, Doctor of Technical Sciences, Ural State Agrarian University, 620075, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: kad-55@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8761-3429

***Куатова Молдир Жангелдиевна,*** PhD, У. А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Алматы қ., 05000, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0002-7614-6124

***Куатова Молдир Жангелдиевна,*** PhD, Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекоова, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0000-0002-7614-6124

***Kuatova Moldir Zhangeldievna,*** PhD, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Joldasbekov, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0002-7614-6124

***Кузьминова Надежда Юрьевна,*** магистр, аға оқытушысы, «Металдарды қысыммен өңдеу» кафедрасы, Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: nadeyak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1705-0405

***Кузьминова Надежда Юрьевна,*** магистр, ст. преподаватель кафедры «Обработка металлов давлением», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: nadeyak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1705-0405

***Kuzminova Nadezhda Yurievna,*** Master, Senior Lecturer, Department of «Pressure Processing of Metals», Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400 Republic of Kazakhstan, e-mail: nadeyak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1705-0405

***Куликов Виталий Юрьевич,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, ҒТМ кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

***Куликов Виталий Юрьевич,*** кандидат технических наук, профессор, кафедр НТМ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: mlpikm@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

***Kulikov Vitaly Yurievich,*** PhD, Professor of the Department of NTM, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: mlpikm@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

***Курбанбеков Шерзод Рустамбекович,*** PhD, доцент, Ходжа Ахмет Ясауи атындағы ХҚТУ, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5510-0568

***Курбанбеков Шерзод Рустамбекович,*** PhD, доцент, МКТУ имени Ходжа Ахмет Ясауи, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5510-0568

***Kurbanbekov Sherzod Rustambekovich,*** PhD, Associate Professor, Khoja Akhmet Yassawi IKTU, Turkestan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: sherzod.kurbanbekov@ayu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5510-0568

***Қажмұхамбетов Жолдасбек Борамбайұлы,*** докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: josik_79@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

***Кажмухамбетов Жолдасбек Борамбаевич,*** докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: josik_79@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

***Kazhmukhambetov Zholdasbek Borambayevich,*** Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: josik_79@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5901-2083

***Қайролла Бақтияр Қайратоллаұлы,*** ғылыми қызметкер, Қазақстан ғылым және технологиялар институты, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: dark.kz.best@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3883-7124

***Кайролла Бактияр Кайратоллаулы,*** научный сотрудник, Казахстанский институт науки и технологий, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: dark.kz.best@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3883-7124

***Kairolla Baktiyar Kairatollauly,*** researcher, Kazakhstan Institute of Science and Technology, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: dark.kz.best@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3883-7124

***Қизатов Айбар Советбекұлы,*** «Металлургиялық инженерия» мамандығы бойынша докторант, Инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: kizatov.aibar.sovetbekuly@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

***Қизатов Айбар Советбекұлы,*** докторант по специальности «Металлургическая инженерия», Школа инженерии, ВКТУ имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: kizatov.aibar.sovetbekuly@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

***Kizatov Aibar Sovetbekuly,*** Doctoral candidate in the specialty «Metallurgical engineering», School of Engineering, D. Serikbayev EKTU, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: kizatov.aibar.sovetbekuly@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-6627-9742

***Қизатова Еркежан Асанқызы,*** Физика орталығының оқытушысы, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: erke_kizatova@mail.

***Қизатова Еркежан Асанқызы,*** преподаватель, Центр физики, ВКТУ имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: erke_

***Kizatova Erkezhan Asankyzy,*** Lecturer, Physics Center, D. Serikbayev EKTU, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: erke_kizatova@mail.

ru, https://orcid.org/0009-0005-8296-6355

kizatova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8296-6355

ru, https://orcid.org/0009-0005-8296-6355

***Қуанышбекова Құндыз Қуанышбекқызы,*** докторант, «Көлік инженериясы» кафедрасы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kundyz0903@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-5293-1291

***Қуанышбекова Құндыз Қуанышбекқызы,*** докторант, кафедра «Транспортная инженерия», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: kundyz0903@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-5293-1291

***Kuanyshbekova Kundyz Kuanyshbekkyzy,*** PhD Student, Department of Transport Engineering, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kundyz0903@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-5293-1291

***Лебедева Милана Сергеевна,*** студент, Сәулет-құрылыс факультеті, Торайғыров атындағы университет, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы,e-mail: shinonomebless@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-3059-8779

***Лебедева Милана Сергеевна,*** студент, Факультет «Архитектуры и строительства», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: shinonomebless@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-3059-8779

***Lebedeva Milana,*** Student, Faculty of Architecture and Construction, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: shinonomebless@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-3059-8779

***Лопатин Владимир Юрьевич,*** техника ғылымдарының кандидаты, доцент, МИСИС Университеті «Ұнтақты металлургия және композиционды материалдар» факультеті, 119049, Мәскеу қ., Ресей Федерациясы, e-mail: lopatin63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

***Лопатин Владимир Юрьевич,*** кандидат технических наук, доцент, МИСИС Университет «Порошковая металлургия и композиционные материалы» факультет, 119049, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: lopatin63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

***Lopatin Vladimir Iurevich,*** Candidate of Technical Sciences, Associate professor MISIS University Powder metallurgy and composite materials, Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: lopatin63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1294-9198

***Маздубай Асылхан Владимирович,*** PhD, қауымд. профессор (доцент), инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: asylkhan_m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

***Маздубай Асылхан Владимирович,*** PhD, ассоц. профессор (доцент), факультет инженерии, Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: asylkhan_m@mail.ru , https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

***Mazdubay Assylkhan Vladimirovich,*** PhD, Associate Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: asylkhan_m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

***Молдаханов Бекболат Әскерханұлы,*** PhD, аға ғылыми қызметкер, «ЕВРОПЛЮС ВОСТОК» ЖШС, Өскемен қ., 070010, 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, 070010, Республика Казахстан, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

***Moldakhanov Bekbolat Askerkhanovich,*** PhD, senior researcher, «EUROPLUS VOSTOK» LLP, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: bek_m78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2977-693X

***Мазина Юлия Ильинична,*** PhD, қауымд.профессор «Сәулет және дизайн» білім беру бағдарламасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140003, Қазақстан Республикасы, e-mail: mazina1809@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2538-0044

***Мазина Юлия Ильинична,*** PhD, ассоц. профессор ОП «Архитектура и дизайн», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: mazina1809@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2538-0044

***Mazina Yulia,*** PhD, Associate Professor of the educational program «Architecture and Design» Toraigyrov University, Pavlodar, 140003 Republic of Kazakhstan, e-mail: mazina1809@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-2538-0044

***Макашев Куаныш Токтарбекович,*** PhD, қауымд. профессор, Торайгыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.kuanysh87@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2971-6322

***Макашев Куаныш Токтарбекович,*** PhD, ассоц. профессор, Торайгыров университет, Павлодар қ., 140000, Республика Казахстан, e-mail: m.kuanysh87@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2971-6322

***Makashev Kuanysh Toktarbekovich,*** PhD, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.kuanysh87@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2971-6322

***Мамбетов Дулат Муратович,*** 8D07113 «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» ББББ бойынша докторанты, «Көлік инженериясы» кафедрасы, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық

***Мамбетов Дулат Муратович,*** докторант по ОП 8D07113 «Транспорт, транспортная техника и технологии», кафедры «Транспортная инженерия», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н.

***Dulat Muratovich Mambetov,*** Doctoral student in EP 8D07113 «Transport, Transport Equipment and Technologies», Department of «Transport Engineering», Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic

университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dulat7172@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-3779-6000

Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: dulat7172@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-3779-6000

of Kazakhstan, e-mail: dulat7172@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-3779-6000

***Матешов Арман Кариевич,*** аға оқытушы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: makashka_m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6301-546X

***Матешов Арман Кариевич,*** ст. преподаватель, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: makashka_m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6301-546X

***Mateshov Arman,*** Senior Lecturer, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: makashka_m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6301-546X

***Мендалиева Сауле Илинична,*** техника ғылымдары кандидаты, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: saule-decanuf@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4819-8656

***Мендалиева Сауле Илинична,*** кандидат технических наук, старший преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: saule-decanuf@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4819-8656

***Mendalieva Saule Ilinichna,*** Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: saule-decanuf@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4819-8656

***Мурзабекова Кенжегуль Абсултановна,*** техника ғылымдарының кандидаты, Менеджмент мектебінің қауымд. профессор, БҰ Алматы менеджмент университеті, Алматы қ., 050060, Қазақстан Республикасы, e-mail: mkaken@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4906-8976

***Мурзабекова Кенжегуль Абсултановна,*** кандидат технических наук, ассоц. профессор Школы менеджмента, УО «Алматы менеджмент университет» г. Алматы, 050060, Республика Казахстан e-mail: mkaken@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4906-8976

***Murzabekova Kenzhegul Absultanovna,*** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, School of Management, Almaty Management University, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan, e-mail: mkaken@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4906-8976

***Мурсалыкова Майгуль Тауржановна,*** PhD, постдокторант, «Технологиялық жабдықтар» кафедрасы, Семей қаласының Шәкәрім атындағы 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 «Технологическое оборудование», университет имени 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 «Food Technology and Processing Products», Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

***Мусаев Медгат Мұратұлы,*** ассоц. профессор, А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kstu_mmm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9875-8159

***Мусаев Медгат Муратович,*** ассоц. профессор, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: kstu_mmm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9875-8159

***Mussaev Medgat Muratovich,*** Associate Professor, Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: kstu_mmm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9875-8159

***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, ассоц. 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, Torayghirov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2233-4947

***Мустафа Азамат Қойшықұлұлы,*** PhD, Ғылыми қызметкер, Сәтбаев университетінің Машина жасау кафедрасының қауымдастырылған профессоры, 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, Научный сотрудник, ассоц. профессор кафедры Машиностроение, Сатпаев университет, ТОО RnD Center, г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

***Mustafa Azamat,*** PhD, Researcher, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kaakhstan, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4751-7141

***Мухаметжанова Айжан Весмовна,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор міндетін атқарушы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: mukhametzhanova.v@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3577-3831

***Мухаметжанова Айжан Весмовна,*** доктор технических наук, и.о. профессора, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан e-mail: mukhametzhanova.v@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3577-3831

***Mukhametzhanova Aizhan Vesmovna,*** Doctor of Technical Sciences acting professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: mukhametzhanova.v@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3577-3831

***Мыңжасар Есмурат Амангалиұлы,*** «Металлургия» мамандығы бойынша Қарағанды индустриялық университетінің докторанты, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: ye.myngzhassar@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4268-5664

***Мыңжасар Есмурат Амангалиұлы,*** докторант Карагандинского индустриального университета по специальности «Металлургия», младший научный сотрудник лаборатории «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: ye.myngzhassar@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4268-5664

***Myngzassar Yesmurat,*** Doctoral student of Karaganda Industrial University in the specialty «Metallurgy», Junior researcher at the laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: ye.myngzhassar@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4268-5664

***Мырзабеков Нурлыбек Мырзабекович,*** докторант, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurlybekmyrzabekov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-4845-8614

***Мырзабеков Нурлыбек Мырзабекович,*** докторант, Евразиский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: nurlybekmyrzabekov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-4845-8614

***Myrzabekov Nurlybek Myrzabekovich,*** PhD student, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurlybekmyrzabekov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-4845-8614

***Муканов Руслан Батырбекович,*** PhD, қауымд. профессор, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: ruslangr82@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

***Муканов Руслан Батырбекович,*** PhD, ассоц. профессор, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: ruslangr82@mail.ru, 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: ruslangr82@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

***Никитин Владимир Андреевич,*** магистрант, Торайгыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nik07.vv@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-4905-2576

***Никитин Владимир Андреевич,*** магистрант, Торайгыров университет, Павлодар к., 140000, Республика Казахстан, e-mail: nik07.vv@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-4905-2576

***Nikitin Vladimir Andreevich,*** Master's degree candidate, Toraygyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nik07.vv@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-4905-2576

***Нургали Нуржан Зулхайнарович,*** техника ғылымдарының кандидаты, пирометаллургия менеджері, «ERG ғылыми-зерттеу және инжиниринг орталығы» ЖШС, Астана қ., 010017, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurzhan.nurgali@erg.kz, https://orcid.org/0000-0002-0477-7867

***Нургали Нуржан Зулхайнарович,*** кандидат технических наук, менеджер по пирометаллургии, ТОО «Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG», г. Астана, 010017, Республика Казахстан, e-mail: nurzhan.nurgali@erg.kz, https://orcid.org/0000-0002-0477-7867

***Nurgali Nurzhan Zulkhainarovich,*** Candidate of Technical Sciences, Pyrometallurgy Manager, ERG Scientific Research Engineering Center LLP, Astana, 010017, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurzhan.nurgali@erg.kz, https://orcid.org/0000-0002-0477-7867

***Нұғман Ерік Зейнелұлы,*** PhD, қауымд. профессор, Ғылыми қызметкер, Сәтбаев университетінің Машина жасау кафедрасының меңгерушісі,ЖШС RnD Center, Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

***Нұғман Ерік Зейнелұлы,*** PhD, ассоц. профессор, Научный сотрудник, Заведующий кафедрой Машиностроение, Сатпаев университет, ТОО RnD Center, г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

***Nugman Yerik,*** PhD, Associate Professor, Head of Department Mechanical Engineering and Satbayev University, Researcher, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kaakhstan, e-mail: e.nugman@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4537-9440

***Окишев Константин Юрьевич,*** Физика-математика ғылымдарының докторы, доцент, «Металдарды термиялық өңдеу және физикасы» кафедрасының профессоры, Орал федералды университеті (УрФУ), Екатеринбург қ., Ресей Федерациясы, e-mail: k.okishev@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-6331-3050

***Окишев Константин Юрьевич,*** доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Термообработки и физики металлов» Уральский федеральный университет (УрФУ). г. Екатеринбург, Российская Федерациясы, e-mail: k.okishev@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-6331-3050

***Окишев Константин Юрьевич,*** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Heat Treatment and Physics of Metals», Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: k.okishev@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-6331-3050

***Onuralp Yucel,*** PhD, профессор, «Металлургия» мамандығы, Istambul Technical University, Стамбул қ., Турция, 34000–34999, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

***Onuralp Yucel,*** PhD, профессор, Istambul Technical University, по специальности «Металлургия», г. Стамбул, Турция, 34000–34999, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

***Onuralp Yucel,*** PhD, Professor, Istambul Technical University, specialty «Metallurgy», Istanbul, Turkey, 34000-34999, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

***Омаров Жумабек Мухтарович,*** техника ғылымдарының кандидаты, доцент Сәулет-құрылыс факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhumabek–omarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1108-9509

***Омаров Жумабек Мухтарович,*** кандидат технических наук, доцент, Факультет Архитектуры и строительства, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhumabek–omarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1108-9509

***Omarov Zhumabek Mukhtarovich,*** Candidate of Technical Sciences, associate professor, Faculty of Architecture and Construction, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhumabek–omarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1108-9509

***Оралбекова Аяулым Оралбековна,*** PhD, ассоц. профессор (доцент), «Көліктегі автоматтандыру және электроэнергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы қ., 050063, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayaulym83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4030-0740

***Оралбекова Аяулым Оралбековна,*** PhD, ассоц. профессор (доцент), заведующая кафедрой «Автоматизация и электроэнергетика на транспорте», Международный транспортно-гуманитарный университет, г. Алматы, 050063, Республика Казахстан, e-mail: ayaulym83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4030-0740

***Oralbekova Ayaulym Oralbekovna,*** PhD, Associate Professor, Head of the Department «Automation and electric power in transport», International University Transport and Humanities, Almaty, 050063, Republic of Kazakhstan, e-mail: ayaulym83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4030-0740

***Ордабаева Гульсайра Муайыковна,*** аға оқытушы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ordabaeva72@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4262-2812

***Ордабаева Гульсайра Муайыковна,*** ст. преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: ordabaeva72@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4262-2812

***Ordadayeva Gulsaira Muaiykovna,*** Senior lecturer K. Zhubanov Aktobe regional university, Aqtobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ordabaeva72@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4262-2812

***Орлов Алексей Сергеевич,*** PhD, Бор зертханасының аға ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: wolftailer@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

***Орлов Алексей Сергеевич,*** PhD, ст. научный сотрудник лаборатории Бор, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: wolftailer@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

***Orlov Alexey,*** PhD, Senior Researcher at the Laboratory of Boron, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: wolftailer@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

***Павлов Сергей,*** Халықаралық қолданбалы радиоэлектроника Ғылым Академиясының академигі, Биомедициналық Инженерия және Оптикалық-электронды жүйелер кафедрасының профессоры, Винница Ұлттық техникалық университеті, Винница қ., 21012, Украина, e-mail: psv@vntu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-0051-5560

***Павлов Сергей,*** Академик Международной академии наук прикладной радиоэлектроники, профессор кафедры биомедицинской инженерии и оптико-электронных систем Винницкого национального технического университета г. Украина, 21012, Винница, e-mail: psv@vntu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-0051-5560

***Pavlove Sergii,*** Academicianof International Applied Radioelectronic Science Academy, Professor of Biomedical Engineering and Optic-Electronic Systems Department, Vinnytsia National Technical University Vinnytsia, Ukraine, 21012, e-mail: psv@vntu.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-0051-5560

***Ракишева Аделина Аделевна,*** докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: adelinarakisheva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7020-5672

***Ракишева Аделина Аделевна,*** докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: adelinarakisheva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7020-5672

***Rakisheva Adelina Adelevna,*** PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: adelinarakisheva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7020-5672

***Сагитов Алмат Ардакович,*** PhD, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: almat1990@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

***Сагитов Алмат Ардакович,*** PhD, ст. преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: almat1990@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

***Sagitov Almat Ardakovich,*** PhD, Senior Lecturer, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: almat1990@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3835-9353

***Сағатова Ләйла Бақытжанқызы,*** аға оқытушы, Satbayev University, 050013, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: laila-sagatova@mail.ru, l.sagatova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-3918-288X

***Сагатова Лейла Бакытжанкызы,*** ст.преподаватель, Satbayev University, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: laila-sagatova@mail.ru, l.sagatova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-3918-288X

***Sagatova Laila Bakytzhankyzy,*** Senior Lecturer, Satbayev University, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: laila-sagatova@mail.ru, l.sagatova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-3918-288X

***Саканов Куандык Тимирович,*** техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Торайгыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kuan_altei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2897-2947

***Саканов Куандык Тимирович,*** кандидат технических наук, профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: kuan_altei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9959-5566

***Sakanov Kuandyk Timirovich,*** Candidate Technical Sciences, Professor, Toraygyrov University, Pavlodar, 140000, e-mail: Republic of Kazakhstan, e-mail: kuan_altei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9959-5566

***Сариев Отеген Рафхатович,*** техника ғылымдарының кандидаты, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының профессоры, Техникалық факультет, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: osariyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0745-848X

***Сариев Отеген Рафхатович,*** кандидат технических наук, профессор кафедры «Металлургия и горное дело», Технический факультет, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: osariyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0745-848X

***Sariev Otegen Rafkatovich,*** Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgy and Mining, Technical Faculty, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, 030000, Republic Kazakhstan, e-mail: osariyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0745-848X

***Сапинов Руслан Викторович,*** PhD, Инженерия факультетінің Машина жасау және стандарттау кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ruslan.sapinov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

***Сапинов Руслан Викторович,*** PhD, ассоц профессор, кафедра Машиностроение и стандартизация, факультета Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ruslan.sapinov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

***Sapinov Ruslan Viktorovich,*** PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Standardization, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan. Pavlodar, e-mail: ruslan.sapinov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9334-5806

***Сауханов Нургазы Сергазиевич,*** техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurgazy.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: nurgazy.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

***Saukhanov Nurgazy Sergazievich,*** Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, K. Zhubanov Aktobe regional university, Aqtobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurgazy.saukhanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7292-4752

***Свидерская Диана Сергеевна,*** техника ғылымдарының кандидаты, Сәулет және дизайн ББ қауымд. профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140003, Қазақстан Республикасы, e-mail: sofilsev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3329-1126

***Свидерская Диана Сергеевна,*** кандидат технических наук, ассоц. профессор ОП Архитектура и дизайн, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: sofilsev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3329-1126

***Sviderskaya Diana,*** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the educational program Architecture and Design Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, e-mail: sofilsev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3329-1126

***Спанов Саят Сәбитұлы,*** докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: spanov_82@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

***Спанов Саят Сабитович,*** докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: spanov_82@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

***Spanov Sayat Sabitovich,*** Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: spanov_82@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-2679-247X

***Сулейменов Ансаган Дюсембаевич,*** PhD, қауымд. профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, 140008, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: Ansar_muslim_91@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

***Сулейменов Ансаган Дюсембаевич,*** PhD, ассоц. профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, 140008, г. Павлодар, Республика Казахстан, e-mail: Ansar_muslim_91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

***Suleimenov Ansagan Dyusembaevich,*** PhD, associate professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, 140008, Pavlodar city, Republic of Kazakhstan, e-mail: Ansar_muslim_91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

***Сүлейменова Гүлфариза Абатбекқызы,*** техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, М. Тынышбаев атындағы ALT университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sma-1980@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7099-8441

***Сүлейменова Гүлфариза Абатбекқызы,*** кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизация и управление», ALT университет имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: sma-1980@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7099-8441

***Suleimenova Gulfariza Abatbekkyzy, ,*** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control, ALT University named M. Tynyshpaev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sma-1980@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7099-8441

***Султангазиев Руслан Бауыржанович,*** PhD, НТМ кафедрасының доцент м.а., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: sulrus83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3928-486X

***Султангазиев Руслан Бауыржанович,*** PhD, и.о. доцента кафедры НТМ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: sulrus83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3928-486X

***Sultangaziev Ruslan,*** PhD, Acting Associate Professor of the Department NTM, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: sulrus83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3928-486X

***Таскарина Айжан Жумажановна,*** PhD, профессор, Инженерия факультеті, 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, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: aya_taskarina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799

***Taskarina Aizhan,*** PhD, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: aya_taskarina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799

***Таттимбетова Гулим Болатовна,*** «Машина жасау» мамандығы бойынша докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tattimbetova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-4476-5933

***Таттимбетова Гулим Болатовна,*** докторант по специальности «Машиностроение», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: tattimbetova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-4476-5933

***Tattimbetova Gulim,*** Doctoral student in «Mechanical Engineering», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: tattimbetova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-4476-5933

***Тогизбаева Баглан Болсыновна,*** техника ғылымдарының докторы, «Көлік инженериясы» кафедрасының профессоры, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: togizbayeva_bb@enu.kz, https://orcid.org/0009-0008-3544-2614

***Тогизбаева Баглан Болсыновна,*** доктор технический наук, профессор кафедры «Транспортная инженерия», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: togizbayeva_bb@enu.kz, https://orcid.org/0009-0008-3544-2614

***Togizbayeva Baglan Bolsynovna,*** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Engineering, Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: togizbayeva_bb@enu.kz, https://orcid.org/0009-0008-3544-2614

***Тулепбек Надира Тулепбекқызы,*** «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы қ., 050063, Қазақстан Республикасы, e-mail: tntalmaty0503@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-3600-4255

***Тулепбек Надира Тулепбекқызы,*** докторант по специальности «Автоматизация и управление», Международный транспортно-гуманитарный университет, г. Алматы, 050063, Республика Казахстан, e-mail: tntalmaty0503@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-3600-4255

***Tulepbek Nadira Tulepbekkyzy,*** Doctoral student in «Automation and control», International University Transport and Humanities, Almaty, 050063, Republic of Kazakhstan, e-mail: tntalmaty0503@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-3600-4255

***Туганбаева Асем Адильханқызы,*** «Металлургия» мамандығы бойынша докторант, «Нанотехнология және металлургия» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: dicosia0789@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-1248-8100

***Туганбаева Асем Адильхановна,*** докторант по специальности «Металлургия», кафедры «Нанотехнологии и металлургии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: dicosia0789@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-1248-8100

***Tuganbaeva Asem Adilkhanovna,*** PhD Student in the specialty «Metallurgy», Department of «Nanotechnology and Metallurgy», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: dicosia0789@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-1248-8100

***Тулегенова Шолпан Нығметовна,*** Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті ҒТМ кафедрасының аға оқытушысы, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: sholpan.tulegenova.65@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0750-1233

***Тулегенова Шолпан Нығметовна,*** ст. преподаватель кафедры НТМ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: sholpan.tulegenova.65@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0750-1233

***Tulegenova Sholpan Nygmetovna,*** Senior lecturer of the Department of NTM, NAO Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: sholpan.tulegenova.65@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0750-1233

***Турусбекова Айнур,*** «Машинажасау» мамандығы бойынша докторант, А. Сағынов атындағы Қарағандытехникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Ainurturusbekova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8007-1690

***Турусбекова Айнур,*** докторант по специальности «Машиностроение», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: Ainurturusbekova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8007-1690

***Turusbekova Ainur,*** PhD student in Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: Ainurturusbekova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8007-1690

***Тусупова Саягуль Ораловна,*** PhD, постдокторант «Машина жасау және стандарттау» кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: suleeva.s@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-8920-4901

***Тусупова Саягуль Ораловна,*** PhD, постдокторант кафедры «Машиностроение и стандартизация», факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: suleeva.s@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-8920-4901

***Tussupova Sayagul Oralovna,*** PhD, Postdoctoral Fellow, Department of Mechanical Engineering and Standardization, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar,140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: suleeva.s@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-8920-4901

***Фуад Хошнау,*** аға оқытушы Инженерия және Тұрақты даму мектебі, Есептеу, инженерия және медиа факультеті, Де Монфорт университеті, Лестер қ., Ұлыбритания, e-mail: fuad.khoshnaw@dmu.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4467-1944

***Фуад Хошнау,*** ст. преподаватель, Школа инженерии и устойчивого развития, Факультет вычислительной техники, инженерии и медиа, Университет Де Монфорта, г. Лестер, Великобритания, e-mail: fuad.khoshnaw@dmu.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4467-1944

***Fuad Khoshnaw,*** Senior Lecture, School of Engineering and Sustainable Development, Faculty of Computing, Engineering and Media, De Montfort University, Leicester, United Kingdom, e-mail: fuad.khoshnaw@dmu.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4467-1944

***Хамид Макхамов,*** PhD, профессор, Нортумбрия университеті, Ньюкасл қ., Ұлыбритания, e-mail: khamid.mahkamov@northumbria.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4028-7654

***Хамид Макхамов,*** PhD, профессор, университет Нортумбрии, г. Ньюкасл Великобритания, e-mail: khamid.mahkamov@northumbria.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4028-7654

***Khamid Mahkamov,*** PhD, Professor, University of Northumbria, Newcastle city,United Kingdom, e-mail: e-mail: khamid.mahkamov@northumbria.ac.uk, https://orcid.org/0000-0002-4028-7654

***Чукенова Эльвира Серикона,*** докторант, Сәтбаев университетінің «Машина жасау» кафедрасы, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: elvira_85-11@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4371-5989

***Чукенова Эльвира Серикона,*** докторант кафедры «Машиностроение» Университета им. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: elvira_85-11@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4371-5989

***Chukenova Elvira Serikona,*** PhD student of the «Mechanical Engineering» Department at Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: elvira_85-11@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4371-5989

***Шеров Айбек Карибекович,*** PhD, «Машинажасау» мамандығы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: knyazluni@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

***Шеров Айбек Карибекович,*** PhD по специальности «Машиностроение», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: knyazluni@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

***Sherov Aibek Karibekovich,*** PhD in the specialty «Mechanical engineering», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: knyazluni@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

***Шеров Карибек Тагаевич,*** техника ғылымдарының докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

***Шеров Карибек Тагаевич,*** доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан,e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

***Sherov Karibek,*** Doctor of Technical Sciences, professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: shkt1965@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0209-180X

***Шукаманов Жанибек Ерикович,*** аға оқытушы, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасы, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: shukamanov@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3017-7133

***Шукаманов Жанибек Ерикович,*** ст. преподаватель кафедры «Автоматизация и телекоммуникация», Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: shukamanov@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3017-7133

***Shukamanov Zhanibek Yerikovich,*** Senior Lecturer of the Department of Automation and Telecommunications, Taraz University named M. H. Dulati, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: shukamanov@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3017-7133

***Янюшкин Александр Сергеевич,*** техника ғылымдарының докторы, профессор. Машина жасау факультеті, И. Н. Ульянов атындағы Чуваш мемлекеттік университеті, Чебоксары қ., 428015, Чуваш Республикасы, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

***Янюшкин Александр Сергеевич,*** доктор технических наук, профессор, Факультет машиностроения, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, 428015, Чувашская Республика, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

***Yanushkin Alexander Sergeevich,*** Doctor of Technical Sciences, Professor. Faculty of Mechanical Engineering. I. N. Ulyanov, Chuvash State University, Cheboksary, 428015, Chuvash Republic, e-mail: yanyuishkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1969-7840

***Яковлев Владимир Сергеевич,*** аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Халықаралық инженерлік мектебі, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

***Яковлев Владимир Сергеевич,*** старший преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, международной школы инженерии. 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, International School of Engineering, 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.**

***Квитанция об оплате предоставляется после принятия статей к публикации. Стоимость публикации в журнале составляет 20 000 тенге для направлений металлургия, машиностроение и транспорт, а для остальных направлений 1 000 тенге за страницу.**

***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 01 февраля;
- второй квартал до 01 мая;
- третий квартал до 01 августа;
- четвертый квартал до 01 ноября.

**Квитанция об оплате предоставляется после принятия статей к публикации. Стоимость публикации в журнале составляет 20 000 тенге для направлений металлургия, машиностроение и транспорт, а для остальных направлений 1 000 тенге за страницу.**

**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»<br>РНН 451800030073<br>БИН 990140004654 | НАО «Торайгыров университет»<br>РНН 451800030073<br>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»<br>ИИК KZ57998FTB00 00003310<br>БИК TSESKZK A<br>Кбе 16<br>Код 16<br>КНП 861 | АО «Народный Банк Казахстана»<br>ИИК KZ156010241000003308<br>БИК HSBKKZKX<br>Кбе 16<br>Код 16<br>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 к 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 к 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<br>«Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант<br>«Торайғыров университеті» КЕАҚ,<br>Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті,<br>Павлодар,<br>140008,<br>Қазақстан Республикасы,<br>samal_antikeyeva@mail.ru,<br>8-000-000-00-00 | Антикеева Самал Канатовна<br>докторант по специальности «Педагогика и психология»<br>НАО «Торайгыров университет»,<br>Факультет гуманитарных и социальных наук,<br>Павлодар,<br>140008,<br>Республика Казахстан,<br>samal_antikeyeva@mail.ru,<br>8-000-000-00-00 | Samal Kanatovna Antikeyeva<br>doctoral student in «Pedagogy and psychology»<br>«Toraighyrov University»<br>NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences,<br>Pavlodar,<br>140008,<br>Republic of Kazakhstan,<br>samal_antikeyeva@mail.ru,<br>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 27.08.25 ж. жіберілді. Басуға 30.09.25 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
Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4434

«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