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

№ 1 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ
выходит 1 раз в квартал

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

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

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

Подписной индекс – 76129

https://doi.org/10.48081/BGQF1903

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

Айтуганова Ж. Т., Исмайылов А. Е., Полатова Ж. Б., Асанов Б. У.
Математическая модель и анализ двухконтурного рулевого механизма Аккермана для мобильного робота.....7
Амангалиев Е. З., Шадхин Ю. И.
Электромобильдің электр жетегінің «жиілік түрлендіргіш – вентильді қозғалтқыш» тұйық бейсызықты жүйесінің тұрақтылығын талдау.....23
Ахмедов Д. Ш., Сейдахмет А. Ж.
Концепция представления плоских рычажных механизмов системой материальных точек с наложенными связями.....40
Байгереев С. Р., Гурьянов Г. А., Сулейменов А. Д., Ғабдысалық Р.
Материалдарды майдалап ұнтақтау тиімділігіне күш әсері бағытының ықпалын бағалау.....57
Berg A. S., Zharkevich O. M., Berg A. A., Altynbayev A. Zh., Smagulov A. S.
Using sand-polymer composite as an alternative to steel parts in belt conveyor rollers.....70
Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю.
Термическое оборудование для напыления порошкообразных природных материалов.....81
Куликов В. Ю., Квон Св. С., Сапиянова А. М.
Повышение эксплуатационных свойств деталей при двуслойном покрытии их поверхностей газотермическим напылением.....95
Қуанов И. С., Дөненбаев Б. С., Шеров А. К., Тусупова С. О., Бөбеев А. Б.
Hardox 450 болатын импульсті салқындатуға ие термофрикциялық фрезерлеу аймағындағы температураны зерттеу.....110
Маратұлы Б., Азаматов Б. Н., Муздыбаев М. С., Кустарев Г. В., Бекмырза Ж. А.
Магнетрондық тұндырудың технологиялық процесінің параметрлері және алынған жабындардың сипаттамаларын салыстыру.....123
Мендалиева С. И., Шеров К. Т., Бердімұратова Д. И., Турусбекова А., Хан В. А.
Агроөнеркәсіптік кешеннің жөндеу өндірісінде аддитивті технологияларды қолдану өзектілігі туралы.....133

Молдаханов Б. А., Дудкин М. В., Лешневский Т.,
Яковлев В. С., Байгунусов А. Ж.
Оптимизация технологических параметров тонкости измельчения материалов
на основе математического моделирования второго порядка.....145
Mursalykova M., Kakimov M., Iskakov B.,
Mustafayeva A., Shulenova A.
Development of a centrifuge with a conical rotor for the
primary purification of vegetable oils.....164
Сарбаев Д. А., Бузауова Т. М.
Ірімодульды құрастырмалы тісті дөңгелек қақпағының және бекіту
элементтерінің параметрлерін есептеу және негіздеу
Таскарина А. Ж., Мусина Ж. К., Касенов А. Ж.,
Муканов Р. Б., Искакова Д. А.
Разработка и исследование резцовой сборной развёртки нового поколения
с регулируемыми безвершинными зубьями по винтовой линии.....177
Таттимбек Г., Мардонов Б. Т., Маздубай А. В.,
Ержанова А. Е., Жумагалиев Б. О.
Экспериментальное исследование термофрикционной обработки впадин
зубьев крупномодульных прямозубых цилиндрических зубчатых колес.....192
Tussupbekova G. M., Cieślik J., Tulieva N. B.,
Tazhenova G. D., Oryntaeva G. Zh.
Study of the formation of secondary contact structure.....202

МЕТАЛЛУРГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

Баймолданова Л. С., Рахадилов Б. К.,
Сакенова Р. Е., Ажибаева М. А.
Формирование нанокомпозитной структуры покрытий
tisicn при реактивном плазменном напылении.....224
Богомолов А. В., Спанов С. С., Бегалиев Р. А.,
Быков П. О., Каменов А. А.
Қасиеттер деңгейі жоғары төмен қоспаланған болаттарды алуды
және өндірістің экологиялылығын зерттеу.....236
Досжанов К. К., Сариев О. Р., Абдулабеков Е. Э.,
Келаманов Б. С., Әбдірашит А. М.
Апробация экологически безопасной технологии стабилизации шлаков
феррохрома путем регулирования их химического состава.....250
Zhunusov A., Tyulyubayev R., Zhunusova A.,
Bakirov A., Kenzhebekova A.
Study of physical and chemical properties
of pellets obtained from aluminum slag.....261
Жұмашев К., Нарембекова А., Жумағалиев Е. У.,
Шабанов Е. Ж., Орынбаев Б. М.
Переработка пыли газоочистки производства феррохрома
серной кислотой в хромовый концентрат.....274

Kabylkanov S., Makhambetov Ye., Abdulina S.,
Zhumagaliev Ye., Yucel O.
Investigation of the process of chromium-manganese ligature production
under large-scale laboratory smelting conditions.....290
Толоконникова В. В., Байсанов С. О., Нарикбаева Г. И.,
Орлов А. С., Салина В. А.
Математический вид линии кристаллизации кремния в системе
железо-кремний на основе концепции бьеррума-гуггенгейма.....302

КӨЛІК
ТРАНСПОРТ
TRANSPORT

Камысбаева А. Т., Бекжанова С. Е., Тәжібайұлы Ә.
Ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды
тасымалдаудың тұрақтылығына әсер ететін факторлар:
Қазақстан жағдайындағы талдау.....316
Мурзахметова У. А., Сембаев Н. С., Қабашев А. Р.,
Қабашева М. Р., Алшынова А. М.
Көлік құралдарының бөлшектерінің істен шығуын зерттеу
және қосымша бөлшектерді пайдалану.....330
Суранчиев М. Т., Сейітқазы Н. С., Маханов М., Умбетбеков А.Т.
Проектирование испытательного стенда для оценки
поперечной устойчивости самоходных машин.....342
Тулеков А. Б., Сулейменов Т. Б., Балабекова К. Г., Забиева А. Б.
Мұнара кранының жебе құрылымында композиттік
материалды қолдану тиімділігін бағалау.....357
Усупов С. С.
Определение тяговой способности приводного барабана ленточного
конвейера при переменном коэффициенте трения.....368
Khusenov U. U., Suyunbaev Sh. M., Kassymzhanova A. D.
Design of a balanced train timetable on a single-track railway
section through running speed optimization.....378
Шукаманов Ж. Е., Сулейменова Г. А.
Оценка влияния стохастических задержек на пропускную
способность железнодорожного участка.....392

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors 405

Авторларға арналған ережелер
Правила для авторов
Rules for authors 440

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics 450

МАШИНА ЖАСАУ

МРНТИ 55.30.31, 55.30.03
https://doi.org/10.48081/BGQF1904

Ж. Т. Айтуганова[1,2], А. Е. Исмайылов[2],
Ж. Б. Полатова[3], Б. У. Асанов[4]
[1]Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[2,3]Алматинский Технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0013-8272
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0089-7036
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0881-8707
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5668-2563
*e-mail: zhamila_a77@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ ДВУХКОНТУРНОГО РУЛЕВОГО МЕХАНИЗМА АККЕРМАНА ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

В статье представлена математическая модель двухконтурного рулевого механизма мобильного робота, основанного на геометрии Аккермана и дополненного корректирующим ПД-контуром по ошибке положения. Целью исследования является повышение точности следования заданной траектории за счёт сочетания точной геометрической модели внутреннего контура и адаптивной обратной связи внешнего контура. В работе построены кинематические уравнения движения, выведены зависимости для расчёта кривизны и управляющих углов, а также проведён формальный анализ устойчивости корректирующего ПД-регулятора.

Методика исследования включает численное моделирование в среде MATLAB, позволяющее оценить динамику движения платформы, траекторию следования, ошибку положения и влияние шумов на стабильность управления. Для верификации предложенного подхода выполнено сравнение одноконтурной и двухконтурной систем рулевого управления. Результаты моделирования демонстрируют значительное снижение среднеквадратичной ошибки следования траектории при использовании двухконтурного механизма. Показано, что внешняя ПД-коррекция обеспечивает устойчивость и робастность управления даже в условиях гауссовых шумов.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной двухконтурной архитектуры и её применимость для систем управления мобильными роботами, автономными транспортными платформами и другими мехатронными устройствами, требующими высокой точности движения. Модель отличается вычислительной простотой и может

быть использована как в учебных целях, так и для реализации в реальных робототехнических платформах.

Ключевые слова: геометрия Акермана, двухконтурное управление, мобильный робот, точность траектории, регулятор ПД, моделирование MATLAB.

Введение

Современные мобильные робототехнические платформы находят широкое применение в логистике, сельском хозяйстве, автономных транспортных системах и интеллектуальной технике. Одним из ключевых требований к таким платформам является высокая точность следования заданной траектории в условиях ограниченного пространства, внешних возмущений и неизбежных конструктивных погрешностей. Традиционные схемы рулевого управления, основанные на геометрии Аккермана, обеспечивают минимизацию бокового проскальзывания управляемых колёс, однако их точность существенно снижается при реальных отклонениях, ошибках датчиков, неровностях дорожного покрытия и динамических эффектах [1].

Для повышения точности управления в литературе активно развиваются подходы, интегрирующие физико-геометрические модели с корректирующими контурами обратной связи. Однако большинство таких работ ограничены рассмотрением только кинематических законов поворота или используют сложные алгоритмы управления (например, MPC), требующие значительных вычислительных ресурсов. В этой связи актуальной является задача разработки доступной, вычислительно эффективной и устойчивой системы рулевого управления, которая сочетает преимущества геометрической модели Аккермана и адаптивной коррекции ошибок.

Объектом исследования является мобильная четырёхколёсная платформа с управляемой передней осью.

Предметом исследования-двухконтурный рулевой механизм, включающий внутренний геометрический контур Аккермана и внешний корректирующий контур на основе ПД-регулятора [2].

Цель исследования является разработка строгой математической модели двухконтурного рулевого механизма, проведение анализа устойчивости внешнего корректирующего контура и количественная оценка повышения точности следования траектории по сравнению с одноконтурной системой.

Гипотеза исследования-введение корректирующего контура на основе ПД-регулятора обеспечивает:

– снижение RMS-ошибки следования траектории;

– повышение устойчивости и робастности управления;

– компенсацию возмущений и ошибок одометрии;

– улучшение динамики при движении по криволинейным траекториям.

Научная новизна-разработана интегрированная математическая модель двухконтурного рулевого механизма, объединяющая точную геометрию Аккермана и корректирующее управление по ошибке положения.

Проведён формальный анализ устойчивости внешнего ПД-контроллера на основе линеаризированной системы ошибок движения.

Получены количественные показатели улучшения точности движения (RMS, максимальная ошибка, устойчивость при наличии шумов), демонстрирующие превосходство двухконтурной системы над одноконтурной [3].

Практическая значимость

Разработанная модель может быть использована:

– при проектировании наземных мобильных роботов, сельхозмашин и автономных платформ;

– в системах управления AGV/AMR;

– в обучении и лабораторных работах при изучении робототехники и мехатроники;

– в программной реализации алгоритмов рулевого управления в MATLAB/Simulink.

Таким образом, предложенный подход обеспечивает теоретическую и прикладную основу для создания точных, устойчивых и вычислительно эффективных рулевых систем мобильных роботов.

Материалы и методы

Разработка модели двухконтурного рулевого механизма требует комплексного подхода, включающего формализацию кинематической модели мобильной платформы, математическое описание геометрического контура Аккермана и построение внешнего корректирующего контура управления.

Геометрический (внутренний) контур управления

Базовая идея механизма Аккермана заключается в том, что при повороте управляемых колес все оси колес пересекаются в одной точке - центре поворота. Это обеспечивает отсутствие бокового скольжения и равномерное вращение колес [4].

При классическом управлении Колесо поворачивается на δ → траектория изгибается на кривизну к → которой соответствует радиус R (рис. 1).

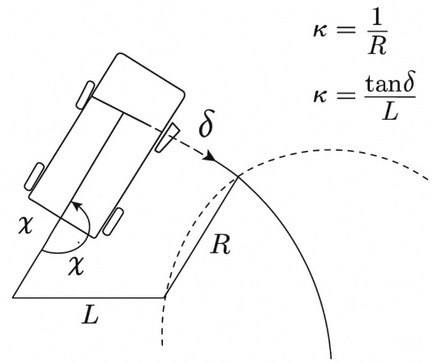


Рисунок 1 – Схема рулевого механизма Аккермана

Отсюда:

$$\kappa = \frac{1}{R}, \qquad \kappa = \frac{tan\,\delta}{L} \tag{1}$$

$$R = \frac{L}{tan\,\delta}$$

Углы поворота правого и левого колеса:

$$\delta_L = arctan(\frac{L}{R-W/2}), \ \delta_R = arctan(\frac{L}{R+W/2}) \tag{2}$$

где:

L − база платформы (расстояние между осями колес),

W − колея (расстояние между колёсами)

R − радиус поворота центра масс платформы.

На практике эти значения вычисляются на основе текущей кривизны маршрута или требуемой скорости поворота [5].

Внешний (корректирующий) контур управления

Второй контур добавляется как система стабилизации, корректирующая отклонения платформы от заданной траектории. Используются данные от датчиков положения (GPS, энкодеры, IMU и др.) и алгоритмы управления, основанные на отклонении:

$$e_y = y - y_{ref}$$

$$e_\theta = \theta - \theta_{ref} \tag{3}$$

Применяется ПД-регулятор:

$$u_{corr}(t) = -K_p\, e_y(t) - K_d\, \dot{e}_y(t) \tag{4}$$

где K_p, K_d – коэффициенты, подбираемые для устойчивости.

На основе этих ошибок корректируется угол поворота:

$$\delta(t) = \delta_{Ack}(t) + u_{corr}(t) \tag{5}$$

Таким образом, рулевое управление становится адаптивным: внутренний контур задаёт основу, а внешний − стабилизирует.

Схема двухконтурного механизма рулевого управления показана на рисунке 2.

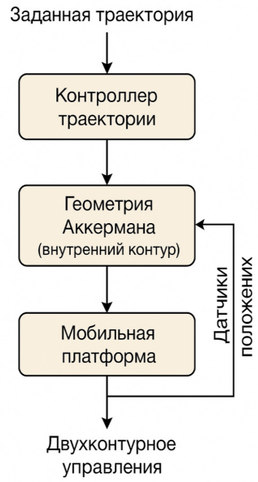


Рисунок 2 – Схема двухконтурного механизма рулевого управления

Анализ устойчивости внешнего контура

Линеаризуем систему ошибок:

$$\dot{e}_y = ue_\theta$$

$$\dot{e}_\theta = \frac{u}{L} \tag{6}$$

Подставим ПД-регулятор:

$$u = -K_p e_y - K_d v e_\theta \tag{7}$$

Тогда:

$$\dot{e}_\theta = -\frac{v}{L} K_p e_y - \frac{v}{L} K_d v e_\theta \tag{8}$$

Из уравнении (6) и (8) получаем систему:

$$\begin{cases} \dot{e}_y = ve_\theta \\ \dot{e}_\theta = -ae_y - be_\theta \end{cases} \tag{9}$$

где

$$a = \frac{v}{L} K_p > 0$$

$$a = \frac{v}{L} K_d > 0$$

Характеристическое уравнение:

$$s^2 + bs + a = 0 \quad (10)$$

Условия устойчивости: $a > 0,\ b > 0 \ \rightarrow \ K_p > 0,\ K_d > 0$

Численное моделирование

Моделирование выполнено в MATLAB (таб. 1) с использованием явного интегрирования по шагу:

$$x_{k+1} = x_k + \dot{x}_k \Delta t,\ y_{k+1} = y_k + \dot{y}_k \Delta t,\ \theta_{k+1} = \theta_k + \dot{\theta}_k \Delta t \quad (11)$$

Таблица 1 – Использованные параметры

Параметр	Обозначение	Значение
База	L	1.2 м
Колея	W	0.6 м
Скорость	v	1 м/с
Шаг интегрирования	Δt	0.01 с
Время моделирования	t	20 с
Коэффициенты ПД	K_p, K_d	1.0, 0.2

По таблице 1:

– параметры соответствуют типовой мобильной платформе Pioneer 3-AT;

– шаг интегрирования обеспечивает численную стабильность;

– K_p, K_d выбраны по критерию апериодического переходного процесса [6].

Моделирование шумов и возмущений

Чтобы проверить робастность управления, в корректирующий контур введено аддитивное шумовое воздействие:

$$\varepsilon(t) \sim N(0, \delta^2),\ \delta = 0.05 \quad (12)$$

Полный управляющий сигнал:

$$\delta(t) = \delta_{Ack}(t) - K_p e_y - K_d \dot{e}_y + \varepsilon(t) \quad (13)$$

Кинематическая модель движения мобильной платформы

Для мобильной платформы с переднеприводным управлением используется модель с учётом поворота передней оси. Предполагается, что робот движется

по поверхности с постоянной скоростью v, а угол поворота передних колес − δ. Центр масс платформы находится на расстоянии L от задней оси [7].

Кинематические уравнения движения:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= v \cdot cos(\theta(t)) \\ \dot{y}(t) &= v \cdot sin(\theta(t)) \\ \dot{\theta(t)} &= \frac{v}{L} \cdot tan(\delta(t)) \end{aligned} \quad (14)$$

где:

– x(t),y(t) − координаты платформы;

– θ(t) − угол ориентации (курс);

– δ(t) − управляющий угол поворота передних колес.

Данная модель описывает движение центра платформы в глобальной системе координат.

Геометрическая модель рулевого механизма Аккермана (внутренний контур)

Принцип геометрии Аккермана реализует идею, при которой колёса в повороте не скользят, а оси всех четырёх колес пересекаются в одной точке − центре поворота.

Углы поворота левого (δL) и правого (δR) колеса определяются из формулы (2) или в более практичной форме:

$$\delta_L = arctan\left(\frac{2L \cdot sin(\delta)}{(2L \cdot cos(\delta) - W \cdot sin(\delta))}\right), \delta_R = arctan\left(\frac{2L \cdot sin(\delta)}{(2L \cdot cos(\delta) + W \cdot sin(\delta))}\right) \quad (15)$$

Эта модель обеспечивает исходный поворот платформы на основе заданной траектории без учёта ошибок следования [8].

Корректирующий контур управления (внешний контур)

Для повышения точности следования реальному маршруту в условиях возмущений используется корректирующий контур, реализующий обратную связь по положению и углу курса. Он использует ошибку между фактической и заданной позицией:

$$e(t) = y_{\text{реальное}}(t) - y_{\text{заданное}}(t), \theta e(t) = \theta(t) - \theta_{\text{заданное}}(t) \quad (16)$$

Корректирующий сигнал рассчитывается по закону пропорционально-дифференциального регулятора:

$$u_{\text{корр}}(t) = K_P \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

и итоговый управляющий угол задаётся по формуле (5).

В результате робот корректирует своё движение, компенсируя боковое смещение, и сохраняет высокую точность даже при отклонениях от маршрута.

Методика численного моделирования

Численное моделирование служит инструментом для оценки эффективности двухконтурного рулевого механизма и проверки теоретических результатов, полученных в предыдущих разделах. Моделирование проводится в среде MATLAB, которая позволяет реализовать интегрирование кинематической модели, вычисление управляющих воздействий, визуализацию траекторий и анализ ошибок [9].

Шаг 1. Задание траектории движения

Заданная траектория формируется в виде функции координат или кривизны. В качестве тестовой используется синусоидальная траектория:

$$y_{ref}(x) = 2sin(0.2x) \tag{18}$$

что позволяет оценить способность системы следовать криволинейным траекториям, чувствительным к ошибкам ориентации и бокового смещения.

Шаг 2. Интегрирование кинематической модели

Движение платформы описывается системой дифференциальных уравнений (14), которые интегрируются методом явного шага Эйлера:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \dot{x}_k \Delta t \\ y_{k+1} &= y_k + \dot{y}_k \Delta t \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \dot{\theta}_k \Delta t \end{aligned} \tag{19}$$

Выбранный шаг интегрирования Δt=0.01 с обеспечивает численную устойчивость при небольших углах поворота колёс.

$$\delta_{Ack}(k) = arctan(L_\kappa\,(k)$$

$$\kappa(k) = \frac{y'_{ref}(x_\kappa)}{1 + (y'_{ref}(x_k))^2} \tag{20}$$

что задаёт геометрически корректный поворот платформы.

Шаг 4. Формирование корректирующего воздействия:

– Положение и ориентация сравниваются с заданными по формуле (3);

– ПД-регулятор формирует по фомуле (7) корректирующий сигнал;

– Полный управляющий угол определяется по формуле (5).

– Шаг 5. Учет случайных возмущений

– Полный управляющий угол определяется по формуле (5);

– Для анализа робастности вводится аддитивный шум:

$$\varepsilon(t) \sim N(0, 0.05^2)$$

$$\delta(k) \leftarrow \delta(k) + \varepsilon(k) \tag{21}$$

Это позволяет оценить поведение системы при реальных помехах (ошибки датчиков, неровности, ветер).

Шаг 6. Сохранение и визуализация результатов

На каждом шаге записываются:

– координаты (xk,yk);

– ориентация θk;

– управляющий угол δk;

– ошибка следования ey(k);

– RMS-ошибка:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{k=1}^{N} e_y^2(k) \tag{22}$$

Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности предложенной двухконтурной структуры управления были проведены численные эксперименты в среде MATLAB. Моделирование выполнялось для мобильной платформы с параметрами, приведёнными в разделе «Материалы и методы», при движении по синусоидальной траектории $y_{ref}(x)=2\sin(0.2x)$.

Рассматривались два основных сценария:

Одноконтурное управление − только геометрический контур Аккермана без внешней коррекции;

Двухконтурное управление − геометрический контур Аккермана с внешним ПД-корректором по ошибке положения.

Дополнительно исследовалось влияние шумов в корректирующем контуре [10].

Сравнение одноконтурного и двухконтурного управления

На рисунке 3 приведено сравнение заданной и фактической траекторий движения для одноконтурной и двухконтурной систем.

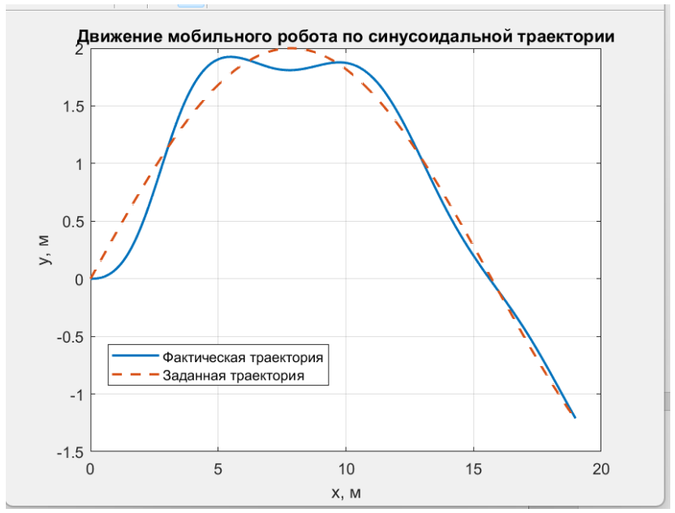


Рисунок 3 – Движение мобильного робота по синусоидальной траектории

В случае одноконтурного управления отклонения от траектории заметно возрастают на участках с большой кривизной (максимумы и минимумы синусоиды). Это связано с тем, что геометрия Аккермана обеспечивает корректный поворот колёс, но не компенсирует накопленные ошибки положения и ориентации.

В двухконтурном режиме внешняя ПД-коррекция по поперечной ошибке e_y и её производной позволяет существенно уменьшить отклонения. Фактическая траектория практически совпадает с эталонной, а максимальные ошибки наблюдаются лишь в переходных режимах при входе на криволинейный участок. Визуальный анализ графиков показывает, что двухконтурная система обеспечивает более «плавное» и устойчивое следование траектории.

Количественно точность оценивалась с помощью среднеквадратичной ошибки (RMS) формула (22).

Для одноконтурного управления RMS-ошибка составляет порядка единиц метра, тогда как при двухконтурном управлении её значение уменьшается примерно в 2–3 раза (до величины порядка 0.5 м и ниже, в зависимости от настроек регулятора). Таким образом, введение внешнего контура позволяет значительно повысить точность следования траектории без усложнения кинематической модели.

Динамика ошибок и управляющих воздействий

На рисунке 4 показано изменение поперечной ошибки $e_y(t)$ во времени.

Рисунке 4 – Изменение поперечной ошибки $e_y(t)$ во времени

Для одноконтурной системы ошибка возрастает на поворотах и медленно затухает, что свидетельствует о слабых демпфирующих свойствах системы. В двухконтурном случае наблюдается выраженное затухание колебаний ошибки: после начального переходного процесса её амплитуда стабилизируется на существенно меньшем уровне.

Рисунок 5 иллюстрирует изменение управляющего угла поворота колёс δ(t).

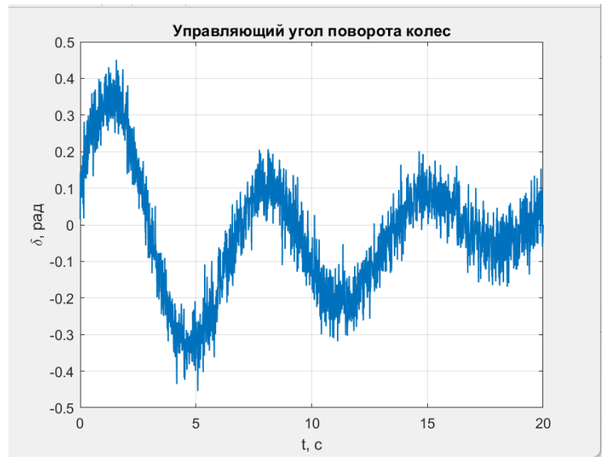


Рисунок 5 – Изменение управляющего угла поворота колёс

В двухконтурной системе управляющий сигнал становится более активным: регулятор формирует дополнительные корректирующие воздействия при появлении ошибки. При этом не наблюдается резких скачков или насыщения угла поворота, что говорит о корректном выборе коэффициентов ПД-регулятора и согласуется с проведённым анализом устойчивости.

Влияние шумов и робастность двухконтурной системы

Для проверки работоспособности системы в условиях неопределённости в модель был введён аддитивный шум в корректирующий контур, моделируемый как белый гауссов шум с нулевым средним и заданной дисперсией. На рисунке 5 показана траектория движения при наличии шума.

Несмотря на случайные колебания управляющего сигнала, платформа продолжает следовать заданной траектории, а колебания фактического пути не приводят к срыву управления. Это указывает на робастность разработанной схемы: двухконтурное управление сохраняет устойчивость и приемлемую точность даже при наличии существенных помех в измерениях и управляющем воздействии.

Анализ RMS-ошибки при различных уровнях шума показывает, что:

– при отсутствии шума RMS минимальна и соответствует погрешностям численного интегрирования и начальным отклонениям;

– при введении шума среднего уровня RMS возрастает, но остаётся в допустимых пределах для задач навигации мобильных роботов;

– рост дисперсии шума приводит к постепенному увеличению RMS, однако система остаётся устойчивой в широком диапазоне значений.

Выводы

В работе разработана математическая модель двухконтурного рулевого механизма мобильного робота, объединяющая геометрию Аккермана с внешним ПД-контуром по ошибке положения. Предложенная архитектура сочетает геометрическую точность внутреннего контура и динамическую стабилизацию внешней обратной связью. Научная новизна исследования заключается в формальном анализе влияния корректирующего контура на траекторию движения, устойчивость системы и её чувствительность к стохастическим возмущениям.

Численные эксперименты в MATLAB показали, что двухконтурный механизм обеспечивает значительное снижение среднеквадратичной ошибки следования траектории по сравнению с одноконтурным управлением и сохраняет устойчивость при наличии шумов. Система демонстрирует высокую робастность и отличается вычислительной простотой, что делает её пригодной для реализации во встроенных контроллерах мобильных и автономных платформ.

Результаты исследования подтверждают практическую значимость предложенной модели для мобильных роботов, автономных транспортных платформ и других мехатронных систем, требующих высокой точности следования траектории. Дополнительной областью применения является образовательный процесс: модель может быть использована студентами при выполнении лабораторных и практических работ по дисциплинам «Робототехника»,

«Мехатронные и мобильные системы», «Теория управления», а также при освоении MATLAB-моделирования и анализа кинематических структур.

В дальнейшем планируется расширение модели за счёт учёта динамики рулевого привода, ограничений исполнительных механизмов, а также экспериментальная апробация на реальной робототехнической платформе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Rajamani, R.** Vehicle Dynamics and Control. − Springer, 2nd ed., 2012. − 500 p. [Динамика и управление транспортными средствами].

2 **LaValle, S. M.** Planning Algorithms. − Cambridge University Press, 2006. − 849 p. [Алгоритмы планирования].

3 **Nguyen, D. M., La, H. M.** Distributed Control Framework for Autonomous Multi-Robot Systems // IEEE Access. − 2018. − Vol. 6. − P. 31435–31447. [Распределённая система управления для автономных многороботных систем].

4 **Ибраев, Н. К., Нурахметов, А. Ш., Мырзахметов, Е. Ж.** Синтез управления мобильным роботом с учётом геометрии рулевого механизма Аккермана // Вестник НАН РК. – 2020. – № 5. – С. 112–118.

5 **Бенцер, А. Л., Панов, А. В.** Моделирование и управление мобильными роботами. – М. : МГТУ им. Баумана, 2015. – 264 с.

6 **Шалфеев, В. Д., Курбатов, С. А.** Модели и методы автоматического управления мобильными объектами. – Казань : КНИТУ, 2013. – 230 с.

7 MathWorks. MATLAB Documentation. Simulating Kinematic Models of Mobile Robots. – 2023. [Электронный ресурс]. – https://www.mathworks.com/help/robotics/ref/mobile-robot-kinematics.html. [Моделирование кинематических моделей мобильных роботов.] (дата обращения: 24.06.2025).

8 **Simionescu, P. A, Beale, D.** Optimum synthesis of the four-bar function generator in its symmetric embodiment: the Ackermann steering linkage. Mech Mach Theory [Оптимальный синтез четырёхзвенника-функционального генератора в его симметричном исполнении: рулевая схема Акермана // Теория машин и механизмов] 2002; 37(12): P. 1487–1504.

9 **Jomartov, A., Tuleshov, A.** Vector method for kinetostatic analysis of planar linkages // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering [Векторный метод кинетостатического анализа плоских шарнирных механизмов // Журнал Бразильского общества механических наук и инженерии], 40. – 2018. – https://doi.org/10.1007/s40430-018-1022-y.

10 **Тулешов, А. К., Айтуганова, Ж. Т., Абекова, А. Ж., Исмаилов, А. Е.** Разработка алгоритмов управления мобильным роботом на основе условий Аккермана // Вестник ЕНУ имени Л. Н. Гумилева. Серия : Технические науки и технологии. – 2025. – № 2. – С. 238–249.

REFERENCES

1 **Rajamani, R.** Vehicle Dynamics and Control. − Springer, 2nd ed., 2012. − 500 p.

2 **LaValle, S. M.** Planning Algorithms. − Cambridge University Press, 2006. − 849 p.

3 **Nguyen, D. M., La, H. M.** Distributed Control Framework for Autonomous Multi-Robot Systems // IEEE Access. − 2018. − Vol. 6. − P. 31435–31447.

4 **Ibraev, N. K., Nurakhmetov, A. Sh., Myrzakhmetov, E. Zh.** Sintez upravleniya mobil'nym robotom s uchetom geometrii rulevogo mekhanizma Akkermana [Synthesis of Control for a Mobile Robot Considering Ackermann Steering Geometry] // Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan – 2020. – № 5. – P. 112–118.

5 **Bentser, A. L., Panov, A. V.** Modelirovanie i upravlenie mobil'nymi robotami [Modeling and Control of Mobile Robots]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2015. – 264 p.

6 **Shalfeyev, V. D., Kurbatov, S. A.** Modeli i metody avtomaticheskogo upravleniya mobil'nymi ob'ektami [Models and Methods of Automatic Control of Mobile Objects]. Kazan: KNRTU, 2013. – 230 p.

7 MathWorks. MATLAB Documentation. Simulating Kinematic Models of Mobile Robots. – 2023. [Electronic resource]. – https://www.mathworks.com/help/robotics/ref/mobile-robot-kinematics.html (accessed: 24.06.2025).

8 **Simionescu, P.A., Beale, D.** Optimum synthesis of the four-bar function generator in its symmetric embodiment: the Ackermann steering linkage // Mechanism and Machine Theory. – 2002. – Vol. 37(12). P. 1487–1504.

9 **Jomartov, A., Tuleshov, A.** Vector method for kinetostatic analysis of planar linkages // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2018. – Vol. 40. – https://doi.org/10.1007/s40430-018-1022-y.

10 **Tuleshov, A.K., Aituganova, Zh.T., Abekova, A.Zh., Ismayilov, A.E.** Razrabotka algoritmov upravleniya mobil'nym robotom na osnove usloviy Akkermana [Development of Control Algorithms for a Mobile Robot Based on Ackermann Conditions] // Vestnik Yevraziyskogo natsional'nogo universiteta imeni L. N. Gumilyova, Seriya : Tekhnicheskie nauki i tekhnologii. – 2025. – № 2. – P. 238–249.

Поступило в редакцию 13.09.25.
Поступило с исправлениями 16.10.25.
Принято в печать 19.01.25.

Ж. Т. Айтуганова[1,2], А. Е. Исмайылов[2],
Ж. Б. Полатова[3], Б. У. Асанов[4]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2,3]Алматы технологиялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
13.09.25 ж. баспаға түсті.
16.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
19.01.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

МОБИЛЬДІ РОБОТ ҮШІН АККЕРМАННЫҢ ЕКІКОНТУРЛЫ РУЛЬДІК МЕХАНИЗМІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІСІ МЕН ТАЛДАУЫ

Мақалада Аккерман геометриясына негізделген және орындағы қателік бойынша түзетуші ПД-контурымен толықтырылған мобильді роботтың екіконтурлы рульдік механизміне арналған математикалық модель ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – ішкі контурдың дәл геометриялық моделін және сыртқы контурдың бейімделгіш кері байланысын біріктіру арқылы берілген траекторияны дәл орындауды арттыру болып табылады. Жұмыста қозғалыстың кинематикалық теңдеулері құрастырылып, қисықтық пен басқару бұрыштарын есептеу тәуелділіктері шығарылды, сондай-ақ түзетуші ПД-регулятордың тұрақтылығы формалды түрде талданды.

Зерттеу әдістемесі MATLAB ортасында сандық модельдеуді қамтиды, ол платформа қозғалысының динамикасын, траекторияның орындалуын, орындағы қателікті және шудың басқару тұрақтылығына әсерін бағалауға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсілді тексеру үшін бірконтурлы және екіконтурлы рульдік басқару жүйелерін салыстыру жүргізілді. Модельдеу нәтижелері екіконтурлы механизмді қолдану кезінде траекторияны орындаудың орташа квадраттық қатесінің айтарлықтай азайғанын көрсетті. Сыртқы ПД-түзету гаусстық шудың әсерінде де басқарудың тұрақтылығын және робасттылығын қамтамасыз ететіні дәлелденді.

Алынған нәтижелер ұсынылған екіконтурлы архитектураның тиімділігін және оны жоғары дәлдікті қозғалыс талап ететін мобильді роботтар, автономды көлік платформалары және басқа мехатроникалық құрылғылардың басқару жүйелерінде қолдануға болатындығын растайды. Модель есептеу тұрғысынан қарапайым және оны оқу процесінде де, нақты роботтық платформаларда да жүзеге асыруға болады.

Кілтті сөздер: Аккерман геометриясы, екіконтурлы басқару, мобильді робот, траектория дәлдігі, ПД-регулятор, MATLAB модельдеу.

***Zh. T. Aituganova*[1,2]*, A. E. Ismayilov*[2]*, Zh. B. Polatova*[3]*, B. U. Asanov*[4]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2,3]Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty
Received 13.09.25.
Received in revised form 16.10.25.
Accepted for publication 19.01.25.

MATHEMATICAL MODEL AND ANALYSIS OF A DUAL-LOOP ACKERMANN STEERING MECHANISM FOR A MOBILE ROBOT

The paper presents a mathematical model of a dual-loop steering mechanism for a mobile robot, based on Ackermann geometry and enhanced with a corrective PD loop compensating for position error. The aim of the study is to improve trajectory tracking accuracy by combining a precise geometric model of the inner loop with adaptive feedback from the outer loop. The work develops kinematic equations of motion, derives relations for curvature and steering angles, and performs a formal stability analysis of the corrective PD controller.

The research methodology includes numerical simulation in MATLAB, allowing evaluation of platform dynamics, trajectory tracking performance, position error, and the influence of noise on control stability. To verify the proposed approach, single-loop and dual-loop steering control systems were compared. Simulation results show a significant reduction in the root-mean-square trajectory tracking error when using the dual-loop mechanism. It is demonstrated that the external PD correction ensures control stability and robustness even under Gaussian noise conditions.

The obtained results confirm the effectiveness of the proposed dual-loop architecture and its applicability for control systems of mobile robots, autonomous transport platforms, and other mechatronic devices requiring high motion accuracy. The model is computationally simple and can be used both for educational purposes and for implementation in real robotic platforms.

Keywords: Ackermann geometry, dual-loop control, mobile robot, trajectory accuracy, PD controller, MATLAB simulation.

FTAMP 55.43.03
https://doi.org/10.48081/BGQF1905

***Е. З. Амангалиев*[1]*, Ю. И. Шадхин*[2]
[1]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]Г. Ж. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2842-2702
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2743-9092
*e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru

ЭЛЕКТРОМОБИЛЬДІҢ ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ «ЖИІЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШ – ВЕНТИЛЬДІ ҚОЗҒАЛТҚЫШ» ТҰЙЫҚ БЕЙСЫЗЫҚТЫ ЖҮЙЕСІНІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ТАЛДАУ

Электромобильге қозғалыс кезінде кәдімгі автокөлікке қандай күштер әсер етсе, тура сондай күштер әсер етеді. Олар:электр қозғалтқышының тарту күші, домалау үйкеліс күші, аэродинамикалық кедергі күші және айналу кедергісінің күші.Сондықтан электромобильдерде де қозғалыс кезінде автотербелістер пайда болады.

Мақалада қарастырылатын басты мәселе – электромобиль электр жетегінің автотербелістерге тұрақтылығы. Мақалада фазалық траектория әдісімен тұйық контурлы бейсызықты тұйық «жиілік түрлендіргіш - вентильді қозғалтқыш» жүйесінің тұрақтылығына талдау және бағдарлама жасалған. Бейсызықты жүйелерді талдау сызықтық жүйелерді талдаудан әлдеқайда қиын. Себебі, бірқатар ерекшеліктері бар. Біріншіден, бұл бейсызықты жүйенің тұрақтылығы бастапқы жағдайлар мен сыртқы әсерлерге тәуелді:кейбір кіріс сигналдарда жүйе тұрақты болуы мүмкін, ал басқа жағдайларда ол тұрақтылық қасиетін жоғалтады.

Бейсызықты жүйе үшін бірнеше тепе-теңдік ережелері болуы мүмкін болғандықтан, олардың әрқайсысының айналасында тұрақтылықты талдау қажет. Бұл әрине зерттеу мақсатын күрделендіреді. Жүйенің тұрақтылығын талдау – жүйе параметрлері өзгергеннен кейін бастапқы күйіне оралатынын немесе одан ауытқып, ақырында басқарылмайтын күйге айналатынын анықтау процесі. Жүйенің тұрақтылығы динамикалық басқару жүйелері үшін маңызды қасиет болып табылады, себебі тұрақсыз динамикалық жүйелер жағымсыз немесе тіпті қауіпті салдарға әкелуі мүмкін. Жүйенің тұрақтылығы тасымалдау функциясының түбірлік критерийнің түрі бойынша анықталады. Бейсызықты жүйенің негізгі мінез-құлық қасиеттерін сипаттайтын динамикалық сипаттамасы тасымалдау функциясының бөлгішінде болатын сипаттамалық көпмүше. Бөлгішті нөлге теңестіру арқылы түбірлері бойынша тұрақтылықты анықтайтын сипаттамалық теңдеуді алуға болады.

Динамикалық басқару жүйелерін талдаудың ең маңызды міндеті олардың тұрақтылығы мәселесін шешу болып табылады. Автоматты басқару жүйелерінің орнықтылығының техникалық түсінігі техникалық жүйенің

қалыпты режимдерде тұрақты жұмыс жасау ғана емес, сонымен қатар «бақылаудан шықпау» қасиетін көрсетеді.

Кілтті сөздер: вентильді қозғалтқыш, тұрақтылық, электр жетегі, бағдарлама, бейсызықты жүйе.

Кіріспе

Бейсызықты жүйе деп сызықты емес дифференциалдық теңдеулермен сипатталатын өтпелі процестер жүретін динамикалық жүйені айтады. Суперпозиция принципіне бағынбайтын жүйелер бейсызықты деп аталады. Егер жүйеде суперпозиция принципі орындалмайтын кем дегенде бір элемент болса, жүйе бейсызықты болып табылады. Суперпозиция принципі бойынша: Егер объектінің кірісіне бірнеше кіріс шамасы қолданылса, онда объектінің кіріс шамаларының қосындысына реакциясы объектінің әрбір шамасының жеке реакцияларының қосындысына тең болады.

Бейсызықты жүйедегі қозғалыстардың табиғаты сызықты жүйелерге қарағанда өзгеше. Бейсызықты жүйелерде тепе-теңдік күйінің тұрақтылығы бастапқы шарттарға байланысты, сондықтан бастапқы шарттарға байланысты қозғалыстың түрлері әртүрлі болуы мүмкін.

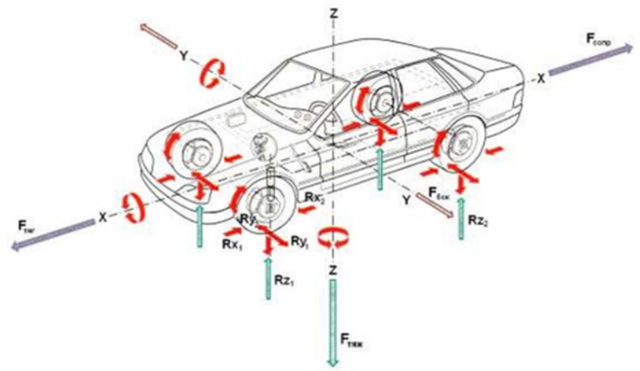
Бейсызықты жүйелердің амплитудасы мен жиілігі бастапқы шарттарға тәуелді емес. Бейсызықты жүйеде жүйе қасиеттерімен (өзіндік сөндірілмеген тербелістермен) анықталатын автотербелістер болуы мүмкін.

Автотербеліс – жүйеде ішкі энергия көздеріне байланысты пайда болатын және басқару мүмкіндігі мен қауіпсіздікке теріс әсер ететін сөндірілмеген тербеліс. Электромобильдерде автотербелістердің пайда болу себептері:

– Дөңгелектің жылтырлығы. Белгілі бір жылдамдықта дөңгелектер өздігінен бұрыла бастайды. Бұл теңгерімсіздік, шинаның тозуы немесе руль механизмінің ойнау салдарынан болуы мүмкін;

– Үздіксіз айнымалы беріліс қорабы жұмыс істеп тұрғанда және басқару жүйесі екі беріліс арасында үнемі ауысқанда,беріліс қорабының құрамдас бөліктеріндегі діріл;

– Тежелу кезінде пайда болатын бойлық тербелістер, әсіресе тайғақ беттерде, сырғанау жылдамдығы артқан сайын үйкеліс күші азайған кезде.



1-сурет – Электромобильге қозғалыс кезінде әсер ететін күштер проекциясы

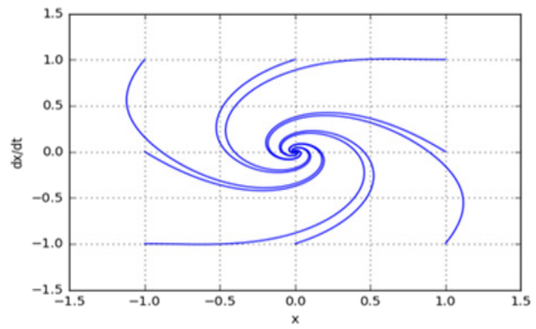
Электромобильдерде автотербелістердің пайда болуынан туындайтын жағымсыз қауіпті факторлар:

– Бақылауды жоғалту. Руль дөңгелектерінің дірілдері дәл басқаруды қиындатады немесе мүлдем мүмкін емес етеді;

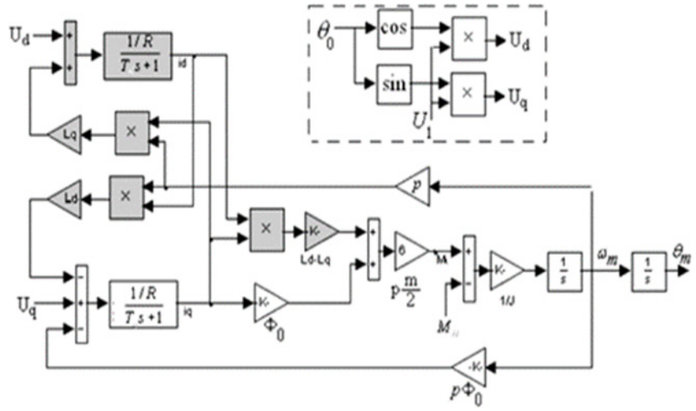
– Тартылыс күшінің азаюы. Доңғалақ жүктемесінің өзгеруі, әсіресе біркелкі емес кедір-бұдыр жолдарда, автокөлік дөңгелектерінің жол төсемімен жанасуының үзіліссіз жоғалуы нәтижесінде тежелу тиімділігінің төмендеуі;

– Аударылу. Жоғары жылдамдықта электромобиль күшті өздігінен теңселу салдарынан кенеттен бүйірге сырғып, нәтижесінде аударылып қалуы мүмкін.

– Құрылымдық әлсіреу. Тұрақты діріл мен тербеліс электромобильдің шанақ компоненттерінің, рульдік басқару жүйелерінің және басқа компоненттерінің әлсіреуіне немесе бұзылуына әкелуі мүмкін.



2-сурет – Тұрақты бейсызықты жүйенің фазалық кескіні



3- сурет – Matlab/Simulink бағдарламасында жасалған вентильді қозғалтқыштың құрылымдық сұлбасы

Материалдар мен әдістері

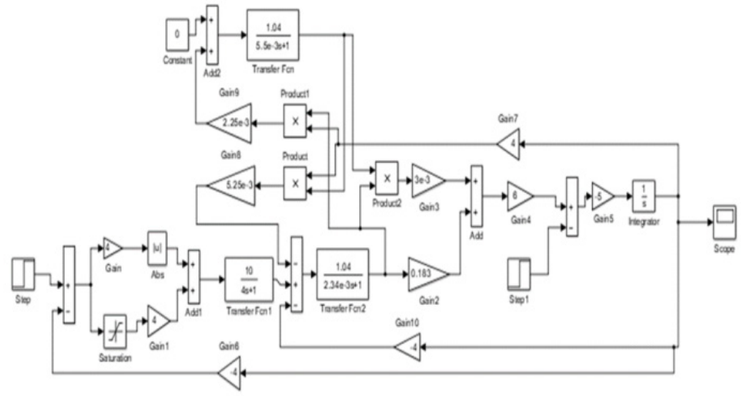
Жүйе тұрақтылығын талдау басқару жүйесін жобалаудың маңызды кезеңдерінің бірі болып табылады. Бейсызықты жүйелерді талдау үшін қажеттілік пен жеткіліктілік критерийлеріне толық жауап беретін бірде-бір әдіс жоқ, ал критерийлер, әдетте, тек жеткіліктілік (тұрақтылық үшін ғана) принципіне негізделген. Осыған сүйене отырып, кейбір жүйелер үшін тұрақтылық туралы біржақты айту мүмкін емес.

Сондықтан тұйық бейсызықты жүйенің тұрақтылығы аз зерттелген тақырып болып табылады. Бейсызықты жүйелердің тұрақтылығы мәселесі зерттеудің жеке тақырыбы ретінде салыстырмалы түрде ұзақ даму тарихына ие.

Тұрақтылық теориясының негізін қалаушы атақты орыс ғалымы, математигі Л. М. Ляпунов болды. Ол 1892 жылы әйгілі бейсызықты жүйелердің тұрақтылық теориясын ашты. Тұрақтылық теориясы негізінде бейсызықты жүйелердің қозғалысын Л. М. Ляпунов дифференциалды теңдеулер арқылы сипаттауға болатындығын математикалық түрде дәлелдеді [2]. Жиілік түрлендіргіші (ЖТ) құрылымдық сұлбада тасымалдау функциясы бар инерциялық звено ретінде қарастырылады:

$$W_{PR(S)} = \frac{k_{PR(S)}}{T_{PR(S)} + 1} \qquad (1)$$

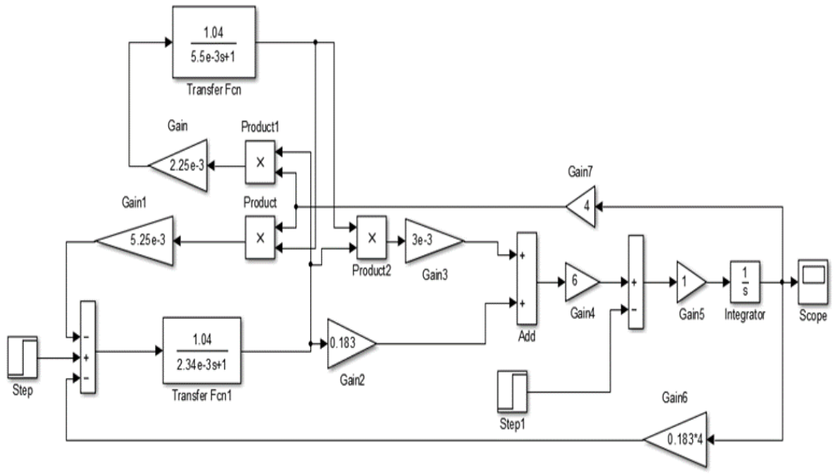
Электромобильдің қозғалыс кезінде автотербелістерге тұрақтылығы дегеніміз – электромобильдің біркелкі емес беттермен қозғалуы кезінде пайда болатын қолайсыз жағдайлар мен тербелістерге қарамастан, аударылу немесе сырғанауды тудыратын күштерге төтеп беру және берілген траектория бойынша қозғалу қабілеті. Тұйық контурлы «жиілік түрлендіргіш-вентильді қозғалтқыш» жүйесінің құрылымдық сұлбасы 4-суретте көрсетілген.



4-сурет – «Жиілік түрлендіргіш-вентильді қозғалтқыш» жүйесінің құрылымдық сұлбасы

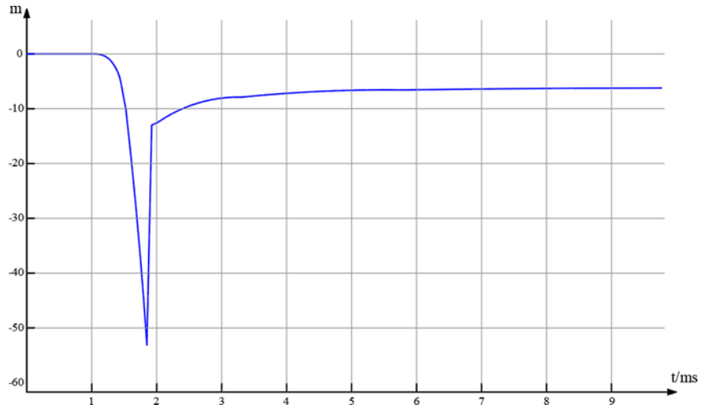
Сондай-ақ құрылымдық сұлбада шектеу түріндегі бейсызықты статикалық звеносы бар жылдамдық реттегіші және сигналдық модульді есептеуге арналған звено y=abs(x) көрсетілген.Тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйенің негізгі элементі вентильді қозғалтқыш болғандықтан, ең алдымен оның қозғалыс тұрақтылығын зерттеу қажет [3].

Әсіресе, вентильді қозғалтқыштың құрылымдық сұлбасында көбейткіш звенолар мен оң және теріс кері байланыстар бар екенін атап өткен жөн.

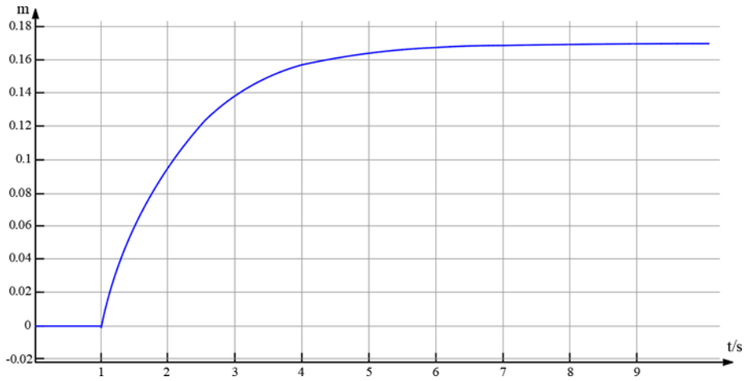


5-сурет – Айналмалы координаттар жүйесінде анықталған параметрлері бар вентильді қозғалтқыштың құрылымдық сұлбасы

Айналмалы координаттар жүйесінде анықталған параметрлері бар вентильді қозғалтқыштың математикалық моделінің [4] құрылымдық сұлбасы 5-суретте көрсетілген. Бұл графиктен (6-сурет) шамалы ауытқу бар екенін көруге болады. 7-суретте вентильді қозғалтқыштың қозғалыс жылдамдығының өтпелі процесс кезіндегі қисығы асып кетусіз және ауытқусыз алынған.



6-сурет – Тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйенің өтпелі процесс кезіндегі қисығы



7-сурет – Өтпелі процесс кезіндегі вентильді қозғалтқыштың қозғалыс жылдамдығының қисығы

Вентильді қозғалтқыштың тасымалдау функциясы (ТФ) динамикалық звенолардың тасымалдау функциялары негізінде құрастырылады. Бұл өз кезегінде тасымалдау функциясының түбірлерін анықтау арқылы математикалық түрде дәлелденеді [5]. Алдымен автотербелістердің болуы, не болмауы үшін вентильді қозғалтқыштың математикалық моделін қарастырайық. Вентильді қозғалтқыш

қозғалысының тұрақтылығы фазалық траекториялар әдісі арқылы Matlab бағдарламасының көмегімен анықталады [6].

Нәтижелер және талқылау

Бейсызықты емес жүйе болуы мүмкін:

– тұрақты «әлсіздеу» – кішігірім бастапқы ауытқулармен жүйе өзін тұрақты, ал елеулі ауытқулармен – тұрақсыз сияқты әрекет етеді;

– тұрақты «мықты» – үлкен бастапқы ауытқулар кезінде жүйе өзін тұрақты ретінде ұстай алады. Автоматты басқару жүйесінің өтпелі процестерінің тұрақтылығына қойылатын талап басқару жүйесінің қалыпты жұмыс істеуінің негізгі шарты болып табылады.

Бейсызықты басқару жүйелері үшін жүйенің өтпелі процестерін сипаттайтын сызықты емес дифференциалдық теңдеулерді шешудің біртұтас нақты әдісі жоқ, ал бейсызықтықтың әрбір түрі үшін нақты жеке әдіс жоқ.

Сондықтан бейсызықты жүйелерде өзіндік тербелістердің болуын анықтау күрделі міндет болып табылады.

Бұл сызықты емес дифференциалдық теңдеулерді құрастыру және шешу қажеттілігімен байланысты болғандықтан.Үшінші ретті сызықты емес дифференциалдық теңдеулер үшін бірыңғай жалпы шешім болмағандықтан.

Осылайша, қарапайым сызықтық жүйелер жағдайына ұқсас бейсызықты жүйелерді зерттеу үшін басқару теориясының жалпыланған әдісін құру мүмкін емес сияқты.

Сондықтан автоматты басқару теориясында бейсызықты жүйелерді зерттеу үшін әрқайсысы мүмкіндіктерге ие және зерттеу мәселелерінің белгілі-бір шектеулі саласында тиімді болатын нақты әдістер әзірленді және қолданылды. Вентильді қозғалтқыштың қозғалыс динамикасының теңдеулер жүйесі вентильді қозғалтқыштың тасымалдау функциясы негізінде құрастырылған. Вентильді қозғалтқыштың қозғалыс динамикасының теңдеулер жүйесі үш шығыс мәні x(t) бар сызықты емес динамикалық басқару жүйесінің еркін қозғалысы болып табылады [7].

Вентильді қозғалтқыштың қозғалыс динамикасының теңдеулер жүйесі үшінші ретті бейсызықты дифференциалдық теңдеулер түрінде көрсетіледі:

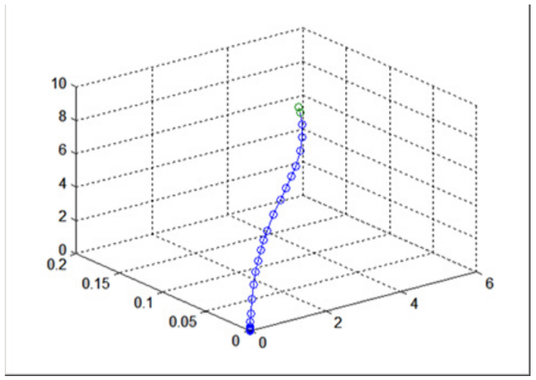
$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_1 x_3 + a_2 x_2 x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -a_3 x_2 + a_4 x_1 x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_5 u - a_6 x_1 - a_7 x_1 x_2 - a_8 x_3, \end{aligned} \qquad (2)$$

мұндағы x_1=w– вентильді қозғалтқыштың бұрыштық жылдамдығы, $x_2=i_d$, $x_3=i_q$ статордағы токтардың проекциялары, u – берілетін әсер, a_1=84,46; a_2=1,38; a_3 =181,8; a_4=1,7; a_5=444,44; a_6=326,33; a_7=9,3; a_8=427,35.

```
function PROGRAMMA
clc
y0 = [0;0;0];
options = odeset('OutputFcn', @odephas3);
[T,y] = ode113(@systm,[0 0.0077],y0,options);
grid on
function dy = systm(t,y)
dy = zeros(3,1); u=10;
a1=84.46; a2=1.38; a3=1.7; a4=181.8;
a5=444.44; a6=325.33; a7=9.33; a8=427.35;
dy(1)=a1*y(3)+a2*y(2)*y(3);
dy(2)=a3*y(1)*y(3)-a4*y(2);
dy(3)=a5*u-a6*y(1)-a7*y(1)*y(2)-a8*y(3);
end
end
```

8-сурет – Тұрақтылық пен автотербелістерді анықтау бағдарламасы

Бейсызықты жүйелерді зерттеудің негізгі әдістерінің бірі – тербеліс теориясына көрнекті ғалым академик А. А. Андронов. Фазалық кеңістік дегеніміз – нүктенің тікбұрышты координаталары жүйенің лездік күйін анықтайтын шамалар болатын кеңістік. Бұл шамалар жүйенің фазалық координаталары деп аталады, олардың саны жүйенің еркіндік дәрежелерінің санына тең. 8-суретте көрсетілген тұрақтылық пен автотербелісті анықтау бағдарламасы Matlab бағдарламасының стандартты функциясын ескере отырып құрастырылған.



9-сурет – Фазалық траектория кескіні

11,12,13-жолдарда берілген. «ЖТ - ВҚ» жүйесінің фазалық траекториясының визуализациясы 9-суретте көрсетілген. Фазалық траектория уақытты

қамтымайтындықтан, бейсызықты жүйелерде болатын барлық динамикалық процестерді көрсетеді [8].

Жүйе тұрақтылығының фазалық портреті – бұл оның күйінің бастапқы жағдайларға байланысты қалай өзгеретінін көрсететін, уақыт бойынша жүйе әрекетінің көрнекі графикалық көрінісі. Ол фазалық кеңістікте салынған, мұнда әрбір нүкте белгілі бір сәтте жүйенің толық күйін білдіреді. 9-суретте вентильді қозғалтқыштың автотербеліссіз қозғалысының тұрақтылығын көрсететін фазалық траектория кескіні көрсетілген [9].

Бірақ «ЖТ-ВҚ» тұйық контурлы бейсызықты жүйенің тұрақтылығын фазалық траекториялар әдісімен зерттеу, тек дифференциалдық теңдеулердің саны үш теңдеуден аспаған жағдайда ғана мүмкін болады. Осыған байланысты n>3 дифференциалдық теңдеулер санын Matlab бағдарламасын пайдалана отырып, «ЖТ-ВҚ» тұйық контурлы бейсызықты жүйенің тұрақтылық есебін шешудің басқа тәсілін қарастырамыз. Тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйенің динамикасының теңдеуі мынадай түрде:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_1x_2 + a_2x_2x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -a_3x_4 - a_4x_1 - a_5x_1x_3 - a_6x_2, \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_7x_1x_2 - a_8x_3 \end{aligned} \qquad (3)$$

мұндағы, a_1=84,46; a_2 =1,38; a_3=444,44; a_4=325,33; a_5=1,38; a_6=427,35; a_7 =1,7; a_8=181,8; $a_9 = K_p/T_p$; b_1 = 2; b_2 = 0,2; b_3 = 5.

Тарату функциясының сипаттамалық теңдеуінің түбірлерін анықтау үшін теңдеулер жүйесін (2) таңбалық түрдегі теңдеуге түрлендіреміз. ВҚ жылдамдығын реттеу жүйесінде y=arctg(x) функциясын Тейлор қатарына жіктеп $e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots,\ -\infty < x < \infty$ [10] екі мүшесіне ауыстырамыз.

Бұдан басқа айнымалылар туындысын (2) теңдеулер жүйесіне ауыстырамыз – $x_2 \cdot x_3$-ті $x_2 \cdot \mathrm{sign}(x_3)$-ке $x_1 \cdot x_3$-ті $x1 \cdot \mathrm{sign}(x_3)$-ке және $x_1 \cdot x_2$-ні $x_1 \cdot \mathrm{sign}(x_2)$-ге айнымалылар туындысын линеаризация мақсатында мынадай түрге келтіреміз:

```
function USTOI
syms w1 w2 w3 w4
clc
f1=sym('(1/w1)*x1-a1*x2-a2*(x2*sign(x3))');
f2=sym('a3*x1+w2*x2+a4*(x1*sign(x3))-a5*x4');
f3=sym('w3*x3-a6*(x2*sign(x1))');
fa=sym('a7*(((u-a8*x1)^2)/(u-a8*x1))');
fb=sym('a9*sign((u-a8*x1)-((u-a8*x1)^c)/c)');
f4=sym('w4*x4'-(fa+fb));
[x1,x2,x3,x4]=solve(f1,f2,f3,f4);
a1=84.46; a2=1.38; a3=325.33; a4=9.33;
a5=444.44;  a6=1.7; a7=2; a8=0.2; a9=5; c=3; u=10;
w1=tf([1],[1 0]); w2=tf([1 427.35],[0 1]);
w3=tf([1 181.8],[0 1]); w4=tf([1 1000],[0 1]);
R1=eval(x1); Wq=minreal(R1)
p=pole(Wq)
step(Wq*2,'k.-',0.5)
grid
```

10-сурет – Сипаттамалық теңдеудің түбірлерін есептеу бағдарламасы

Есептеу тәртібі келесідей:

1 Matlab/Simulink бағдарламасының алгоритмдік тілінің ережелері бойынша автотербеліс пен тұрақтылықты анықтау бағдарламасына таңбалық айнымалылар Wi (2-жол) және таңбалық теңдеулер f_i=0 (4-тен 9-ға дейін) енгізілген.

2 Автотербелістер мен тұрақтылықты анықтау бағдарламасының 10-жолағында Matlab/Simulink ортасында шешу функциясы solve «ЖТ-ВҚ» тұйық контурлы бейсызықты жүйенің әрбір айнымалысы үшін таңбалық түрде тарату функцияларын есептейді.

3 Белгілі параметрлерді (11 және 12-жолдар) және әрбір буынның тарату функцияларын (13 және 14-жолдар) пайдалана отырып, жүйенің тарату функциялары eval функциясы арқылы стандартты пішінге келтіріледі.

4 pole функциясы «ЖТ-ВҚ» тұйық бейсызықты жүйенің тарату функциясының сипаттамалық теңдеуінің түбірлерін есептейді, шығыс айнымалысы ВҚ-тың бұрыштық жылдамдығы болып табылады. Жүйенің тұрақтылығы сипаттамалық теңдеудің түбірлерінің түрімен анықталады.

5 «ЖТ-ВҚ» тұйық контурлы бейсызықты жүйенің тасымалдау функциясының (ТФ) тарату функциясы және сипаттамалық теңдеуінің түбірлері 11-суретте көрсетілген.


```
Transfer function:
                9.538e005
-------------------------------------
s^3 + 1427 s^2 + 4.561e005 s + 2.874e007


p =

  1.0e+003 *

   -1.0000
   -0.3437
   -0.0836
```

11-сурет – ТФ және сипаттамалық теңдеу түбірлері

11- суретте көрсетілгендей, тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйесі тұрақты, себебі тарату функциясының сипаттамалық теңдеуінің түбірлері p теріс мәнге ие. Тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйенің тұрақтылығының тек бір дәлелі бұл жүйенің қалыпты жұмыс істеуі үшін жеткіліксіз. Сондықтан, фазалық траекториялар әдісі арқылы автотербелістерді анықтау қажет [11]. Тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйенің тарату функциясының сипаттамалық теңдеуін дифференциалды теңдеулер жүйесіне түрлендіреміз:

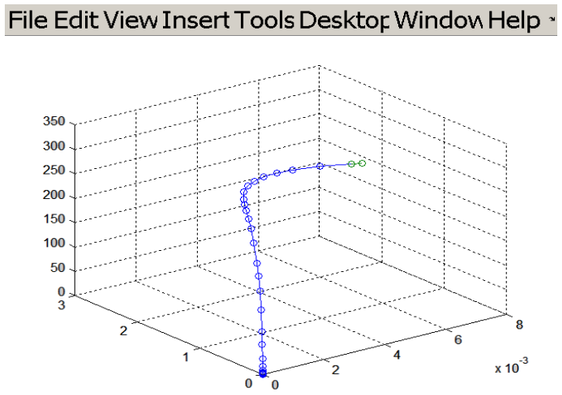
$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_3, \\ \frac{dx_2}{dt} &= -a_1 u - a_2 x_3 - a_3 x_2 - a_4 x_1, \end{aligned} \tag{3}$$

мұндағы x_i – тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйесінің фазалық координаттары, u – шекті әсер, a_1 = 9,538e05; a_2 =1,427; a_3 = 4,561e05, a_4 =2,874e07.

Фазалық траектория әдісі бейсызықты жүйелерді зерттеуге арналған графиктік-аналитикалық әдіс болып табылады.Әдістің мәні визуалды геометриялық кескіндерді - фазалық портреттерді пайдалана отырып, жүйелердің әрекетін сипаттау.Фазалық траектория әдісі зерттелетін сызықты емес жүйенің мінез-құлқы уақыттық аймақта (дифференциалдық теңдеулер түрінде) емес, жүйенің фазалық кеңістігінде (фазалық траекториялар түрінде) қарастырылып, сипатталуынан тұрады. Фазалық жазықтықта автотербеліс режимі шекті циклге сәйкес келеді. Автотербеліс режимдері бейсызықты жүйелерде байқалады, сондықтан бұл режимдерді зерттеу, олардың пайда болу шарттарын анықтау, автотербелістердің параметрлерін (амплитуда және период) зерттеу өте маңызды.

```
function PROGR
clc
x0 = [0;0;0];
options = odeset('OutputFcn', @odephas3);
[T,x] = ode113(@systm,[0 0.0075],x0,options);
grid on
function dx = systm(t,x)
dx = zeros(3,1); a1=9.538e5; a2=1427;
a3=4.561; a4=2.874e7; u=0.5;
dx(1)=x(2);
dx(2)=x(3);
dx(3)=a1*u-a2*x(3)-a3*x(2)-a4*x(1);
end
end
```

12-сурет – Теңдеулер жүйесі бойынша фазалық траекторияны есептеу бағдарламасы



13-сурет – «ЖТ-ВҚ» жүйесінің қозғалысының фазалық траекториясы

Тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйенің фазалық траектория қозғалысы жүйенің тұрақтылығын және автотербелістердің жоқтығын көрсетеді [12].

Қозғалыстың фазалық траекториясы фазалық кеңістіктегі басқарылатын шаманың өзгеруін көрсетеді. Фазалық кеңістіктегі фазалық траектория сонымен қатар зерттелетін процестің динамикасының геометриялық көрінісін береді. Дегенмен, уақыт координаты жоқ. Уақыт жанама түрде бейнеленген, сондықтан фазалық траектория жүйенің тек уақытша сипаттамасын ғана емес, сапалы, толық

динамикалық сипаттаманы қамтамасыз етеді. Бұл сапалы динамикалық сипаттама толық және уақыттың әр сәтіндегі туындылардың мәндерін (x_1, x_2, x_3,… xn) ғана емес, сонымен қатар әр туындының өзгеру заңын көрсетеді, оны динамикалық сипаттаманың уақыт бойынша анықтау әрқашан мүмкін емес.Осылайша, бифуркация шекараларын анықтауға және оның тұтастай тұрақтылығын қамтамасыз ететін жүйе параметрлерінің комбинацияларын орнатуға болады.

Қорытынды

Электромобильдің көлік ретінде қозғалыс кезінде автотербеліске қарсы қозғалысының тұрақтылығы көптеген факторларға байланысты және жобалық шешімдер мен белсенді қауіпсіздік жүйелерімен қамтамасыз етіледі.

Қозғалыс кезінде электромобильдердің автотербелістерге тұрақтылығы келесідей факторларға әсер етеді:

– Ауырлық центріне (ауырлық центрінің биіктігі, көліктің салмағы, аспа мен шиналардың жағдайы, сондай-ақ жолдың жылдамдығы мен сипатамаларына);

– Салмақ пен жүкті бөлуге (жүктері немесе жолаушылары жоқ көлік әдетте тұрақтырақ, өйткені оның ауырлық орталығы төмен);

– Шанақ және шиналар жағдайына (жолдың біркелкі емес жабындары дөңгелектердің дірілдерін тудырады, олар жоғары жылдамдықта күшейеді және тұрақтылықтың жоғалуына әкелуі мүмкін);

– Қозғалыс жылдамдығына (жылдамдық неғұрлым жоғары болса, соғұрлым орталықтан тепкіш күштер күшейеді және тұрақтылықты соғұрлым сақтау қиынырақ болады);

– Жол төсемінің сипаттамасы (жол төсемінің түрі, бұрылыстардың қисаю радиусы және басқа факторлар тұрақтылыққа әсер етеді).

Қазіргі уақытта жаратылыстанудың әртүрлі салаларында байқалатын күрделі динамикалық процестерді аналитикалық әдістермен зерттеумен қатар компьютерлік математикалық модельдеу кеңінен қолданылады. Математикалық модельдер ретінде дифференциалдық теңдеулер жүйесі кеңінен қолданылады. Мақаладағы бағдарлама жүйе тұрақтылығының толық бейнесін көрсететін тұйық контурлы «ЖТ-ВҚ» бейсызықты жүйе динамикасының фазалық траекториясын есептеуге арналған бағдарлама. Matlab/Simulink бағдарламасында динамиканың сызықты емес дифференциалдық теңдеулері символдық түрге айналады. Және осының арқасында тарату функциясы мен тарату функциясының сипаттамалық теңдеуінің түбірлері табылды. Дифференциалдық теңдеу жүйесінің түбірлерінің мәндері теріс мән, яғни электромобильдің электр жетегінің тұйық контурлы «жиілік түрлендіргіш-вентильді қозғалтқыш» бейсызықты жүйесінде автотербелістер жоқ.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Герман-Галкин, С. Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб. : КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

2 **Цыба, Ю. А, Шадхин, Ю. И., Алмуратова, Н. К.** Нелинейные и цифровые системы автоматического управления: Учебное пособие – АУЭС. Алматы, 2013 – 96 с.

3 **Турчак, Л. И., Плотников, П. В.** Основы численных методов. – М. : Издательство «Физматлит», 2003. – 304 с.

4 **Гальперин, М. В.** Автоматическое управление: учебник для студентов. – М. : Форум: ИНФРА-М, 2007. – 223 с.

5 **Ануфриев, И. Г., Смирнов, А. Б., Смирнова, Е. Н.** MATLAB 7. – СПб. : БХИ – Петербург, 2005. – 1104 с.

6 **Гольдштейн, А. Л.** Оптимизация в среде MATLAB. Учебник для вузов.-Пермь. : Издательство «Пермьского национального политехнического университета», 2015. – 164 с.

7 **Бесекерский, В. А., Попов, Е. П.** Теория систем автоматического регулирования – М. : Издательство «Профессия», 2007. – 752 с.

8 **Амангалиев, Е. З., Сарваров, А. С., Косматов, В. И., Петушков, М. Ю., Омельченко, Е. Я.** Электромобильный и гибридный транспорт: силовые схемы, оборудование, проблемы и перспективы развития. Научный журнал «Электротехнические системы и комплексы», № 1(54), Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова, С. 19–28.

9 **Тергемес, К. Т., Амангалиев, Е. З., Карасаева, А. Р.** Перспективные направления развития хода электропривода электрического транспорта. // Международная конференция по промышленной инженерии и современным технологиям (FarEastCon). – 2019. – P. 1–5. – https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934792.10.1016/j.egyr.2021.02.015.

10 **Валентайн, Д. Т., Хан, Б. Д.** Основы MATLAB // Учебник MATLAB для инженеров и ученых. – Эльзевир, 2023. – С. 29–77. – https://doi.org/10.1016/B978-0-32-399548-1.00008-4.

11 **Певзнер, Л. Д.** Теория систем управления. Учебник для вузов. – СПб. : Лань, 2022. – 256 с.

12 **Liu, G., Zhang, C.** Sliding mode control of reaction flywheel-based brushless DC motor with buck converter // Chinese Journal of Aeronautics. – 2013. – Vol. 26, № 4. – P. 967–975.

REFERENCES

1 **German-Galkin, S. G.** Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnih sistem na PK [Design of mechatronic systems on PC] [Text] – Saint-Petersburg. : KORONA, 2008. – 368 p.

2 **Tsyba, Yu. A., Shadkhin, Yu. I., Almuratova, N. K.** Nelineinye i tsifrovye sistemy avtomaticheskogo upravleniya : Uchebnoe posobie [Nonlinear and digital automatic control systems: Textbook] [Text]. – AUES. Almaty, 2013 – 96 p.

3 **Turchak, L. I., Plotnikov, P. V.** Osnovi chislennih metodov [Fundamentals of numerical methods] [Text] – M. : Publishing house «Physics&Maths liter», 2003. – 304 p.

4 **Galperin, M. V.** Avtomaticheskoe upravlenie: uchebnik dlya studentov [Automatic control: textbook for students] [Text]. – M. : Forum : INFRA-M, 2007. – 223 p.

5 **Anufriev, I. G., Smirnov, A. B., Smirnova, E. N.** MATLAB 7. – St. Petersburg: BHI - Petersburg, 2005. – 1104 p.

6 **Goldstein, A. L.** Optimizatsiya v srede MATLAB. Uchebnik dlya vuzov [Optimization in the MATLAB environment. Textbook for universities] [Text]. – Perm : Publishing house of the Perm National Polytechnic University, 2015. – 164 p.

7 **Besekersky, V. A., Popov, E. P.** Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems] [Text] – M. : Publishing house «Profession», 2007. – 752 p.

8 **Amangaliev, Y. Z., Sarvarov, A. S., Kosmatov, V. I., Petushkov, M. Yu., Omelchenko, E. Ya.** Elektromobilnii i gibridnii transport: silovie shemi, oborudovanie, problemi i perspektivi razvitiya. [Electric and hybrid transport: power circuits, equipment, problems and development prospects] [Text]. – Scientific journal «Electrotechnical systems and complexes», № 1(54), Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, P. 19–28.

9 **Tergemes, K. T., Amangaliyev, Y. Z., Karassayeva, A. R.** Perspektivnie napravleniya razvitiya hoda elektroprivoda elektricheskogo transporta. [Perspective directions of the development of electric transports' electric drive] [Text]. – International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies(FarEastCon). – 2019. – P. 1–5.

10 **Valentine, D. T., Hahn, B. D.** Osnovi MATLAB // Uchebnik MATLAB dlya injenerov i uchenih [MATLAB® fundamentals // Essential MATLAB for Engineers and Scientists] [Text]. – Elsevier, 2023. – P. 29–77.

11 **Pevzner, L. D.** Teoriya sistem upravleniya. Uchebnik dlya vuzov [Theory of control systems. Textbook for high schools] [Text] – Saint-Petersburg. : Publishing house «Lan», 2022. – 256 p.

12 **Liu, G., Zhang, C.** Sliding mode control of reaction flywheel-based brushless DC motor with buck converter // Chinese Journal of Aeronautics. – 2013. – Vol. 26, № 4. – P. 967–975.

05.08.25 ж. баспаға түсті.
16.10.25 ж. түзетулерімен түсті.
20.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Е. З. Амангалиев[1], Ю. И. Шадхин[2]
[1]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Ж. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 05.08.25.
Поступило с исправлениями 16.10.25.
Принято в печать 20.11.25.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Электромобиль при движении подвергается воздействию тех же сил, что и обычный автомобиль: сила тяги электродвигателя, сила трения качения, сила аэродинамического сопротивления и сила сопротивления качению. Следовательно, из-за этого также и в электромобилях во время движения возникают автоколебания. Основная задача исследования, рассматриваемая в этой статье – определить устойчивость электропривода электромобиля к автоколебаниям.

В статье представлен анализ и программа устойчивости замкнутой нелинейной системы «ПЧ-ВД», методом фазовых траекторий. Анализ нелинейных систем имеет свой особенности в отличие от анализа линейных систем. В первую очередь, это связано с тем, что устойчивость нелинейной системы зависит от начальных условий и внешних воздействий: при одних входных сигналах система будет устойчивой, а при других она теряет свойство устойчивости.

Поскольку для нелинейной системы может существовать несколько положений равновесия, поэтому анализировать устойчивость следует в окрестности каждого из них. Что существенно усложняет задачу исследования. Анализ устойчивости системы – это процесс определения того, вернется ли система в исходное состояние после изменения ее параметров или же она отклонится от него и в конечном итоге станет неуправляемой. Устойчивость системы является важным свойством для динамических систем управления, поскольку нестабильные динамические системы могут привести к нежелательным или даже опасным последствиям. Корневой критерий определяет устойчивость системы по виду передаточной функции. Динамической характеристикой системы, описывающей основные поведенческие свойства, является характеристический полином, находящейся в знаменателе передаточной функции. Путем приравнивания знаменателя к нулю можно получить характеристическое уравнение, по корням которого определить устойчивость. Важнейшей задачей при анализе динамических систем управления является решение задачи их устойчивости. Техническое понятие устойчивости систем автоматического управления относится не только к устойчивой работе технической системы в нормальных режимах, но и к свойству «не выходить из под контроля».

Ключевые слова: вентильный двигатель, устойчивость, электропривод, программа, нелинейная система.

Y. Z. Amangaliyev[1], Y. I. Shadkhin[2]
[1]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. D. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 05.08.25.
Received in revised form 16.10.25.
Accepted for publication 20.11.25.

STABILITY ANALYSIS OF NONLINEAR SYSTEM «FC- BLDC» ELECTRIC DRIVE OF ELECTRIC VEHICLE

When in motion, an electric vehicle is subject to the same forces as a conventional vehicle: electric motor traction, rolling friction, aerodynamic drag, and rolling resistance. Consequently, even electric vehicles experience self-oscillations when in motion. The main issue discussed in the article is the stability of an electric vehicle's electric drive against auto-oscillations.

The article presents an analysis and program of stability of a closed nonlinear system «FC-BLDC» by the method of phase trajectories. The analysis of nonlinear systems has its own peculiarities in contrast to the analysis of linear systems. First of all, this is due to the fact that the stability of a nonlinear system depends on the initial conditions and external influences: with some input signals, the system will be stable, and with others it loses the property of stability. Since several equilibrium positions may exist for a nonlinear system, stability should be analyzed in the vicinity of each of them. Which complicates the task of research.

System stability analysis is the process of determining whether a system will return to its initial state after a change in its parameters or whether it will deviate from it and eventually become unmanageable. System stability is an important property for dynamic control systems because unstable dynamic systems can lead to undesirable or even dangerous consequences. The root criterion determines the stability of the system by the type of transfer function. The dynamic characteristic of the system, which describes the basic behavioral properties, is a characteristic polynomial located in the denominator of the transfer function. By equating the denominator to zero, the characteristic equation can be obtained, the roots of which determine the stability. The most important task in analyzing dynamic control systems is to solve the problem of their stability. The technical concept of stability of automatic control systems refers not only to the stable operation of the technical system in normal modes, but also to the property of «not getting out of control».

Keywords: brushless motor, stability, electric drive, program, nonlinear system.

МРНТИ 55.03.29

https://doi.org/10.48081/BGQF1906

Д. Ш. Ахмедов[1], А. Ж. Сейдахмет[2]

[1,2]Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3400-5389

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1174-1547

*e-mail: akhmedov.daulet@gmail.com

КОНЦЕПЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ СИСТЕМОЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК С НАЛОЖЕННЫМИ СВЯЗЯМИ

Одними из перспективных для применения в промышленности являются плоские рычажные механизмы высоких классов (МВК). Широкое применение этих механизмов сдерживает трудность проведения кинематического анализа, в частности, решение задачи о положениях: при заданном положении ведущего звена определить координаты и/или угловые положения ведомых звеньев для всех существующих сборок. В общем случае для механизмов II класса и МВК, система уравнений кинематики представляет собой систему тригонометрических или алгебраических уравнений. Если для уравнений II класса систему уравнений кинематики можно решить аналитически, то для МВК система уравнений кинематики не решается аналитически. Это связано с тем, что механизмы II класса можно разбить на последовательность диад, каждую из которых представляет собой два уравнений с двумя неизвестными, которые решаются аналитически, а МВК разбить на последовательность диад невозможно, в связи с чем для решения задачи о положениях МВК приходится применять различные численные методы, реализация которых представляет собой достаточно сложную вычислительную задачу. Поэтому автоматизация решения задач кинематики МВК являются актуальной задачей, решение которой позволит широко использовать МВК для различных промышленных приложений. В данной статье рассматриваются вопросы концептуального представления плоских рычажных механизмов высоких классов как системы материальных точек с наложенными на нее связями, что позволяет перейти к алгоритмам автоматического вывода уравнений кинематики и определению степени подвижности исследуемых механизмов.

Ключевые слова: механизмы высоких классов, структура механизма, кинематический анализ, задача о положениях, структурный анализ.

Введение

Повышение производительности труда во всех отраслях производства невозможно без увеличения рабочих скоростей и нагрузок, возникающих в машинах, агрегатах и комплексах. Это требует обоснованного выбора типов, схем и конструктивных параметров проектируемых механизмов, разработки методов

анализа и синтеза с учетом основных принципов и новых направлений развития механики.

Одними из перспективных для применения в промышленности являются плоские рычажные механизмы высоких классов (МВК). Широкое применение этих механизмов сдерживает трудность проведения кинематического анализа, в частности, решение задачи о положениях: при заданном положении ведущего звена определить координаты и/или угловые положения ведомых звеньев для всех существующих сборок. В общем случае для механизмов II класса и МВК, система уравнений кинематики представляет собой систему тригонометрических или алгебраических уравнений. Если для уравнений II класса систему уравнений кинематики можно решить аналитически, то для МВК система уравнений кинематики не решается аналитически. Это связано с тем, что механизмы II класса можно разбить на последовательность диад, каждую из которых представляет собой два уравнений с двумя неизвестными, которые решаются аналитически, а МВК разбить на последовательность диад невозможно. Поэтому для решения задачи о положениях МВК приходится применять различные численные методы, реализация которых представляет собой достаточно сложную вычислительную задачу. Поэтому автоматизация решения задач кинематики МВК являются актуальной задачей, решение которой позволит широко использовать МВК для различных промышленных приложений.

Материалы и методы

1. Задачи автоматизации структурного и кинематического анализа плоских рычажных механизмов высоких классов

Как известно [1; 2; 3], движение механизмов зависит в первую очередь от их структуры и законов движения входного звена, которое в свою очередь определяет значения положений, скоростей и ускорений звеньев механизма.

Основными задачами структурного анализа являются: определение степени свободы или подвижности механизма, числа подвижных звеньев, выявление групп Ассура, и определение того, какого класса группа Ассура содержится в механизме.

К задачам кинематического анализа рычажных механизмов относятся: задание закона движения входных звеньев, определение положений звеньев и траекторий движения звеньев и точек этих звеньев, определение угловых скоростей звеньев и линейных скоростей их точек, определение угловых ускорений звеньев и линейных ускорений их точек.

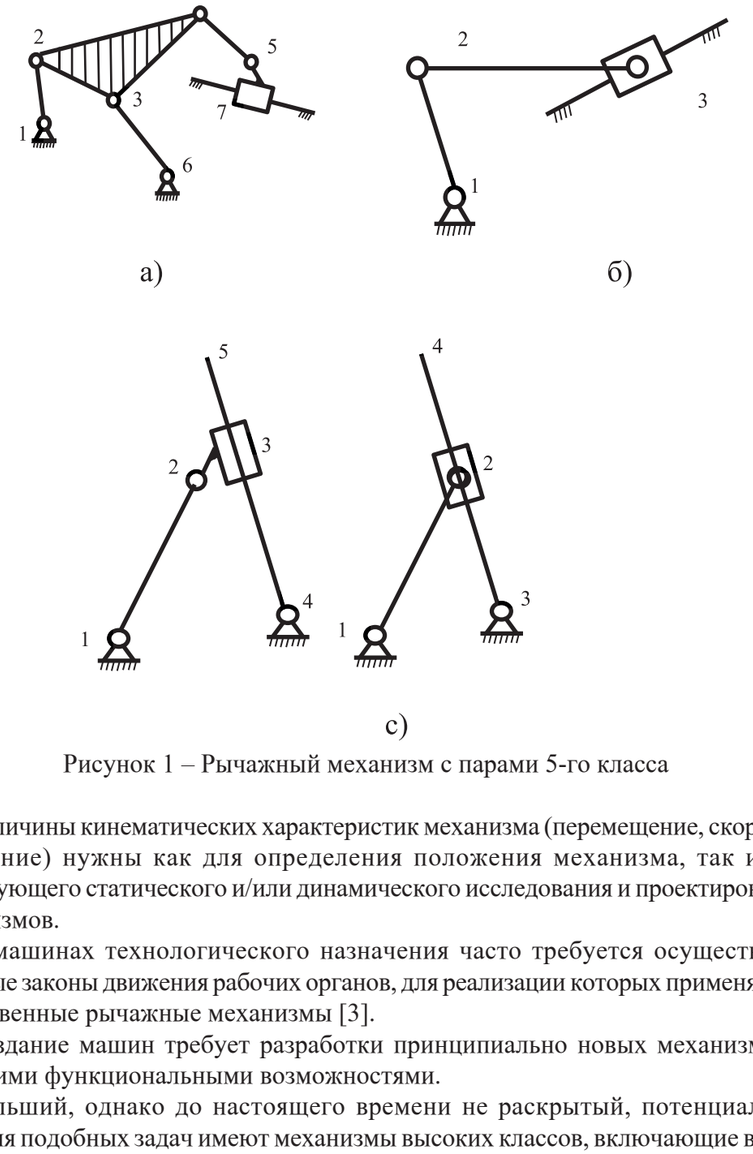


Рисунок 1 – Рычажный механизм с парами 5-го класса

Величины кинематических характеристик механизма (перемещение, скорость, ускорение) нужны как для определения положения механизма, так и для последующего статического и/или динамического исследования и проектирования механизмов.

В машинах технологического назначения часто требуется осуществлять сложные законы движения рабочих органов, для реализации которых применяются многозвенные рычажные механизмы [3].

Создание машин требует разработки принципиально новых механизмов с широкими функциональными возможностями.

Больший, однако до настоящего времени не раскрытый, потенциал для решения подобных задач имеют механизмы высоких классов, включающие в свой состав группы Ассура третьего и более высоких классов [4–9].

По определению Ассура [10], механизм можно образовать присоединением к стойке и ведущему звену кинематических цепей, удовлетворяющих условию – степень их подвижности равна нулю. Такие цепи, содержащие только низшие кинематические пары, называются структурными группами Ассура. Они подразделяются на классы, определяемые наивысшим классом группы Ассура,

образующей ведомую часть механизма. На рисунке 2 приведены примеры групп Ассура III и IV классов [11]:

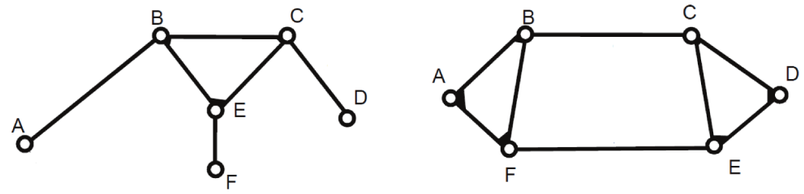


Рисунок 2 – Группы Ассура III и IV классов

Как отмечено в [12], сложной является задача определения кинематических параметров рычажных механизмов. В настоящее время детально разработаны методы кинематического анализа наиболее распространенных рычажных механизмов II класса.

Для широкого использования МВК при проектировании новых механизмов необходимо разработать автоматизированную систему анализа кинематики МВК, чтобы сократить время кинематического анализа до минимально возможного времени с минимальным вмешательством человека в процесс решения задач кинематического анализа.

Отсюда естественным образом вытекает необходимость разработки таких алгоритмов, которые позволили бы максимально формализовать все этапы исследования рычажных механизмов, такие как: структурный анализ, вывод уравнений кинематики, описывающих положения звеньев, решение этих систем нелинейных уравнений при заданных значениях входных звеньев, определение максимального количества сборок, вывод уравнений скоростей и ускорений, их решение, представление выходных результатов в виде различных графиков, возможность итерационного изменения параметров механизмов и повторный цикл решения задач кинематики положений, скоростей и ускорений.

В соответствии с классическими работами по теории механизмов и машин [13; 14; 15], в большинстве случаев такие задачи до сих пор решают графо – аналитическими методами на основе построения планов положений, скоростей и ускорений, предусматривающих обязательное определение мгновенных центров скоростей и ускорений.

Решение такого комплекса задач, особенно задач кинематики МВК, требует специальной подготовки, выходящей за рамки университетского образования, и под силу только высококвалифицированному специалисту в области теории машин и механизмов.

Поэтому для решения поставленных задач возникает необходимость использования алгоритмов, имитирующих логику высококвалифицированного специалиста, что в общем то и называется искусственным интеллектом, для решения задач структурного и кинематического анализа рычажных механизмов высоких классов.

2. Представление рычажного механизма как системы материальных точек с наложенными на них геометрическими связями.

Рычажный механизм – это механизм, в который входят твердые тела в виде жёстких звеньев, соединённые между собой вращательными и поступательными кинематическими парами [16].

Однако структуру рычажного механизма можно рассматривать не только как систему взаимосвязанных твердых тел. Представим структуру рычажных механизмов инверсно относительно традиционного определения, т. е. рассмотрим рычажный механизм как механическую систему в виде множества материальных точек, движение которых взаимосвязано между собой.

Всякое материальное тело занимает некоторую часть пространства, обладает определенными размерами. Однако, в тех случаях, когда размеры тела малы, по сравнению с размерами траектории, по которой движется центр масс этого тела, размерами этого тела можно пренебречь, рассматривая его как точку. Такое абстрагирование приводит к важному понятию теоретической механики – понятию материальной точки (МТ). Тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь, называется материальной точкой [17].

Свободная механическая система – это система, в которой каждая точка или тело может занять любое положение в пространстве и иметь любую скорость. Движение точек в такой системе не ограничивается никакими связями [18].

Механической же системой называется множество материальных точек, в котором движение каждой точки зависит от положения и движения остальных точек системы [19].

Пусть n – число материальных точек свободной механической системы. Как уже было отмечено выше, будем рассматривать двумерную задачу, т. е. все материальные точки расположены на плоскости XOY. Тогда положение системы материальных точек известно, если известны координаты (x_i, y_i) всех i-х материальных точек (МТ), $i \in [1,...,n]$ свободной механической системы. Зависимость между движениями точек механической системы появляется тогда, когда на движение МТ накладываются геометрические и/или кинематические связи.

Уравнения геометрической связи в общем случае имеет вид:

$$f(x_1, y_1,..., x_n, y_n) = 0 \quad (1)$$

Уравнение кинематической связи имеет вид:

$$\varphi(x_1, y_1,..., x_n, y_n, \dot{x}_1, \dot{y}_1,..., \dot{x}_n, \dot{y}_n, t) = 0 \quad (2)$$

Пусть на свободную механическую систему из n точек наложено k геометрических связей:

$$f_j(x_1, y_1,..., x_n, y_n) = 0, \ (j = 1,2,...,k) \quad (3)$$

Тогда из 2n координат независимых будет только $(2n-k)$ координат, т.к. при задании $(2n-k)$ координат остальные определяются из уравнений связи (3). Эти независимые координаты называют также координатами механической системы. Далее в работе мы будем рассматривать механические системы с наложенными на них только геометрическими связями.

Одна МТ имеет на плоскости 2 степени свободы, то есть ее положение в декартовой системе координат описывается двумя независимыми координатами x и y. К примеру, пусть координата x приняла значение x_p„ т.е. $x = x_p$„ и при этом координате ничто не мешает принять любое значение в интервале $y_p \in [-\infty, +\infty]$.

Если на i-ю МТ наложить геометрическую связь, описываемую следующим уравнением:

$$f(x_i, y_i) = 0, \quad (4)$$

то тогда i-я МТ на плоскости будет иметь одну степень свободы. Это связано с тем, что если уравнение (4) разрешить относительно переменной y в виде $y = f_1(x)$ или относительно x в виде $x = f_2(y)$, то тогда значение одной из переменных может быть выбрано из интервала $[-\infty, +\infty]$„ и тогда значение другой переменной будет полностью зависеть от значения первой переменной.

Рассмотрим представление функции $f(x, y)$ в виде следующего линейного уравнения:

$$a_i x_i + b_i y_i + c_i = 0. \quad (5)$$

Тогда траектория возможного движения i-й БТ будет представлять прямую линию. Уравнение связи вида (5) можно представить в следующем виде:

$$y_i = d_i x_i + f_i \quad (6)$$

где: если $b_i \neq 0$, то $d_i = \frac{a_i}{b_i}$ и $f_i = \frac{c_i}{b_i}$, или

$$x_i = g_i y_i + h_i, \quad (7)$$

где: если $a_i \neq 0$, то $g_i = \frac{b_i}{a_i}$ и $h_i = \frac{c_i}{a_i}$.

Если в уравнении (6) коэффициент $d_i = 0$ или в уравнении (7) коэффициент $g_i = 0$, то уравнения (6) и (7) соответственно будут представлены в виде элементарных уравнений связи

$$y_i = f_1 \tag{8}$$

и

$$x_i = h_i, \tag{9}$$

т. е. уравнения связей (5) будут представлены в виде прямой, параллельной оси OX или прямой, параллельной оси OY. Еще раз отметим, что уравнения (6)-(7) реализуют различные варианты уравнения геометрической связи (6) и уменьшают число степеней свободы МТ на 1. Такие виды связей представляют из себя направляющие (ползуны), двигающиеся вдоль заданной уравнениями (6)–(7) прямой. В общем случае уравнение (4) – нелинейная кривая на плоскости.

Рассмотрим уравнения (7) и (8). Эти уравнения, как уже было отмечено, накладывают связь на одну из степеней свободы МТ: либо значение координаты y зависит от значения координаты x (7), либо значение координаты x зависит от значения координаты y(8). На рисунке 1 показано уравнение вида (7) с находящейся на ней i-й МТ.

По сути, связь типа $y_i = d_i x_i + f_i$„ наложенная на МТ с координатами (x_i, y_i)

позволяет двигаться i-й материальной точке только по прямой $y_i = d_i x_i + f_i$ и реализуется таким элементом рычажного механизма, как поступательное звено, перемещающееся относительно стойки или другого элемента рычажного механизма (рисунок 2) по прямой линии.

Если же направляющая, описываемая на рисунке 2 уравнением $y_i = d_i x_i + f_i$ задана координатами концов отрезка $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$ (рисунок 2), через которые проходит прямая, то тогда коэффициенты d_1 и f_1 уравнения $y_i = d_i x_i + f_i$ могут быть определены из значений координат точек $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$ в виде следующих соотношений:

$$d_i = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}, \; f_i = y_A - d_1 x_A \tag{10}$$

Заметим, что если отрезок (A, B) является подвижным поводком, то в этом случае уравнение (6) с коэффициентами, определяемыми из соотношений (10), реализуется как камень кулисы, перемещающийся по звену (A, B) между точками $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$.

Рассмотрим теперь одну МТ, на которую наложены две связи типа (5), при этом поставим условие, чтобы эти прямые не были параллельны – рисунок 3. Решив систему двух линейных уравнений типа (5), определим координаты нахождения МТ. Таким образом, наложение двух связей типа (5) на i-ю МТ приводит к тому, что i-я МТ не будет иметь ни одной степени свободы, т.е. МТ становится неподвижной и реализуется в виде шарнира на стойке (рисунок 4), координаты которого являются решением системы двух линейных уравнений.

Рассмотрим теперь другую разновидность геометрической связи между i-й и j-й МТ, которую можно записать в следующем виде:

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = l_{ij}^2 \tag{11}$$

Эта связь при любых взаимных расположениях i-й МТ и j-й МТ удерживает расстояние между ними равное l – рисунок 5.

В теории механизмов связь вида (11) реализуется в виде поводка с двумя шарнирами, как это показано на рисунке 6.

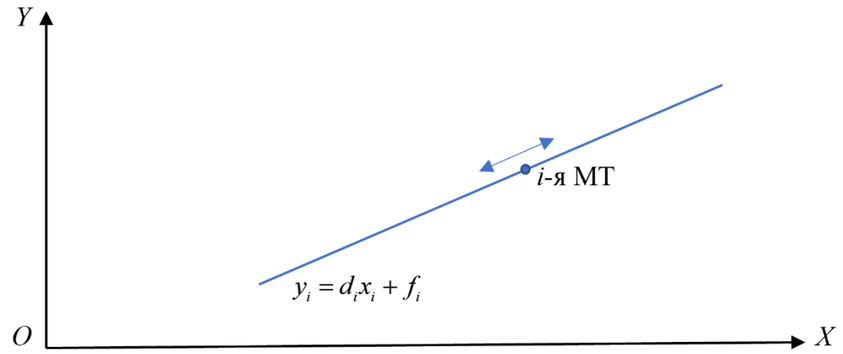


Рисунок 1 – МТ с наложенной на нее связью типа $y_i = d_i x_i + f_i$

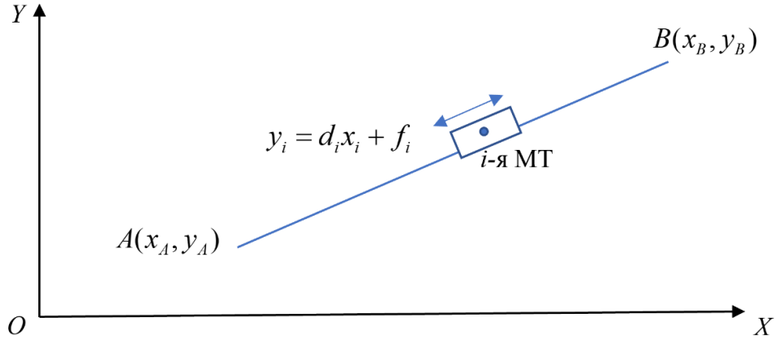


Рисунок 2 – МТ с наложенной на нее связью типа $y_i = d_i x_i + f_i$ в виде поступательной пары

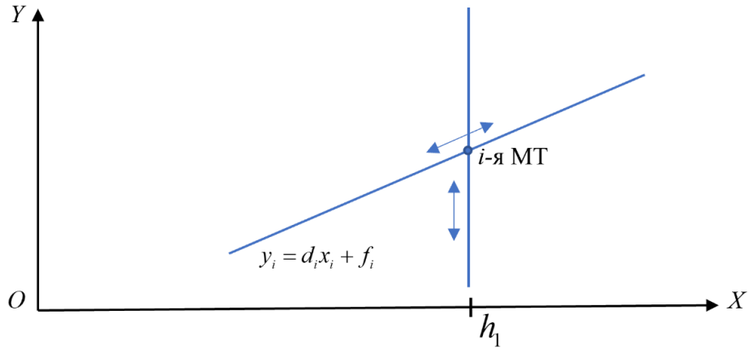


Рисунок 3 – МТ с наложенными на нее связями типа $y_i = d_i x_i + f_i$ и $x_i = h_i$

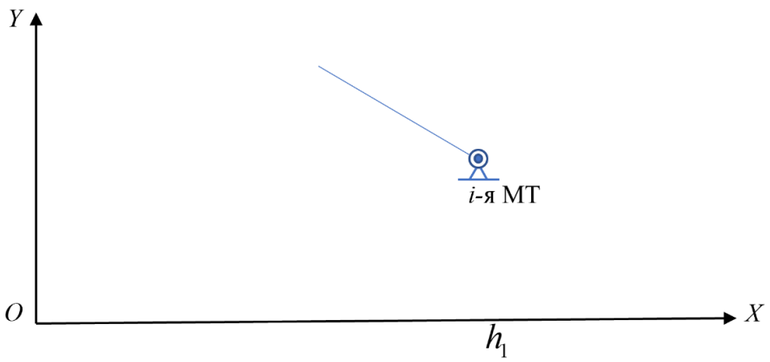


Рисунок 4 – МТ с наложенными на нее связями в виде шарнира на стойке

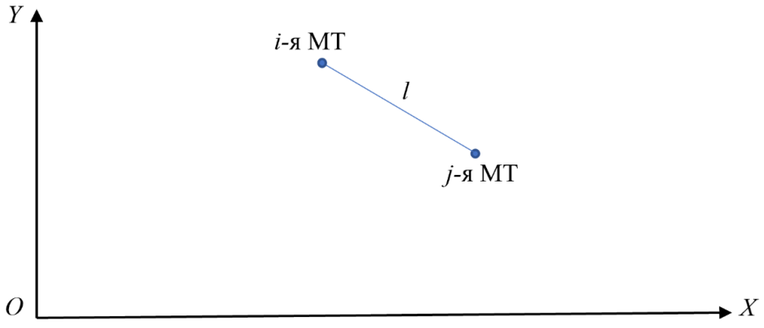


Рисунок 5 – Две МТ с наложенной на них связью типа
$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = l_{ij}^2$

Пусть имеется две МТ, на которые наложим связи следующим образом (рисунок 7). На i-ю МТ наложим две связи типа (5), а i-ю МТ и j-ю МТ свяжем геометрической связью типа $(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = l_{ij}^2$, т.е. на две МТ наложим 3 связи.

Учитывая, что система из двух МТ имеет 4 степени свободы, а наложено 3 связи, механическая система на рисунке 7 будет иметь одну степень свободы.

Эта механическая система представляет собой первичный механизм с одной степенью подвижности – кривошип, у которого i-я МТ представляет собой шарнир, закрепленный на стойке, а поводок (i, j) вращается вокруг шарнира i.

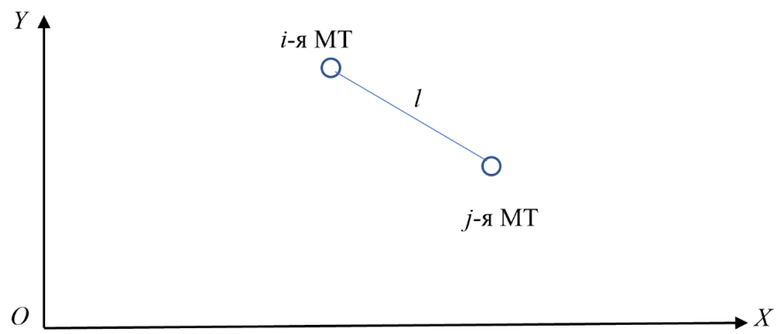


Рисунок 6 – Две МТ с наложенной на них связью типа
$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = l_{ij}^2$, представляют собой поводок

К первичным механизмам с одной степенью свободы относится также ползун на стойке, который представлен на рисунке 2, в случае, когда направляющая находится на стойке. Стойкой в теории механизмов и машин называется неподвижное звено механизма или условно принимаемое за неподвижное. Звеном механизма называется деталь или несколько жёстко соединённых деталей, движущихся как единое целое.

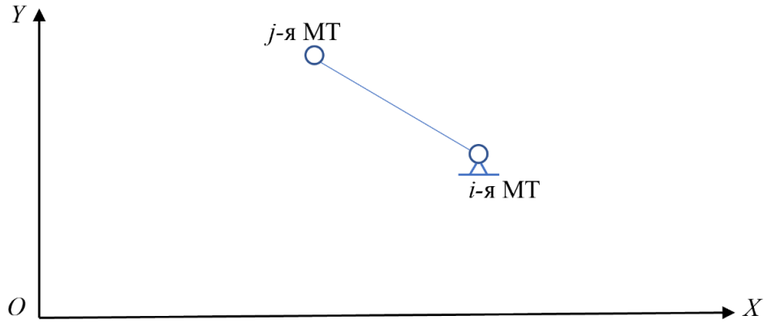
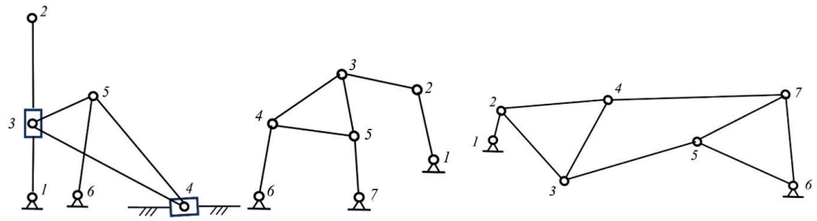


Рисунок 7 – Две МТ с наложенными на них тремя связями

Таким образом, любой плоский рычажный механизм можно представить концептуально в виде системы материальных точек с наложенными на эту систему только двух видов связей: (5) и (11).

Рассмотрим, к примеру, рычажные механизмы высоких классов представленные на рисунке 8.



а) б) в)

Рисунок 8 – Примеры представления МВК системой материальных точек с наложенными на нее связями типа (5) и/или (11)

Рассмотрим механизм 8а – при ведущем звене (1,2) это механизм III класса. Этот механизм образован 6 материальными точками, на которые наложены следующие связи:

МТ 1: на эту точки наложены 2 связи частного случая уравнения (5) $x_1=a_1$ и $y_1=b_1$, где a_1 и b_1 – константы, в результате чего эта точка неподвижна и находится в точке с координатами (x_1, y_1);

МТ 6: также, как и на материальную точку 1, наложены 2 связи частного случая уравнения (5) $x_6=a_6$ и $y_6=b_6$, где a_6 и b_6 – константы, в результате чего эта точка неподвижна и находится в точке с координатами (x_6, y_6);

МТ 4: на эту точку наложена одна связь типа (5)

$$a_4x_4 + b_4y_4 + c_4 = 0; \quad (12)$$

МТ 1 и 2: на эти две материальные точки наложена одна связь типа (11)

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = l_{12}^2; \quad (13)$$

МТ 3 и 4: на эти две материальные точки наложена одна связь типа (11)

$$(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 = l_{34}^2; \quad (14)$$

МТ 3 и 5: на эти две материальные точки наложена одна связь типа (11)

$$(x_3 - x_5)^2 + (y_3 - y_5)^2 = l_{35}^2; \quad (15)$$

МТ 4 и 5: на эти две материальные точки наложена одна связь типа (11)

$$(x_4 - x_5)^2 + (y_4 - y_5)^2 = l_{45}^2; \quad (16)$$

МТ 6 и 5: на эти две материальные точки наложена одна связь типа (11)

$$(x_6 - x_5)^2 + (y_6 - y_5)^2 = l_{65}^2; \quad (17)$$

МТ 3: на эту точку наложена одна связь частного случая уравнения (10)

$$y_3 = d_3x_3 + f_3, \quad (18)$$

где: $d_3 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$, $f_3 = y_1 - d_3x_1$

Проведя анализ уравнений связей, можно заметить, что уравнения (12)-(18) представляют собой систему алгебраических уравнений кинематики, описывающих механизм, представленный на рисунке 8а. В этих уравнениях известными являются координаты точек 1, 6, и если в качестве ведущего звена выбрать поводок (1,2), то тогда к множеству координат точек, положение которых известно, добавляется точка 2. Тогда во множество точек, координаты которых неизвестны, будет состоять из точек {3, 4, 5}. Тогда исключив из рассмотрения уравнение (13), т.е. положение точек 1 и 2 известны, получим систему уравнений: (12), (14), (15), (16), (17), (18) относительно неизвестных $(x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$, т.е. число неизвестных равно 6, и число уравнений, относительно этих неизвестных (12), (14), (15), (16), (17), (18) также равно 6, т.е. система алгебраических уравнений кинематики замкнута.

Таким образом, концепция представления рычажных МВК в виде системы материальных точек с наложенными на нее связями, позволяет получить систему уравнений кинематики в алгебраической форме единственным образом, что очень важно при создании систем автоматизации кинематического анализа МВК.

Таким же образом можно представить и уравнения кинематики механизмов, представленных на рисунках 8б и 8в.

Отметим еще одну положительную особенность представления рычажных МВК в виде системы материальных точек с наложенными на нее связями.

Учитывая, что материальная точка на плоскости имеет две степени подвижности, то если обозначим через : N – количество материальных точек рассматриваемого МВК, k_1 – количество связей типа (5), k_2 – количество связей типа (11), то можно легко подсчитать степень подвижности исследуемого механизма по следующей формуле:

$$w = 2N - k_1 - k_2 \quad (19)$$

Результаты и обсуждение

Приведена новая концепция представления плоских рычажных механизмов высоких классов, что позволяет:

– представить любой плоский рычажный механизм высокого класса в виде системы материальных точек с наложенными на нее связями типа (5) и (11);

– при заданном ведущем звене уравнения наложенных связей на систему материальных точек получить единственным образом систему алгебраических уравнений кинематики исследуемого механизма высоких классов;

– получить новую формулу определения степени подвижности плоских рычажных механизмов, основанную на представлении МВК в виде системы материальных точек с наложенными на нее связями;

– автоматизировать процесс вывода системы уравнений кинематики и определения степени подвижности плоских рычажных МВК.

Информация о финансировании

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (номер гранта: AP23490163).

Выводы

Концепция представления рычажных механизмов как система материальных точек с наложенными на эту систему связями всего двух типов позволяет представить практически весь спектр плоских рычажных механизмов, значительно упростить вывод нелинейных уравнений кинематики исследуемого механизма, и открывает широкие возможности по разработке алгоритмов искусственного интеллекта для автоматизации процессов структурного анализа, вывода уравнений кинематики, нахождения и реализации алгоритмов решения уравнений кинематики, в том числе и с использованием методов условных обобщенных координат для решения задачи кинематического анализа механизмов высоких классов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Molotnikov, V., Molotnikova, A.** Theoretical and Applied Mechanics. Springer 2023. ISBN 978-3-031-09312-8 (eBook). https://doi.org/10.1007/978-3-031-09312-8.

2 **Kleppner, D., Kolenkow, R.** An introduction to mechanics. Second Edition. McGraw Hill Cambridge University Press, 2013. ISBN 9780521198219.

3 **Uicker, J. J., Pennock, G. R., Shigley, J. E.** Theory of Machines and Mechanisms : - Oxford University Press, 2003.

4 **Джолдасбеков, У. А.** Теория механизмов высоких классов / У.А. Джолдасбеков ; М-во образования и науки Респ. Казахстан, Ин-т механики и машиноведения. – Алматы : Fылым, 2001. – 427 с.

5 **Kong, X. W., Gosselin, C. M.** Type synthesis of 3-DOF translational parallel manipulators based on screw theory. J Mech Des: T ASME 2004; 126: P. 83–92.

6 **Пейсах, Э. Е.** Система проектирования плоских рычажных механизмов / Э. Е. Пейсах, В. А. Нестерова; под ред. К. В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1988. – 232 с.

7 **Tatsuya, Y., Nobuyuki, I., Ikuma, I.** Automated Kinematic Analysis of Closed-Loop Planar Link Mechanisms. Machines 2020, 8, 41; [Электронный ресурс]. – www.mdpi.com/journal/machines, https://doi.org/10.3390/machines8030041.

8 **Joldasbekov, S., Ibraev, S., Zhauyt, A., Nurmagambetova, A., Imanbaeva, N.** Modular synthesis of plane lever six-link mechanism of high class. Middle-East Journal of Scientific Research, Vol. 21, Issue 12, 2014, p. 2339–2345.

9 **Карелина, М. Ю.** Теория механизмов и машин : учеб. пособие / М. Ю. Карелина. – М. : МАДИ, 2015 – 80 с.

10 **Артоболевский, И. И., Эдельштейн, Б. В.** Сборник задач по теории механизмов и машин. – М. : Наука, 1975.

11 **Koshel, S. O., Dvorzhak, V. M., Koshel, G. V., Zalyubovskyi, M. G.** Kinematic analysis of complex planar mechanisms of higher classes. International Applied Mechanics, Vol. 58. – № 1. – January, 2022. – https://doi.org/10.1007/s10778-022-01138-1.

12 **Leharika, I.A.S., Bhanuprakash, T.V.K.** Kinematic analysis of planar and spatial mechanisms using MATPACK. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – Volume: 05 Issue: 11 Nov 2018. – [Электронный ресурс]. – www.irjet.net.

13 **Фролов, К. В., Попов, С. А., Мусатов, А. К. и др.** Теория механизмов и машин : учеб. для втузов /под ред. К. В Фролова. – 5– е изд., стереотип. – М. : Высш. шк., 2005. – 496 с.

14 **Левитская, О. Н.** Курс теории механизмов и машин – М. : Высш. шк., 1978. – 269 с.

15 **Джолдасбеков, У. А.** Анализ и синтез плоских и пространственных механизмов высоких классов : Монография//под общей редакцией Б. Т. Жумагулова. – Алматы : 2011. – 352 с.

16 **Левитский, Н. И.** Теория механизмов и машин : Учеб. Пособие для ВУЗов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1990. – 592 с.

17 **Kleppner, D., Kolenkow, R.** An introduction to mechanics. Second Edition. 2014. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom. – [Электронный ресурс]. – https://www.cambridge.org/kz/ universitypress/subjects/physics/general-and-classical-physics/introduction -mechanics-2nd-edition?format=HB&isbn=9780521198110#description.

18 **Бухгольц, Н. И.** Основной курс теоретической механики. Часть первая. М., 1965 год. – 468 с.

19 **Андреев, С. Ф.** Теоретическая механика: курс лекций по одноименной дисциплине для студентов инженерно-технических специальностей заоч. формы обучения. Ч 3/2 – Динамика системы. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – 89 с.

REFERENCES

1 **Molotnikov, V., Molotnikova, A.** Theoretical and Applied Mechanics. Springer 2023. ISBN 978-3-031-09312-8 (eBook). – https://doi.org/10.1007/978-3-031-09312-8.

2 **Kleppner, D., Kolenkow, R.** An introduction to mechanics. Second Edition. McGraw Hill Cambridge University Press, 2013. ISBN 9780521198219.

3 **Uicker, J. J., Pennock, G. R., Shigley, J. E.** Theory of Machines and Mechanisms : - Oxford University Press, 2003.

4 **Dzholdasbekov, U. A.** Teoriya mexanizmov vy`sokix klassov [Theory of high-class mechanisms] / U.A. Dzholdasbekov ; M-vo obrazovaniya i nauki Resp. Kazaxstan, In-t mexaniki i mashinovedeniya. – Almaty` : Fy`ly`m, 2001. – 427 p.

5 **Kong, X. W., Gosselin, C. M.** Type synthesis of 3-DOF translational parallel manipulators based on screw theory. J Mech Des: T ASME 2004; 126: 83–92 p.

6 **Pejsax, E`. E.** Sistema proektirovaniya ploskix ry`chazhny`x mexanizmov [The design system of flat lever mechanisms] / E`. E. Pejsax, V. A. Nesterova; pod red. K. V. Frolova. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 232 p.

7 **Tatsuya, Y., Nobuyuki, I., Ikuma, I.** Automated Kinematic Analysis of Closed-Loop Planar Link Mechanisms. Machines 2020, 8, 41; [Electronic resource]. – www.mdpi.com/journal/machines, https://doi.org/10.3390/machines8030041.

8 **Joldasbekov, S., Ibraev, S., Zhauyt, A., Nurmagambetova, A., Imanbaeva, N.** Modular synthesis of plane lever six-link mechanism of high class. Middle-East Journal of Scientific Research, Vol. 21, Issue 12, 2014, p. 2339–2345.

9 **Karelina, M. Yu.** Teoriya mexanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines] : ucheb. posobie / M. Yu. Karelina. – M. : MADI, 2015 – 80 p.

10 **Artobolevskij, I. I., E`del`shtejn, B. V.** Sbornik zadach po teorii mexanizmov i mashin [Collection of problems on the theory of mechanisms and machines]. – M. : Nauka, 1975.

11 **Koshel, S. O., Dvorzhak, V. M., Koshel, G. V., Zalyubovskyi, M. G.** Kinematic analysis of complex planar mechanisms of higher classes. International Applied Mechanics, Vol. 58. – № 1. – January, 2022. – https://doi.org/10.1007/s10778-022-01138-1.

12 **Leharika, I.A.S., Bhanuprakash, T.V.K.** Kinematic analysis of planar and spatial mechanisms using MATPACK. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – Volume: 05 Issue: 11 Nov 2018. – [Electronic resource]. – www.irjet.net.

13 **Frolov, K. V., Popov, S. A., Musatov, A. K. i dr.** Teoriya mexanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines] : ucheb. dlya vtuzov /pod red. K. V Frolova. – 5– e izd., stereotip. – M. : Vy`ssh. shk., 2005. – 496 p.

14 **Levitskaya, O. N.** Kurs teorii mexanizmov i mashin [The course of theory of mechanisms and machines] – M. : Vy`ssh. shk., 1978. – 269 p.

15 **Dzholdasbekov, U. A.** Analiz i sintez ploskix i prostranstvenny`x mexanizmov vy`sokix klassov [Analysis and synthesis of high-class flat and spatial mechanisms] : Monografiya//pod obshhej redakciej B. T. Zhumagulova. – Almaty` : 2011. – 352 p.

16 **Levitskij, N. I.** Teoriya mexanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines] : Ucheb. Posobie dlya VUZov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Nauka. Gl. red. Fiz.-mat. Lit., 1990. – 592 p.

17 **Kleppner, D., Kolenkow, R.** An introduction to mechanics. Second Edition. 2014. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom. – [Electronic resource]. – https://www.cambridge.org/kz/ universitypress/subjects/physics/general-and-classical-physics/introduction -mechanics-2nd-edition?format=HB&isbn=9780521198110#description.

18 **Buxgol`cz, N. I.** Osnovnoj kurs teoreticheskoj mexaniki. Chast` pervaya.[The basic course of theoretical mechanics. Part one.] M., 1965 god. – 468 p.

19 **Andreev, S. F.** Teoreticheskaya mexanika: kurs lekcij po odnoimennoj discipline dlya studentov inzhenerno-texnicheskix special`nostej zaoch. formy` obucheniya. Ch 3/2 - Dinamika sistemy`[ Theoretical mechanics: a course of lectures on the discipline of the same name for students of engineering and technical specialties by correspondence. forms of education. H 3/2 - System dynamics.]. Gomel`: GGTU im. P. O. Suxogo, 2014. – 89 p.

Поступило в редакцию 15.01.26.
Поступило с исправлениями 08.02.26.
Принято в печать 17.02.26.

Д. Ш. Ахмедов[1], А. Ж. Сейдахмет[2]
[1,2]Академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
15.01.26 ж. баспаға түсті.
08.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
17.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БАЙЛАНЫСТЫРЫЛҒАН МАТЕРИАЛДЫҚ НҮКТЕЛЕР ЖҮЙЕСІ АРҚЫЛЫ ЖАЛПАҚ РЫЧАГТЫҚ МЕХАНИЗМДЕРДІ ҰСЫНУ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ

Өнеркәсіпте қолдану перспективаларының бірі жоғары классты жалпақ иінді механизмдер (ЖКМ) болып табылады. Бұл механизмдерді кеңінен қолдану кинематикалық талдау жүргізудің қиындығын, атап айтқанда, орналасу мәселесін шешу: жетекші звеноның берілген орналасуымен, барлық қолданыстағы құрастырмалар үшін жетектегі звенолардың координаталарын және/немесе бұрыштық позицияларын анықтау. Жалпы жағдайда II класс және ЖКМ механизмдері үшін кинематикалық теңдеулер жүйесі тригонометриялық немесе алгебралық теңдеулер жүйесі болып табылады. Егер II класс теңдеулері үшін кинематика теңдеулер жүйесін аналитикалық жолмен шешуге болатын болса, онда ЖКМ үшін кинематика теңдеулер жүйесі аналитикалық түрде шешілмейді. Себебі II класс механизмдерін диадтар тізбегіне бөлуге болады, олардың әрқайсысы аналитикалық түрде шешілетін екі белгісіз екі теңдеуді білдіреді, ал ЖКМ-ды диадтар тізбегіне бөлу мүмкін емес, осыған байланысты ЖКМ ережелері туралы мәселені шешу үшін әртүрлі сандық әдістерді қолдану қажет, оларды жүзеге асыру өте күрделі есептеу тапсырмасы. Сондықтан ЖКМ кинематикасы мәселелерін шешуді автоматтандыру өзекті міндет болып табылады, оны шешу ЖКМ-ды әртүрлі өнеркәсіптік қосымшалар үшін кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Бұл мақалада жазық жоғары класты иінді механизмдерді оған салынған байланыстары бар материалдық нүктелер жүйесі ретінде тұжырымдамалық түрде ұсыну мәселелері қарастырылады, бұл кинематика теңдеулерін автоматты түрде шығару алгоритмдеріне өтуге және зерттелетін механизмдердің қозғалғыштық дәрежесін анықтауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: жоғары класс механизмдері, механизм құрылымы, кинематикалық талдау, орналасу мәселесі, құрылымдық талдау.

***D. Akhmedov[1], A. Seidakhmet[2]**
[1,2]Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering,
Republic of Kazakhstan, Almaty
Received 15.01.26.
Received in revised form 08.02.26.
Accepted for publication 17.02.26.

THE CONCEPT OF REPRESENTING PLANAR LEVER MECHANISMS AS A SYSTEM OF POINTS WITH CONNECTIONS SUPERIMPOSED ON THEM

One of the promising types for industrial application is high-class planar linkage mechanisms (HCM). The wide use of these mechanisms is hindered by the difficulty of kinematic analysis, particularly solving the position problem: given the position of the driving link, determine the coordinates and/or angular positions of the driven links for all existing assemblies. In the general case, for class II and HCM mechanisms, the system of kinematic equations is a system of trigonometric or algebraic equations. If for class II equations the system of kinematics equations can be solved analytically, then for HCM the system of kinematics equations cannot be solved analytically. This is due to the fact that class II mechanisms can be divided into a sequence of dyads, each of which is two equations with two unknowns that can be solved analytically, and it is impossible to divide the HCM into a sequence of dyads, and therefore various numerical methods have to be used to solve the problem of the positions of the HCM, the implementation of which is quite complex. a computational task. Therefore, automating the solution of HCM kinematics problems is an urgent task, the solution of which will make it possible to widely use HCM for various industrial applications. This article discusses the conceptual representation of high-class planar lever mechanisms as a system of material points with connections superimposed on it, which allows us to move on to algorithms for automatically deriving kinematics equations and determining the degree of mobility of the studied mechanisms.

Keywords: high-class mechanisms, mechanism structure, kinematic analysis, position problem, structural analysis.

МРНТИ 55.33.41
https://doi.org/10.48081/BGQF1907

С. Р. Байгереев[1], Г. А. Гурьянов[2],
****А. Д. Сулейменов[3], Р. Ғабдысалық[4]***
[1,2,4]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7773-5457
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3657-3735
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9319-0285
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897
*e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz

МАТЕРИАЛДАРДЫ МАЙДАЛАП ҰНТАҚТАУ ТИІМДІЛІГІНЕ КҮШ ӘСЕРІ БАҒЫТЫНЫҢ ЫҚПАЛЫН БАҒАЛАУ

Бұл жұмыста материалдарды майдалау процесінің әртүрлі бағыттағы және әсер ету түрлеріндегі ерекшеліктері қарастырылған. Шар тәрізді бөлшекке ұсақтаушы денелердің әсер етуінің төрт сипаттық жағдайы теориялық тұрғыда талданды: біржақты, екіжақты және күштердің өзара перпендикуляр бағыттардағы біріктірілген әсерлері. Майдалау дәрежесінің теориялық мәнін анықтау үшін Герц–Штаерманның жанасу есебіне және авторлар бұрын әзірлеген математикалық тәуелділіктерге негізделген математикалық модель қолданылды.

Есептеу нәтижелері көрсеткендей, екіжақты әсер ету кезінде соқтығысу жылдамдықтары бірдей болған жағдайда бөлшектердің ұсақталу дәрежесі біржақты әсерге қарағанда жоғары болады. Бұл бөлшек көлемінде біркелкі кернеу-деформация күйінің қалыптасуымен және соққы энергиясының толығырақ пайдаланылуымен түсіндіріледі. Күштер өзара перпендикуляр бағытта әсер ететін көпвекторлы жағдайларда есептеу тең әсерлі жылдамдықты ескере отырып жүргізілді, бұл әртүрлі бағыттағы жүктемелердің жиынтық әсерін дұрыс бағалауға мүмкіндік берді.

Алынған теориялық тәуелділіктер майдалау процесінің энергия тиімді әдістерін жобалау кезінде және көпвекторлы жүктеме режимдерін жүзеге асыратын жаңа үлгідегі диірмен конструкцияларын жасауда қолданылуы мүмкін. Зерттеу нәтижелері қатты материалдарды дезинтеграциялау процестеріндегі энергия үнемдеу ғылыми негіздерін дамытуға және өнеркәсіптік майдалау технологияларын оңтайландыруға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: ұсақ майдалау, соқтығысу энергиясы, ұсақтаушы денелер, біржақты әсер, екіжақты әсер, Герц-Штаерман жанасуы, энергия тиімділігі.

Кіріспе

Материалдарды майдалап ұнтақтау металлургия, құрылыс индустриясы, химия және фармацевтика сияқты көптеген өнеркәсіп салаларындағы негізгі технологиялық кезеңдердің бірі болып табылады [1]. Оның өзектілігі ұнтақтау дәрежесінің кейінгі технологиялық үдерістерге тікелей әсер етуімен түсіндіріледі: бөлшектердің меншікті бетінің артуы химиялық реакциялардың қарқындануына, композиттердің беріктік сипаттамаларының жақсаруына, пайдалы қазбаларды байыту үдерістерінің жылдамдауына мүмкіндік береді. Сонымен қатар, қазіргі заманғы талаптар энергия сыйымдылығын және өндірістің экологиялық жүктемесін төмендетуді көздейді, бұл майдалап ұнтақтаудың энергия тиімді әдістерін әзірлеуді аса маңызды етеді.

Майдалап ұнтақтау үдерісінде кеңінен қолданылатын жабдықтардың бірі – ұнтақтаушы шарлары бар диірмендер. Олар материалға шарлардың соққы және үйкеліс әсерлері арқылы жоғары дәрежеде майдалап ұнтақтау мүмкіндігін береді. Мұндай технология қатты және морт материалдарды тиімді өңдеуге, құрылымы біркелкі және дисперстілігі берілген ұнтақтарды алуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттерді талдау көрсеткендей, ұнтақтаушы денелерді энергия тасымалдаушысы ретінде пайдаланатын диірмендердегі материалдарды майдалап ұнтақтау тиімділігіне қолданылатын әсер режимі айтарлықтай ықпал етеді. Әсер режиміне күштің бағыты (біржақты, екіжақты, перпендикуляр және т.б.), механикалық әсер түрі (сығылу, соққы, үйкеліс, ығысу және т.б.), әсердің интенсивтілігі (күш шамасы, қысым, деформация жылдамдығы, соққы энергиясы) және басқа параметрлер жатады. Әдеби деректерді талдау көрсеткендей, әртүрлі типтегі диірмендердегі ұнтақтау үдерістерінің тиімділігін анықтайтын негізгі фактор – ұнтақтаушы денелердің соқтығысу энергиясы. Дәл осы энергияның шамасы материал бөлшектерінің бұзылу деңгейін және сәйкесінше олардың майдалап ұнтақталу дәрежесін айқындайды. Бірқатар зерттеулерде [2;3] соқтығысу энергиясын арттыру энергетикалық шығындарды сақтай отырып немесе азайта отырып, үдеріс тиімділігін жоғарылататыны атап өтіледі [4].

Әдебиеттерде майдалап ұнтақтау үдерісін интенсивтендірудің екі негізгі тәсілі ұсынылған. Бірінші тәсіл ұнтақтаушы денелердің қозғалыс жылдамдығын арттырумен байланысты. Белгілі болғандай, соқтығысу энергиясы кинетикалық энергияға, ал ол өз кезегінде жұмыс денелерінің жылдамдығына пропорционал. Әртүрлі типтегі диірмендерде бұл өсім әртүрлі жолдармен іске асырылады: шарлы диірмендерде барабанның айналу жылдамдығын арттыру арқылы [5;6], дірілдік диірмендерде тербеліс амплитудасын көбейту арқылы [7;8], немесе араластырылатын ортадағы диірмендерде араластырғыштың айналу жылдамдығын арттыру арқылы [9;10]. Алайда, зерттеушілер атап өткендей, бұл тәсілдің белгілі шектеулері бар. Мысалы, шарлы диірмен барабанының айналу жиілігі артқанда, орталықтан тепкіш күштердің әсерінен жүктеменің қайта бөлінуі байқалады, бұл майдалап ұнтақтау тиімділігін төмендетеді [11]. Дірілдік диірмендерде тербеліс амплитудасы жабдықтың конструктивтік параметрлерімен шектеледі [12], ал араластырылатын диірмендерде араластырғыш жылдамдығының артуы жоғары

энергия аймағындағы ұнтақтаушы денелердің концентрациясының төмендеуіне әкеледі [13].

Екінші бағыт диірменнің геометриялық параметрлерін және жүктеменің сипаттамаларын өзгертуге байланысты. Мұндай параметрлерге камера өлшемдері, ұнтақтаушы денелермен толтыру коэффициенті, араластырғыштың пішіні мен өлшемдері, сондай-ақ ұнтақтаушы денелердің өз пішіні мен өлшемдері жатады. Зерттеу нәтижелері камера диаметрінің ұлғаюы қабырға мен жұмыс органы арасындағы саңылаудың артуына байланысты үдерістің энергия сыйымдылығын төмендететінін көрсетеді [14]. Толтыру коэффициенті артқанда соқтығысу жиілігі өседі, алайда шарлардың үдеуі үшін қажетті бос кеңістік азаяды, бұл соққы энергиясының өсуін шектейді [15].

Сондай-ақ араластырғыштың пішіні энерго тиімділікке айтарлықтай әсер ететіні дәлелденген: дискілі конструкция энергия тұтынуды азайтады, ал қалақты және айқыш тәрізді нұсқалар соқтығысу энергиясының жоғары болуын қамтамасыз етеді [16]. Ұнтақтаушы денелердің өлшемі мен пішіні де маңызды рөл атқарады – ірі денелер энергия сыйымдылығын арттырғанымен, әрдайым оңтайлы ұнтақтау дәрежесін қамтамасыз ете бермейді [17]; ал сфералық пішін ең тиімдісі ретінде танылған [18].

Жоғарыда келтірілген тәсілдерді қорытындылай отырып, мынадай заңдылықты атап өтуге болады: ұнтақтау тиімділігін арттыру әдетте жұмыс денелерінің қозғалыс жылдамдықтарының өсуімен және диірменнің геометриялық параметрлерін өзгертумен қатар жүреді, бірақ бұл әрдайым оңтайлы энергетикалық режимге алып келмейді. Осыған байланысты бірқатар зерттеулерде [19] баламалы әдіс ұсынылған – күштердің әрекет ету бағыттарының әртектілігі есебінен бөлшектердің неғұрлым толық бұзылуына ықпал ететін көпвекторлы соққыларды ұйымдастыру.

Материалдар мен әдістері

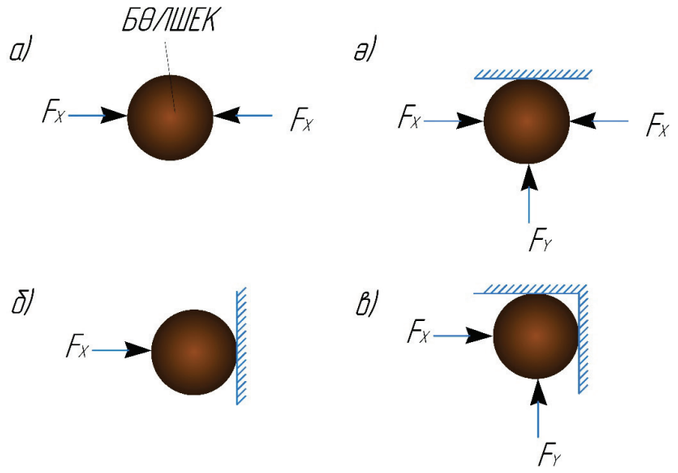
Күштердің әсер ету бағыттарының ұнтақтау тиімділігіне ықпалын зерттеу шар тәрізді бөлшекке ұнтақтаушы шарлардың әсер етуінің төрт жағдайы мысалында (1-сурет) жүргізіледі:

– өлшек екі жағынан ұнтақтаушы шарлармен шектелген және шарлар бөлшекке бір мезгілде күш түсіреді (екіжақты әсер ету) (1-сурет, а);

– бөлшек горизонталь бағытта екіжақты, ал вертикаль бағытта біржақты әсерге ұшырайды (1-сурет, ә);

– бөлшек бір жағынан қозғалмайтын тірекпен, ал екінші жағынан бөлшекке күш түсіретін ұнтақтаушы шармен шектелген (біржақты әсер ету) (1-сурет, б);

– бөлшек горизонталь және вертикаль бағыттарда кезекпен біржақты әсерге ұшырайды (1-сурет, в).



1-сурет – Шар тәрізді бөлшекке ұнтақтаушы шарлардың әсер ету сұлбалары

Ұнтақтаушы денелердің бөлшекпен өзара әрекеттесу сұлбаларын талдау көрсеткендей, барлық жағдайларды екі негізгі түрге – біржақты және екіжақты әсер етуге – жатқызуға болады. Ұсынылған ұнтақтау принципінің тиімділігін теориялық зерттеулер кезеңінде сандық тұрғыдан бағалау үшін осы өзара әрекеттесу түрлерінің әрқайсысы үшін теориялық майдалап ұнтақтау дәрежесінің мәндерін есептеу қажет.

Есептеулердің негізі ретінде бұрын әзірленген математикалық модель [19] қолданылды. Бұл модель классикалық Герц–Штаерманның контактылық есебіне негізделген, ол соқпалы өзара әрекеттесу кезінде контакт аймағындағы кернеулер мен деформациялардың таралу заңдылықтарын ескеруге мүмкіндік береді.

Екіжақты жүктеме жағдайында (1-сурет) ұнтақтаушы шарлардың бөлшекпен соқтығысу сәтінде қозғалатын денелердің кинетикалық энергиясы E_K бөлшектің бұзылу потенциалдық энергиясына E_P түрленеді. Әсер ету екі жағынан симметриялы түрде жүзеге асатындықтан, бөлшек қабылдайтын жиынтық энергия екі еселенеді: $E_K + E_K = 2E_K$ және сәйкесінше $E_P + E_P = 2E_P$..

Энергияның сақталу заңына сәйкес кинетикалық және потенциалдық энергиялардың мәндері теңестіріледі. Бұл әртүрлі жүктеу сұлбалары кезінде материалдың майдалап ұнтақталу дәрежесін есептеуге арналған аналитикалық тәуелділікті алуға мүмкіндік береді.

$$2E_K == \frac{4F_x}{g}\cdot\frac{\upsilon_x^2}{\left(1+\frac{4\pi\cdot\rho\cdot d_ш^3}{24F}\right)} = 2E_p = \frac{8Y}{3\left(1-\mu^2\right)}\cdot\left(\frac{d_ч\cdot d_ш}{2\left(d_ч+d_ш\right)}\right)^{0,5}\cdot\frac{2}{5}\cdot u_{M2}^{2,5} \qquad (1)$$

Бөлшектің деформация шамасын анықтайтын шардың максималды орын ауыстыруы u_{M2} анықталады:

$$u_{M2} = \left[\frac{15}{4}\left(\frac{1-\mu^2}{Y}\right)\cdot\frac{F_x}{g\left(1+\frac{4\pi\cdot\rho\cdot d_ш^3}{24F_x}\right)}\right]^{0,4}\cdot\left(\frac{d_ч\cdot d_ш}{2\left(d_ч+d_ш\right)}\right)^{0,2}\cdot\upsilon_x^{0,8} \qquad (2)$$

(7) және (8) формулаларда μ – Пуассон коэффициенті,Y – серпімділік модулі, F_x – ұнтақтау күші, ρ – ұнтақтаушы шардың тығыздығы, $d_{ч1}$ – бөлшектің бастапқы диаметрі, $d_ш$ – ұнтақтаушы шардың диаметрі.

Теориялық майдалап ұнтақтау дәрежесін анықтау үшін, [19] теориясына сәйкес, бөлшек ұнтақталмайтын ең төменгі шекті соққы жылдамдығы анықталады:

$$\upsilon_{0П} = \upsilon_{0П}\left(d_ч\right) = 18{,}08191\cdot d_ш\cdot\sqrt{\frac{\gamma_c\cdot\left(1-2\mu\right)}{\sigma_{вр}}\cdot\left(1+\frac{d_ш}{d_ч}\right)} = \upsilon \qquad (3)$$

(10) өрнекті (6) формула бойынша алынған υх жылдамдық мәніне теңестіре отырып, бөлшектің соңғы диаметрін (ұнтақтау дәрежесін) анықтауға арналған өрнек алынады:

$$d_ч = \frac{d_ш}{\frac{\upsilon^2}{\left(18{,}08191\right)^2\cdot d_ш^2}\cdot\frac{\sigma_{вр}}{\gamma_c\left(1-2\mu\right)}-1} \qquad (4)$$

Біржақты әсер ету жағдайында (1-сурет) бөлшек энергияны тек бір жағынан қабылдайды, сондықтан (7) теңдеу келесі түрде болады:

$$E_K == \frac{F_x}{2g}\cdot\frac{\upsilon_x^2}{\left(1+\frac{4\pi\cdot\rho\cdot d_ш^3}{24F}\right)} = E_p = \frac{4Y}{3\left(1-\mu^2\right)}\cdot\left(\frac{d_{ч1}\cdot d_ш}{2\left(d_{ч1}+d_ш\right)}\right)^{0,5}\cdot\frac{2}{5}\cdot u_{M1}^{2,5} \qquad (5)$$

Нәтижесінде, біржақты әсер ету кезіндегі шардың максималды орын ауыстыруын u_{M1} анықтау формуласы келесі түрде жазылады:

$$u_{M1} = \left[\frac{15}{16}\left(\frac{1-\mu^2}{Y}\right)\cdot\frac{F_x}{g\left(1+\frac{4\pi\cdot\rho\cdot d_ш^3}{24F}\right)}\right]^{0,4}\cdot\left(\frac{d_{ч1}\cdot d_ш}{2\left(d_{ч1}+d_ш\right)}\right)^{0,2}\cdot\upsilon_x^{0,8} \qquad (6)$$

Екіжақты және біржақты әсер ету жағдайларына сәйкес u_{M2} және u_{M1} ұнтақтаушы шарлардың орын ауыстыру шамалары ұнтақталатын материал бөлшегінің бұзылу аймағының көлемін анықтайды. Осы бұзылу аймағы арқылы кейіннен бөлшектің соңғы өлшемін, яғни майдалап ұнтақтау дәрежесін есептеуге болады.

(8) және (10) формулаларды салыстыру нәтижесінде екіжақты әсер ету кезіндегі ұнтақтаушы шарлардың орын ауыстыру шамасы біржақты әсер кезіндегі орын ауыстырудан 4 есе үлкен екені анықталады, яғни $\frac{u_{M2}}{u_{M1}} = 4$. Осыдан алдын ала мынадай қорытынды жасауға болады: екіжақты әсер ету жағдайында ұнтақтау үдерісінің тиімділігі біржақты әсер етумен салыстырғанда 4 есе жоғары болуы мүмкін.

Теориялық майдалап ұнтақтау дәрежесін анықтау үшін, [19] теориясына сәйкес, бөлшек ұнтақталмайтын ең төменгі шекті соққы жылдамдығы анықталады:

$$\upsilon_{0П} = \upsilon_{0П}\left(d_ч\right) = 36{,}16381 \cdot d_ш \cdot \sqrt{\frac{\gamma_c \cdot \left(1-2\mu\right)}{\sigma_{вр}} \cdot \left(1+\frac{d_ш}{d_ч}\right)} = \upsilon \qquad (7)$$

(10)-өрнекті (6)-формула бойынша алынған $\upsilon_х$ жылдамдық мәніне теңестіре отырып, бөлшектің соңғы диаметрін (майдалап ұнтақтау дәрежесін) анықтауға арналған өрнек алынады:

$$d_ч = \frac{d_ш}{\frac{\upsilon^2}{\left(36{,}16381\right)^2 \cdot d_ш^2} \cdot \frac{\sigma_{вр}}{\gamma_c\left(1-2\mu\right)} - 1} \qquad (8)$$

Қарастырылған төрт жағдай үшін майдалап ұнтақтау дәрежесін есептеуді нақты бастапқы деректерді пайдалана отырып жүргіземіз (1-кесте).

1-кесте – Есептеулер үшін бастапқы деректер

Параметр атауы	Белгіленуі	Мәні
Материал (құм) параметрлері		
Пуассон коэффициенті	μ	0,27
Серпімділік модулі	Y	$36 \cdot 10^9$ Па
Шекті кернеу	σ	1,15 Мпа
Бөлшектің бастапқы диаметрі	$d_{ч1}$	100 мкм
Ұнтақтаушы шарлардың параметрлері		
Ұнтақтаушы шарлардың диаметрі	$d_ш$	10 мм
Ұнтақтаушы шарлардың тығыздығы	ρ	$7{,}7 \cdot 10^{-5}$ Н/мм^3
Ұнтақтаушы шарлардың соқтығысу жылдамдығы	$\upsilon_х$	2378 мм/с

Бұл ретте ескерер жайт: екінші және төртінші жағдайларда жүктеу сұлбасы күштердің өзара перпендикуляр бағыттарда – горизонталь және вертикаль бағыттарда – әсер етуімен сипатталады. Мұндай конфигурация бөлшекке түсетін нәтижелік әсердің бір ғана емес, бір-біріне бұрышпен әсер ететін жылдамдықтар жиынтығымен айқындалуына алып келеді.

Осы әсерді дұрыс ескеру және модельдің есептік күрделілігін арттырмай қысқарту үшін майдалап ұнтақтаудың теориялық дәрежесін анықтау кезінде әсер етуші күштердің теңәсерлі жылдамдығы пайдаланылады. Ол (9)-өрнек бойынша анықталады:

$$\upsilon = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2} \qquad (9)$$

мұндағы υ_x және υ_y – сәйкесінше горизонталь және вертикаль бағыттардағы жылдамдық компоненттері.

Теңәсерлі жылдамдықты қолдану көпвекторлы әсерлердің ықпалын бір параметр аясында біріктіруге мүмкіндік береді, бұл есептеулерді көрнекірек етеді және әртүрлі бағыттағы күштердің жиынтық әсерін дұрыс бағалауға жағдай жасайды. Мұндай тәсіл кейінгі теориялық есептеулердің бірізділігін қамтамасыз етеді және нәтижелерді бірбағытты жүктеу режимдерімен салыстыруға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

2-кестеде төрт жағдай үшін жүргізілген есептеулердің нәтижелері келтірілген.

2-кесте – Есептеулер нәтижелері

Жағдай	Әсер ету жылдамдығы	Майдалап ұнтақтау дәрежесі
Жағдай 1	2000 мм/с	2,52 мкм
Жағдай 2	3605 мм/с	0,78 мкм
Жағдай 3	2000 мм/с	10,07 мкм
Жағдай 4	3605 мм/с	3,10 мкм

Деректерді талдау әсер ету жылдамдығының артуы бөлшектердің соңғы өлшемінің кемуіне айтарлықтай ықпал ететінін көрсетеді, бұл ұнтақтау үдерісінің кинетикалық параметрлерге жоғары сезімталдығын дәлелдейді.

Екіжақты әсер ету жағдайында (1 және 2 жағдайлар) соқтығысу жылдамдығы 2000 мм/с-тан 3605 мм/с-қа артқанда майдалап ұнтақтау дәрежесі 2,52 мкм-ден 0,78 мкм-ге дейін төмендейді. Бұл энергияның артуына байланысты материалдың бұзылу үдерісінің интенсивтенуін көрсетеді. Сонымен қатар, алынған ұсақ фракциялардың неғұрлым біркелкі бөлінуі байқалады, бұл жүктеменің симметриялы түрде берілуімен және қалдық кернеулердің азаюымен түсіндірілуі мүмкін.

Біржақты әсер ету жағдайында (3 және 4 жағдайлар) жылдамдықтың артуы бөлшек өлшемінің 10,07 мкм-ден 3,10 мкм-ге дейін кемуіне әкелгенімен, алынатын майдалап ұнтақтау дәрежесі екіжақты жүктеумен салыстырғанда едәуір жоғары

болып қалады. Бұл біржақты әсер кезінде энергияның бір бөлігі материалдың серпімді орын ауыстыруына және толық бұзылуға әкелмейтін пластикалық деформация аймақтарының түзілуіне жұмсалатынымен түсіндіріледі.

Осылайша, есептеу нәтижелері екіжақты әсер ету режимінің неғұрлым энерго тиімді екенін, сондай-ақ бірдей соқтығысу жылдамдықтары кезінде материалдың ұсақ бөлшектерін алуға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Алынған тәуелділіктер кернеулі-деформациялық күйдің бұзылу үдерістеріне ықпалы жөніндегі теориялық түсініктерге сәйкес келеді және материалдарды майдалап ұнтақтаудың энергия тиімді әдістерін әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қаржылай қолдауы арқылы орындалды (Грант №AP22685023).

Қорытынды

Материалдарды майдалап ұнтақтау үдерістері қазіргі өнеркәсіпте жоғары өзектілігін сақтап отыр, өйткені бөлшектердің дисперстілік дәрежесі кейінгі технологиялық операциялардың сапасы, тиімділігі және энергия шығынына тікелей әсер етеді. Ұнтақтау үдерісінің энергия тиімділігін арттыру және алынатын материалдың құрылымын басқару жаңа өңдеу технологияларын әзірлеудегі маңызды міндеттер болып табылады.

Осы зерттеуде күштік әсердің бағыты мен сипатының майдалап ұнтақтау үдерісінің тиімділігіне ықпалы қарастырылды. Есептік тәуелділіктер мен шар тәрізді бөлшектерге әсер етудің төрт түрлі жүктеу сұлбасын талдау негізінде ұнтақтау жылдамдығы мен әсер ету бағыты өзгерген кезде майдалап ұнтақтау дәрежесінің өзгеру заңдылықтары анықталды. Біржақты және екіжақты режимдерді салыстырмалы талдау материалдың бұзылу механизмдеріндегі және үдерістің энергия тиімділігіндегі айырмашылықтарды айқындауға мүмкіндік берді.

Жүргізілген теориялық зерттеулер нәтижесінде күштік әсердің бағыты мен сипаты материалдың бұзылу деңгейіне және майдалап ұнтақтау дәрежесіне айтарлықтай ықпал ететіні анықталды. Талдау көрсеткендей, ұнтақтаушы денелердің екіжақты әсері бөлшектердің неғұрлым интенсивті бұзылуын қамтамасыз етеді және бірдей соқтығысу жылдамдықтары кезінде біржақты жүктеумен салыстырғанда өнімнің ұсақ бөлшектерге дейін ұнтақталуына мүмкіндік береді.

Екіжақты әсер ету жағдайында бөлшек көлемінде анағұрлым біркелкі кернеулі-деформациялық күй қалыптасады, бұл материал құрылымының толық бұзылуына және қалдық кернеулердің төмендеуіне ықпал етеді. Ал біржақты жүктеу кезінде энергияның бір бөлігі серпімді деформация мен орын ауыстыруға жұмсалады, бұл ұнтақтау тиімділігін төмендетеді.

Алынған нәтижелер күштік әсердің бағыты мен сипатын оңтайландыру майдалап ұнтақтау үдерістерінің энергия тиімділігін арттырудың тиімді тәсілі екенін растайды. Екіжақты және көпвекторлы жүктеу сұлбаларын пайдалану

қажетті дисперстілік дәрежесіне төмен энергетикалық шығындармен қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Анықталған заңдылықтар жаңа диірмен конструкцияларын және олардың жұмыс режимдерін әзірлеуде қолданылуы мүмкін. Мұндай конструкциялар көпвекторлы әсерлерді іске асыруға және соқтығысу энергиясын барынша тиімді пайдалануға бағытталуы мүмкін. Бұл материалдарды майдалап ұнтақтаудың энергия тиімді, ресурстарды үнемдейтін және орнықты даму талаптарына сай жаңа технологияларын жасауға мүмкіндік ашады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Guo W., Gui X., Xing Y., Zhang H., Ma R., Meng W., Luo M.** Study on the unequal-probability comminution of spodumene and feldspar during the grinding process of lithium ore // Powder Technology. – 2023. – Vol. 418. – P. 118776.

2 **Ma S., Yang X., Li H., Li Z., Zhu P., Yang J.** Study on the population balance dynamics simulation of grinding under impact crushing // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – P. 5455.

3 **Daraio D., Villoria J., Ingram A., Alexiadis A., Stitt E. H., Marigo M.** Validation of a Discrete Element Method (DEM) model of the grinding media dynamics within an attritor mill using positron emission particle tracking (PEPT) measurements // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9. – P. 4816.

4 **Wołosiewicz-Głąb M., Pięta P., Foszcz D., Ogonowski S., Niedoba T.** Grinding kinetics adjustment of copper ore grinding in an innovative electromagnetic mill // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8. – P. 1322.

5 **Al Aziz F. A., Masruroh, Fauzy A. I. M., Sakti S. P., Santjojo D. J. D. H.** Rotational speed effect of the planetary ball milling on the particle size and crystal structure of $CaMnO_3$ as a thermoelectric material // In: Proceedings of the II International Scientific and Practical Symposium “Materials Science and Technology” (MST-II-2022). – Melville, NY: AIP Publishing, 2023.

6 **Safa A., Aissat S.** Analyzing the influence of lifter design and ball mill speed on grinding performance, particle behavior and contact forces // Mechanics & Industry. – 2023. – Vol. 24. – P. 37.

7 **Li H., Zhang H., Huang K., Liang D., Zhao D., Jiang Z.** Effect of ball milling speed on the quality of Al_2O_3 stripped graphene in a wet milling medium // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48. – P. 17171–17177.

8 **Piekaj P., Cieplok G.** Experimental tests of the antiresonance vibratory mill of a sectional movement trajectory // Open Engineering. – 2021. – Vol. 11. – P. 1180–1184.

9 **Biliang T., Bo C., Xianzhou S., Haonan J., Yijiang L., Zhaohua W.** Experimental study on the influence of rotational speed on grinding efficiency for the vertical stirred mill // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – P. 1208.

10 **Tong C., Chen Z., Liu C., Xie Q.** Analysis and optimization of the milling performance of an industry-scale VSM via numerical simulations // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 4712.

11 **Megret A., Vitry V., Delaunois F.** High-energy ball milling of WC–10Co: Effect of the milling medium and speed on the mechanical properties // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Vol. 104. – P. 105760.

12 **Wada T., Uematsu T., Shiomi H., Osaki K., Ishihara S., Kano J.** Prediction of power of a vibration rod mill during cellulose decrystallization processing by DEM // Advanced Powder Technology. – 2021. – Vol. 32. – P. 3717–3724.

13 **Riley M., Pinkney S., Blackburn S., Rowson N. A.** Spatial distributions of media kinetic energy as measured by positron emission particle tracking in a vertically stirred media mill // Minerals Engineering. – 2016. – Vol. 98. – P. 177–186.

14 **Altun O., Benzer H., Enderle U.** The effects of chamber and rotor design on dry horizontal stirred mill performance // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 24–28.

15 **Jayasundara C. T., Yang R. Y., Yu A. B., Rubenstein J.** Effect of disc rotation and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill // International Journal of Mineral Processing. – 2010. – Vol. 96. – P. 27–35.

16 **Osborne T., Rhymer D., Werner D., Ingram A., Windows-Yule C. R. K.** Investigating the impact of impeller geometry for a stirred mill using the discrete element method: Effect of pin number and thickness // Powder Technology. – 2023. – Vol. 428. – P. 118810.

17 **Abdelhaffez G. S., Ahmed A. A., Haitham M. A.** Effect of grinding media on the milling efficiency of a ball mill // Mining, Geology & Petroleum Engineering Bulletin. – 2022. – Vol. 38. – P. 171–177.

18 **Shahbazi B., Jafari M., Parian M., Rosenkranz J., Chehreh Chelgani S.** Study on the impacts of media shapes on the performance of tumbling mills – A review // Minerals Engineering. – 2020. – Vol. 157. – P. 106490.

19 **Baigereyev S., Guryanov G.** New method for increase in product fineness in stirred mills // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 19. – P. 768–778.

REFERENCES

1 **Guo W., Gui X., Xing Y., Zhang H., Ma R., Meng W., Luo M.** Study on the unequal-probability comminution of spodumene and feldspar during the grinding process of lithium ore // Powder Technology. – 2023. – Vol. 418. – P. 118776.

2 **Ma S., Yang X., Li H., Li Z., Zhu P., Yang J.** Study on the population balance dynamics simulation of grinding under impact crushing // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – P. 5455.

3 **Daraio D., Villoria J., Ingram A., Alexiadis A., Stitt E. H., Marigo M.** Validation of a Discrete Element Method (DEM) model of the grinding media dynamics within an attritor mill using positron emission particle tracking (PEPT) measurements // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9. – P. 4816.

4 **Wołosiewicz-Głąb M., Pięta P., Foszcz D., Ogonowski S., Niedoba T.** Grinding kinetics adjustment of copper ore grinding in an innovative electromagnetic mill // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8. – P. 1322.

5 **Al Aziz F. A., Masruroh, Fauzy A. I. M., Sakti S. P., Santjojo D. J. D. H.** Rotational speed effect of the planetary ball milling on the particle size and crystal structure of $CaMnO_3$ as a thermoelectric material // In: Proceedings of the II International Scientific and Practical Symposium “Materials Science and Technology” (MST-II-2022). – Melville, NY: AIP Publishing, 2023.

6 **Safa A., Aissat S.** Analyzing the influence of lifter design and ball mill speed on grinding performance, particle behavior and contact forces // Mechanics & Industry. – 2023. – Vol. 24. – P. 37.

7 **Li H., Zhang H., Huang K., Liang D., Zhao D., Jiang Z.** Effect of ball milling speed on the quality of Al_2O_3 stripped graphene in a wet milling medium // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48. – P. 17171–17177.

8 **Piekaj P., Cieplok G.** Experimental tests of the antiresonance vibratory mill of a sectional movement trajectory // Open Engineering. – 2021. – Vol. 11. – P. 1180–1184.

9 **Biliang T., Bo C., Xianzhou S., Haonan J., Yijiang L., Zhaohua W.** Experimental study on the influence of rotational speed on grinding efficiency for the vertical stirred mill // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – P. 1208.

10 **Tong C., Chen Z., Liu C., Xie Q.** Analysis and optimization of the milling performance of an industry-scale VSM via numerical simulations // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 4712.

11 **Megret A., Vitry V., Delaunois F.** High-energy ball milling of WC–10Co: Effect of the milling medium and speed on the mechanical properties // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Vol. 104. – P. 105760.

12 **Wada T., Uematsu T., Shiomi H., Osaki K., Ishihara S., Kano J.** Prediction of power of a vibration rod mill during cellulose decrystallization processing by DEM // Advanced Powder Technology. – 2021. – Vol. 32. – P. 3717–3724.

13 **Riley M., Pinkney S., Blackburn S., Rowson N. A.** Spatial distributions of media kinetic energy as measured by positron emission particle tracking in a vertically stirred media mill // Minerals Engineering. – 2016. – Vol. 98. – P. 177–186.

14 **Altun O., Benzer H., Enderle U.** The effects of chamber and rotor design on dry horizontal stirred mill performance // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 24–28.

15 **Jayasundara C. T., Yang R. Y., Yu A. B., Rubenstein J.** Effect of disc rotation and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill // International Journal of Mineral Processing. – 2010. – Vol. 96. – P. 27–35.

16 **Osborne T., Rhymer D., Werner D., Ingram A., Windows-Yule C. R. K.** Investigating the impact of impeller geometry for a stirred mill using the discrete element method: Effect of pin number and thickness // Powder Technology. – 2023. – Vol. 428. – P. 118810.

17 **Abdelhaffez G. S., Ahmed A. A., Haitham M. A.** Effect of grinding media on the milling efficiency of a ball mill // Mining, Geology & Petroleum Engineering Bulletin. – 2022. – Vol. 38. – P. 171–177.

18 **Shahbazi B., Jafari M., Parian M., Rosenkranz J., Chehreh Chelgani S.** Study on the impacts of media shapes on the performance of tumbling mills – A review // Minerals Engineering. – 2020. – Vol. 157. – P. 106490.

19 **Baigereyev S., Guryanov G.** New method for increase in product fineness in stirred mills // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 19. – P. 768–778.

21.11.25 ж. баспаға түсті.
21.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
23.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

С. Р. Байгереев[1], Г. А. Гурьянов[2], *А. Д. Сулейменов[3], Р. Ғабдысалық[4]
[1,2,4]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
Поступило в редакцию 21.11.25.
Поступило с исправлениями 21.11.25.
Принято в печать 23.11.25.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ СИЛ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В работе рассмотрены особенности процесса тонкого измельчения материалов при различных направлениях и типах силового воздействия. Проведён теоретический анализ четырёх характерных случаев нагружения частицы шарообразной формы мелющими телами: одностороннего, двустороннего и комбинированных воздействий с взаимно перпендикулярными направлениями сил. Для определения теоретической тонкости помола использована математическая модель, основанная на контактной задаче Герца–Штаермана и ранее разработанных авторами зависимостях.

Результаты расчётов показали, что двустороннее воздействие обеспечивает более высокую степень измельчения по сравнению с односторонним при одинаковых скоростях соударения. Это объясняется формированием равномерного напряжённо-деформированного состояния в объёме частицы и более полным использованием энергии удара. В случаях многовекторных воздействий, когда направления сил взаимно перпендикулярны, расчёт выполнялся с учётом равнодействующей скорости, что позволило адекватно оценить суммарное влияние разнонаправленных нагрузок.

Полученные теоретические зависимости могут быть использованы при проектировании энергоэффективных методов тонкого измельчения и создании новых конструкций мельниц, реализующих многовекторные режимы нагружения. Результаты исследования способствуют развитию научных основ энергосбережения в процессах дезинтеграции твёрдых материалов и открывают перспективы для оптимизации промышленных технологий помола.

Ключевые слова: тонкое измельчение, энергия соударения, мелющие тела, одностороннее воздействие, двустороннее воздействие, контакт Герца–Штаермана, энергоэффективность.

S. R. Baigereyev[1], G. A. Guryanov[2], *A. D. Suleimenov[3], R. Gabdyssalyk[4]
[1,2,4]D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 21.11.25.
Received in revised form 21.11.25.
Accepted for publication 23.11.25.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF FORCE DIRECTION ON THE EFFICIENCY OF FINE GRINDING OF MATERIALS

This paper examines the characteristics of fine grinding processes under different directions and types of mechanical impact. A theoretical analysis was conducted for four representative cases of loading a spherical particle by grinding media: one-sided, two-sided, and combined impacts with mutually perpendicular force directions. To determine the theoretical fineness of grinding, a mathematical model based on the Hertz–Shtaerman contact problem and previously developed dependencies was applied.

The calculation results showed that two-sided impact provides a higher degree of grinding compared to one-sided impact at the same collision velocities. This effect is explained by the formation of a more uniform stress–strain state within the particle and by more complete utilization of impact energy. In multivector loading cases, where the directions of forces are mutually perpendicular, the calculations were performed using the resultant velocity, which allowed for an adequate assessment of the combined influence of differently oriented forces.

The obtained theoretical relationships can be used in the design of energy-efficient fine grinding methods and the development of new mill designs that implement multivector loading modes. The results contribute to the advancement of the scientific foundations of energy saving in solid material disintegration processes and provide prospects for optimizing industrial grinding technologies.

Keywords: fine grinding, impact energy, grinding media, one-sided loading, two-sided loading, Hertz–Shtaerman contact, energy efficiency.

SRSTI 55.03.01

https://doi.org/10.48081/BGQF1908

A. S. Berg[1], *O. M. Zharkevich[2], A. A. Berg[3], A. Zh. Altynbayev[4], A. S. Smagulov[5,6]

[1,2,3,4,5]Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda

[6]KazMinerals Bolshakol LLP, Republic of Kazakhstan, Ekibastuz

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0528-640X

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4249-4710

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8907-1803

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1700-7645

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1109-185X

*e-mail: zharkevich82@mail.ru

USING SAND-POLYMER COMPOSITE AS AN ALTERNATIVE TO STEEL PARTS IN BELT CONVEYOR ROLLERS

This article presents a scientific and technical justification for the use of a sand-polymer composite material (SPC) as an alternative to steel for the manufacture of key load-bearing components (shells and barrels) of belt conveyor rollers, particularly those used in the mining industry. To confirm the feasibility of the concept, computer strength modeling of an LKR-1000 roller with SPC elements was conducted, followed by a comparative analysis of the stress-strain state (SSS) with a similar steel structure (S35 steel). For the modeling, the composite shell thickness was assumed to be 10 mm, while the steel shell thickness was 3.5 mm. Calculations were performed with loads varying from 200 to 600 kPa. The results showed that, despite the fact that SPC is a less rigid material and exhibits greater stresses (70 MPa versus 55 MPa for steel at 400 kPa) and displacements (0.64 mm versus 0.097 mm at 400 kPa), its factor of safety (FOS) remains at an acceptable level (FOS ≥ 1.5) for loads up to 600 kPa. At a maximum load of 600 kPa, the FOS for SPC is 1.6. A key advantage is the 37 % reduction in the weight of the roller with composite elements compared to its steel counterpart, which contributes to reduced energy consumption and increased conveyor drive efficiency. The study scientifically substantiates the feasibility of using SPC in conveyor rollers, offering a lighter and more efficient solution for the mining industry.

Keywords: stress, deformation, displacement, shell, roller.

Introduction

The mining industry, particularly coal mining, is a key economic sector requiring continuous optimization of mineral extraction and transportation processes. In this system, the main belt conveyor serves as the primary means of raw material movement, ensuring high productivity and a continuous process cycle [1]. A critical, yet vulnerable, element of conveyor transport, determining its reliability, durability, and operating costs, is the conveyor roller.

The performance and service life of conveyor equipment depend significantly on the condition of the roller supports, which account for up to 90% of all conveyor failures leading to downtime. Rollers are traditionally made of steel due to its high strength and rigidity. However, years of operating belt conveyors in the harsh conditions of mines and quarries - high humidity, aggressive chemical environments, abrasive dust, and significant dynamic loads - have revealed a number of fundamental shortcomings of steel structures [2]. Firstly, steel rollers are heavy. This leads to increased inertial loads when starting and stopping the conveyor, increased energy consumption, and additional stress on drive components. Their heavy weight also complicates the installation, dismantling, and maintenance of rollers, especially in the confined spaces of underground workings, directly impacting occupational safety and downtime [3]. Secondly, steel is susceptible to intense corrosion in the high humidity and aggressive chemical compounds typical of the mining environment. Corrosion quickly destroys both the outer shell (the shell) and internal components (the cup, bearing assembly), significantly reducing the service life of the product [4]. Thirdly, steel shells, when deformed or worn, can create sharp edges, damaging the expensive conveyor belt, resulting in colossal economic losses. Finally, the rotation of thousands of steel rollers is the primary source of noise on conveyor lines, which degrades the sanitary and hygienic working conditions of personnel and requires additional noise insulation measures [5].

Thus, the relevance of this study is dictated by the pressing industrial need to find an alternative, more efficient, and cost-effective solution for roller manufacturing that can eliminate or minimize the key shortcomings of steel rollers. Sand-polymer composite materials are being considered as such an alternative.

Sand-polymer composites (SPCs) are a class of composites that utilize readily available mineral raw materials (e.g., beneficiated waste, quartz sand) as fillers and polymer resins, often derived from recycled materials (polyethylene, polypropylene, polyurethane waste), as binders [6]. This combination provides a number of unique performance characteristics, making SPCs an ideal candidate for replacing steel in conveyor rollers.

The main advantages of SPCs are [7]:

1) Reduced weight and inertia. The density of SPCs is 3-5 times lower than that of steel. This dramatically reduces the inertial moment of the rollers, which, according to dynamic modeling results, leads to a significant (up to 15-20%) reduction in the power consumption of the conveyor in steady-state mode and a reduction in peak loads during start-up. This, in turn, extends the service life of gearboxes and electric motors;

2) High corrosion and chemical resistance. The polymer matrix is completely corrosion-resistant and resistant to aggressive environments, which is critical for underground operation;

3) Improved damping properties and noise absorption. SPCs have a high mechanical loss coefficient. This allows them to effectively absorb vibrations and impact loads that occur during the transportation of large-piece material, reducing noise levels on the conveyor route to regulatory levels;

4) Reduced abrasive wear on the conveyor belt: The surface of the composite shell is smoother and less hard than steel. Even under intense wear, the composite does not form sharp edges, resulting in a significant (up to 25-30%) reduction in wear on expensive rubberized fabric belts.

5) Economic and environmental benefits. The use of recycled polymers and affordable filler reduces production costs compared to steel alternatives, and the lighter weight reduces logistics costs.

The main advantages of SPCs are [7]:

1) Reduced weight and inertia. The density of SPCs is 3-5 times lower than that of steel. This dramatically reduces the inertial moment of the rollers, which, according to dynamic modeling results, leads to a significant (up to 15-20%) reduction in the power consumption of the conveyor in steady-state mode and a reduction in peak loads during start-up. This, in turn, extends the service life of gearboxes and electric motors;

2) High corrosion and chemical resistance. The polymer matrix is completely corrosion-resistant and resistant to aggressive environments, which is critical for underground operation;

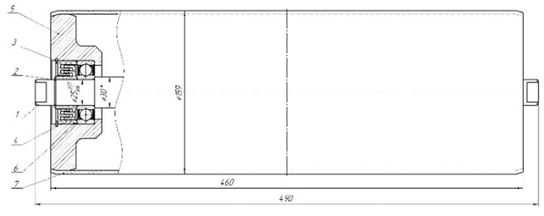
3) Improved damping properties and noise absorption. SPCs have a high mechanical loss coefficient. This allows them to effectively absorb vibrations and impact loads that occur during the transportation of large-piece material, reducing noise levels on the conveyor route to regulatory levels;

4) Reduced abrasive wear on the conveyor belt: The surface of the composite shell is smoother and less hard than steel. Even under intense wear, the composite does not form sharp edges, resulting in a significant (up to 25-30%) reduction in wear on expensive rubberized fabric belts.

5) Economic and environmental benefits. The use of recycled polymers and affordable filler reduces production costs compared to steel alternatives, and the lighter weight reduces logistics costs.

Materials and methods

The roller of the LKR-1000 belt conveyor was selected as the object of study where the sand-polymer composite can be used (Figure 1).



1 – shaft; 2 – protective cover; 3 – ring; 4 – labyrinth seals;
5 – cup; 6 – bearing; 7 – shell

Figure 1 – Roller of the belt conveyor LKR-1000

The algorithm for creating a strength calculation for a belt conveyor roller consists of the following steps:

– creation of a simulation model (Figure 2). When constructing the composite roller model, taking into account the experience of polymer roller manufacturers, the shell thickness was assumed to be 10 mm, and for steel rollers, 3.5 mm;

– selection of material for the roller components. During the simulation, the following materials were used to define the physical properties of the roller components:

a) for the shell and barrel – 1) sand-polymer composite and 2) carbon structural steel C35 (1.0501) (similar to Steel 35). Data for the composite was entered into the program independently according to its properties [8];

b) for the shaft – structural carbon steel AISI1020 (similar to Steel 20);

c) for the bearing – high-carbon alloy steel 1.3505 (similar to ShX15).

– roller fixation. To accurately depict the load distribution on the roller, it is important to secure it properly. To simulate the roller's installation in the roller bearings, the surfaces of the shaft journals were selected (Figure 3);

– load assignment. Based on the analysis of belt conveyor operating experience and the technical characteristics of rollers produced by different manufacturers, the load on a roller depends on its size and design parameters. Thus, for the studied roller model with a diameter of 159 mm, the average load during coal transportation is 2000-3000 N, which corresponds to a normally distributed pressure on the roller surface in contact with the belt of 130–200 kPa [9]. To assess the stress-strain state and perform a comparative analysis, a numerical experiment was performed several times with the load varying from 200 to 1000 kPa (Figure 3);

– mesh creation. The main interest in the calculation is given to the nature of the distribution of stresses and displacements in the shell and nozzles. Therefore, the finest mesh is made at the point of load application on the roller and for the nozzles. For the remaining elements, a coarser mesh is specified to avoid increasing the calculation time (Figure 4);

– calculation of the assigned problem;

– analysis of the obtained results.

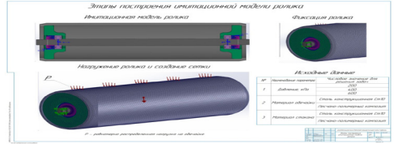


Figure 2 – Simulation model of a belt conveyor roller

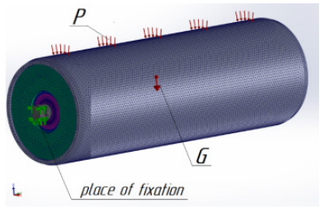


Figure 3 – Setting boundary conditions and creating a mesh

The purpose of the numerical experiment is to prove that the selected sand-polymer composite is suitable for operation under severe operating conditions (coal transportation) in terms of its strength characteristics, while providing a potential reduction in the weight of the unit.

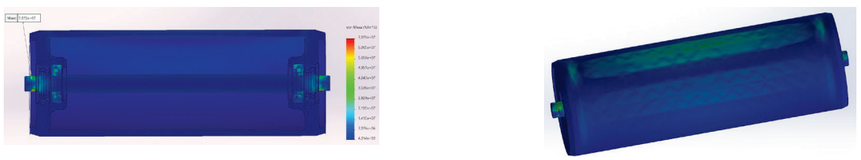
Results and discussion

Computer simulations yielded stress, displacement, and strain distribution diagrams for a sand-polymer composite belt conveyor roller. As an example, Figures 7-10 show the calculation results for a sand-polymer composite roller subjected to a uniformly distributed pressure of P = 400 kPa. It should be noted that when conducting a numerical experiment with a load exceeding 700 kPa, the roller with the proposed material could not withstand the load; the stresses arising in the shell were greater than the material's yield strength. Therefore, a calculation for the SPC roller was performed for loads ranging from 200 to 600 kPa.

An analysis of the roller's stress-strain state shows that the highest stresses occur in the bearing assemblies (65 MPa) and at the shaft attachment points (70.7 MPa). Stresses are also present in the shell, with a magnitude of 14 MPa at the load application point (Figure 4).

Maximum displacement occurs at the load application point on the shell; the displacement is insignificant, amounting to 0.646 mm (Figure 5).

The safety factor for all structural elements is quite high. For the composite shell, it was 2.4 (Figure 6).



a) b)

a) sectional view of the roller; b) general appearance

Figure 4 – Stress distribution diagram in the roller

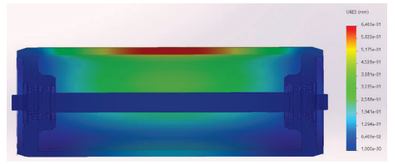


Figure 5 – Displacement diagram in the roller

Figure 6 – Results of calculating FOS

A comparative analysis of the results of calculating the stress-strain state of a roller made of steel and sand-polymer composite is given in Table 1.

Table 1 – Comparative analysis of experimental data

Variable parameter	Material – steel C35			Material - SPC		
Pressure, kPa	Von Mises stressσ, MPa	Displacement h, mm	FOS	Von Mises stressσ, MPa	Displacement h, mm	FOS
200	28	0,049	6	30	0,32	4,8
400	55	0,097	4,2	70	0,64	2,4
600	82	0,14	2,1	105	0,96	1,6

An important role in evaluating the obtained results is played by the safety factor, which is determined by the formula:

$$FOS = \sigma_s/\sigma_{max} \quad (1)$$

where σ_s – yield strength of a material;

σ_{max} – maximum stresses arising in the object of study.

Since the critical value of the safety factor in mechanical engineering is FOS ≥ 1.5 [10], it can be concluded that the SPC for conveyor rollers can be used at loads not exceeding 600 kPa.

Additionally, the stress, displacement, and safety factor dependences of rollers made of steel and sand-composite material on load were determined in 100 kPa increments within the range from 200 to 900 kPa (Figures 7–9).

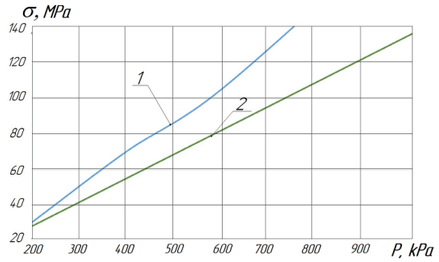


Figure 7 – Dependencies σ = f(P) for roller elements made of sand-polymer composite (curve 1) and C35 steel (curve 2)

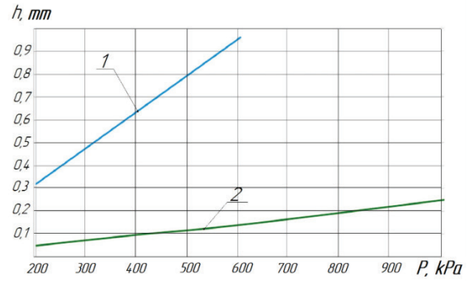


Figure 8 – Dependencies h = f(P) for roller elements made of sand-polymer composite (curve 1) and C35 steel (curve 2)

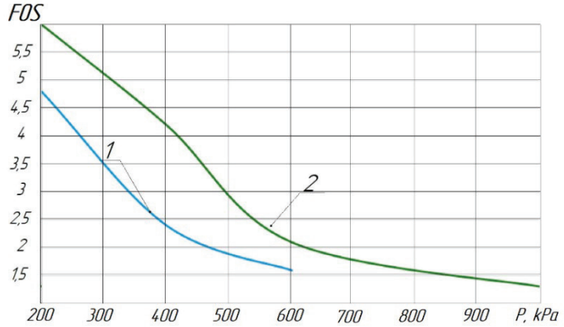


Figure 9 – FOS = f(P) dependencies for roller elements made of sand-polymer composite (curve 1) and C35 (1.0501) steel (curve 2)

The following conclusions can be drawn from the obtained dependencies:

– in shells made of both materials (PPC) and C35 steel, a linear increase in stress (σ) is observed with increasing pressure (P);

– under the same load, the stress in the PPC shell is higher than in the C35 steel shell. For example, at 400 kPa, the stress for steel is 55 MPa, while for PPC it is 70 MPa. This is explained by the lower stiffness of the composite material;

– displacements (h) also increase linearly with increasing load (P) for both materials;

– displacements in the PPC shell are significantly greater than in the steel shell under the same conditions. For example, at a pressure of 400 kPa, the displacement for steel is 0.097 mm, while for PPC it is 0.64 mm (a difference of more than 6 times). This is a direct consequence of the lower stiffness and higher deformation coefficient of PPC compared to steel;

– For both materials, the safety factor (FOS) decreases nonlinearly with increasing applied load (P);

– At design loads of 200 kPa, both the composite and steel shells have high safety factors – 4.75 and 6, respectively;

– As the load increases, the safety factor (FOS) decreases in both cases. The composite shell is inferior to steel in this case, and at loads up to 700 kPa, its value reaches 1.2.It's worth noting that the composite roller weighs 37% less than a steel roller, as follows:

– the weight of a 3.5 mm thick steel shell is 6.262 kg;

– the weight of a steel cup is 3.34 kg;

– the weight of a 10 mm thick composite shell is 5.377 kg;

– the weight of a composite cup is 0.714 kg.

This allows for a significant reduction in the overall weight of the belt conveyor design and, as a result, ensures more efficient operation of the drive with lower power consumption.

Financing information

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant on the topic IRN 27510559 «Modernization of machine-tool equipment of machine-building enterprises with application of composite materials on the basis of additive technologies» 2025-2027).

Conclusions

Based on the analysis of the presented materials, it can be concluded that sand-polymer composites (SPC) offer high potential for use in the manufacture of belt conveyor rollers as an effective alternative to traditional steel structures. This is due to the combination of several key performance characteristics of SPC, which not only match but in many respects surpass those of metal counterparts, especially under specific operating conditions.

In general, steel (C35) exhibits higher rigidity, resulting in lower stresses and, consequently, very small displacements (deformations). Sand-polymer composite (SPC), being less rigid, exhibits higher stresses and, consequently, significantly greater displacements.

However, despite the difference in rigidity, the safety factor is key for operational performance. The fact that the FOS for SPC remains at an acceptable level (FOS ≥ 1.5) under loads up to 600 kPa scientifically substantiates its suitability for use. Thus, although the PPC is more flexible (more displacements), its strength properties remain sufficient for operation in a given range of loads.

REFERENCES

1 **Hamraoui, L., Bergan, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., Neculita, C. M., Benzaazoua, M.** Towards a Circular Economy in the Mining Industry: Possible Solutions for Water Recovery through Advanced Mineral Tailings Dewatering [Text]. Minerals. – 2024. – № 14. – P. 319.

2 **Vasic, M. P., Stojanovic, B., Blagojevic, M.** Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors [Text]. Engineering Failure Analysis – 2020. – 117. – P.104898

3 **Yurchenko, V. V., Smagulov, A. S., Reshetnikova, O. S., Zharkevich, O. M., Mussayev, M. M.** Investigation of Strength of Belt Conveyor Roller Bearing Shells [Text]. Material and Mechanical Engineering Technology. – № 2. – 2025. – P. 80–85.

4 **Zhao, C., Ying, L., Nie, C., Zhu, T., Tang, R., Liu, R.** Investigation of the Corrosion–Wear Interaction Behavior of 8Cr4Mo4V Bearing Steel at Various Corrosion Intervals [Text]. Coatings. – 2024. – 14. – P. 1245

5 **Klimendaa, F., Kampoa, J., Hejmaa, P.** Vibration Measurement of Conveyor Rollers [Text]. Procedia Engineering. – 2016. – P. 198–203.

6 **Slieptsova, I., Savchenko, B., Sova, N., Slieptsov, A.** Polymer sand composites based on the mixed and heavily contaminated thermoplastic waste [Text]. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. -111. – 012027

7 **Dai, C., Jin, Liu, Jing, M., Che, W., Song, Z., Fan, Bu, Feng, Y., Zhu, X.** Polymer-fiber combined effect for improving sand mechanical and micro-damage response [Text].Construction and Building Materials. – 2024. – Volume 432. – P. 136672

8 **Yurchenko, V., Haiduk, V., Skaskevich, A., Zharkevich, O., Zhetessova, G., Reshetnikova, O., Smagulov, A., Mussayev, M.** Study of Deformation and Strength Characteristics of Highly Filled Sand–Polymer Composites Based on Regenerated Thermoplastics [Text]. J. Compos. Sci. – 2025 . – 9. – P. 123–137.

9 **Yurchenko, V. V., Zharkevich, O. M., Reshetnikova, O. S., Zhetessova G. S., Maletkina T. Yu., Smagulov, A. S.** Study of strength of belt conveyor bearing unit housing [Text]. Ugol. – 2025. – 9. – P. 85–89.

10 **Xiaojun W., Qinghe S., Weichao F., Ruixing W., Lei W.** Comparison of the Reliability-based and Safety Factor Methods for Structural Design [Text]. Applied Mathematical Modelling. – 2019. – 72 (2). – P. 33–43.

Received 12.01.26.
Received in revised form 12.01.26.
Accepted for publication 10.02.26.

А. С. Берг[1], * О. М. Жаркевич[2], А. А. Берг[3],
А. К. Алтынбаев[4], А. С. Смагулов[5,6]
[1,2,3,4,5]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[5,6]ЖШС «KazMinerals Bolshakol», Қазақстан Республикасы, Екібастұз қ.
12.01.26 ж. баспаға түсті.
12.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
10.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТАСПАЛЫ КОНВЕЙЕР РОЛИКТЕРІНДЕГІ БОЛАТ БӨЛШЕКТЕРГЕ БАЛАМА РЕТІНДЕ ҚҰМДЫ ПОЛИМЕРЛІ КОМПОЗИТТІ ҚОЛДАНУ

Бұл мақалада таспалы конвейер роликтерінің, әсіресе тау-кен өнеркәсібінде қолданылатын негізгі жүк көтергіш компоненттерін (қабықтар мен бөшкелер) өндіру үшін болатқа балама ретінде құм-полимерлі композиттік материалды (ҚПК) пайдаланудың ғылыми және техникалық негіздемесі ұсынылған. Тұжырымдаманың орындылығын растау үшін ҚПК элементтері бар LKR-1000 роликінің беріктік моделі компьютерлік түрде жүргізілді, содан кейін ұқсас болат құрылымымен (С35 болаты) кернеу-деформация күйінің (КДК) салыстырмалы талдауы жүргізілді. Модельдеу үшін композиттік қабықтың қалыңдығы 10 мм, ал болат қабықтың қалыңдығы 3,5 мм деп есептелді. Есептеулер 200-ден 600 кПа-ға дейінгі жүктемелермен жүргізілді. Нәтижелер көрсеткендей, ҚПК онша қатты емес материал болып табылады және үлкен кернеулерге (400 кПа кезінде болат үшін 70 МПа қарсы 55 МПа) және ығысуларға (400 кПа кезінде 0,64 мм қарсы 0,097 мм) ие болғанына қарамастан, оның қауіпсіздік коэффициенті (FOS) 600 кПа дейінгі жүктемелер үшін қолайлы деңгейде (FOS ≥ 1,5) қалады. 600 кПа максималды жүктеме кезінде ҚПК үшін FOS 1,6 құрайды. Негізгі артықшылығы - болат аналогымен салыстырғанда композиттік элементтері бар роликтің салмағының 37 %-ға төмендеуі, бұл энергия тұтынуды азайтуға және конвейер жетегінің тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Зерттеу конвейер роликтерінде ҚПК қолданудың орындылығын ғылыми тұрғыдан негіздейді, бұл тау-кен өнеркәсібі үшін жеңіл және тиімдірек шешім ұсынады.

Кілтті сөздер: кернеу, деформация, қозғалыс, қабық, ролик.

А. С. Берг[1], * О. М. Жаркевич[2], А. А. Берг[3],
А. К. Алтынбаев[4], А. С. Смагулов[5,6]
[1,2,3,4,5]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[5,6]ТОО «KazMinerals Bolshakol», Республика Казахстан, г. Экибастуз
Поступило в редакцию 12.01.26.
Поступило с исправлениями 12.01.26.
Принято в печать 10.02.26.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕСЧАННО-ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА КАК АЛЬТЕРНАТИВА СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ В РОЛИКАХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

В статье представлено научно-техническое обоснование применения песчано-полимерного композитного материала (ППКМ) в качестве альтернативы стали для изготовления ключевых несущих элементов (обечайки и стакана) роликов ленточных конвейеров, используемых, в частности, в горнодобывающей отрасли. Для подтверждения реализуемости концепции проведено компьютерное прочностное моделирование ролика ЛКР-1000 с элементами из ППКМ, с последующим сравнительным анализом напряженно-деформированного состояния (НДС) с аналогичной стальной конструкцией (сталь С35). При моделировании толщина композитной обечайки была принята 10 мм, а стальной - 3,5 мм. Расчеты выполнялись при варьировании нагрузки от 200 до 600 кПа. Результаты показали, что, несмотря на то, что ППКМ является менее жестким материалом и демонстрирует большие напряжения (70 МПа против 55 МПа для стали при 400 кПа) и перемещения (0,64 мм против 0,097 мм при 400 кПа), его коэффициент запаса прочности (FOS) остается на приемлемом уровне (FOS ≥1,5) для нагрузок до 600 кПа. При максимальной нагрузке 600 кПа, FOS для ППКМ составляет 1,6. Ключевым преимуществом является снижение массы ролика с композитными элементами на 37% по сравнению со стальным аналогом, что способствует уменьшению энергопотребления и повышению эффективности привода конвейера. Исследование научно обосновывает возможность применения ППКМ в роликах конвейеров, предлагая более легкое и эффективное решение для горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: напряжение, деформация, смещение, оболочка, ролик.

МРНТИ 55.22.29

https://doi.org/10.48081/BGQF1909

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

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведены исследования термоинструмента для напыления порошков естественных минеральных сред в зависимости от их свойств. Использовалась горелка ракетного типа. Разработана пористая система охлаждения на основе сетчатых структур и пористых покрытий. Для проведения напыления покрытий применялись сверхзвуковые многофазные высокотемпературные пульсирующие факелы. В исследованиях применялся метод интегральных измерений и голографии. Система охлаждения работает при совместном действие капиллярных и массовых сил. Применялось давление кислорода 1.2÷1.5 МПа, критический диаметр сопла (4÷5)×10-3 м, диаметр камеры сгорания 14×10-3 м. Исследовалось нанесения напылением на вертикальную поверхность на определенной площади пятна растекания и оптимальном расстоянии факела до среза сопла. Установлена структура затопленной струи и ее спиновая детонация в виде участка бочек, вздутии струи на конечном участке и показан разрыв факела на центральном участке. Определена критическая толщина разрушения покрытия и построена эпюра распределения на поверхности покрытия напряжений. Напряжения сжатия являются наибольшими в нагреваемом слое, а по мере удаления от него эти напряжения резко убывают и переходят в напряжения растяжения, достигают некоторого максимума и затем убывают.

Ключевые слова: термоинструмент, напыление, порошки, природные материалы, покрытия, камера сгорания.

Введение

Для создания термоинструмента для напыления порошков использовалась горелка ракетного типа, из которой истекает высокотемпературная сверхзвуковая многофазная детонационная пульсирующая струя. Камеры сгорания и сопло горелки нуждаются в форсированной системе охлаждения.

Для охлаждения горелки разработана пористая сетчатая система, работающая при совместном действии капиллярных и массовых сил [1]. Избыток холодоносителя позволяет управлять теплотехническими характеристиками системы охлаждения. С помощью скоростной киносъёмки изучались внутренние

характеристики кипения жидкости [2]. Однако данная горелка нуждалась в дальнейшем форсированном теплоотводе.

Исследовалось [3] медное покрытие толщиной (19, 26, 33, 41 и 60)×10-6 м под атмосферным давлением насыщенной воды на обогреваемых трубках. Интенсификация теплообмена имела место до некоторого оптимального значения толщины покрытия. Однако в случае образования пузырьков наступал предельный теплообмен.

Применялось покрытие из медной сетки, изготовленное спеканием [4]: при образовании пузырьков, как и в [3], наступал кризис теплообмена в зависимости от толщины покрытия, пористости и гидравлического размера пор покрытия.

Изучена теплопередача испарением жидкости в спеченных медных покрытиях [5]. Как и в работах [3; 4] обнаружен предельный теплообмен, но путем решения двумерной задачи при численном моделировании без экспериментального подтверждения.

В сетчатом покрытии [6] при действии только капиллярных сил в случае закипания жидкости наступало предельное состояние. Сильное влияние оказывала величина размера пор, тогда как пористость почти не влияла на кризис. Однако влияние массовых сил не рассматривалось.

Исследовались структурированные покрытия при кипении в большом объёме воды под атмосферным давлением [7]. Максимальный тепловой поток достигал 2.5×105 Вт/м2 для канавчатого покрытия под углом 60 градусов, что явно недостаточно для форсированных режимов теплообмена.

Интенсифицировали теплообмен в микропористых покрытиях диэлектрической жидкости для кремневого чипоподобного нагревателя, причем коэффициент теплоотдачи увеличивался за счет переохлаждения всего на 60%, а затем наступал кризис кипения [8].

В работе [9] увеличение теплообмена достигалось за счет переохлажденной воды под атмосферным давлением в кипящем потоке на поверхности покрытия, причем оно имело место на 25 % большее для микропористых покрытий из окиси алюминия с размером пор менее 10×10^{-6} м и толщиною 50×10^{-6} м, чем с нанопористыми покрытием. Причиной кризиса явилось образование пузырьков в порах покрытия.

Увеличился вдвое теплообмен [10] за счет применения кипящего ядра потока жидкости на тонкопленочных никелевых покрытиях наночастиц кремнезема.

Таким образом, в работах [3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10] в покрытиях наступало предельное состояние даже при умеренных тепловых нагрузках за счет закупорки пузырьками пор покрытий несмотря на то, что использовался недогрев и повышенная скорость ядра потока. Не использовались другие поля в комбинации с капиллярными силами, не изучался механизм поведения пузырей в порах покрытия [2]. В качестве покрытий применялись металлы и их сплавы [11]. Не рассматривались природные материалы для покрытий, например естественные минеральные среды [1].

Цель настоящего исследования – разработка термоинструмента в виде ракетной горелки для напыления порошков природных материалов и изучение теплообмена и прочности полученных покрытий.

Материалы и методы

Детонационная керосино-кислородная горелка в работе представлена на рис. 1: взаимодействие струи с гранитной поверхностью 1, выбрасываемая из калибратора вода 2 на поверхность породы имеет технологическое значение. Диаметр камеры сгорания – 14×10^{-3} м, критический диаметр сопла – 4×10^{-3} м.

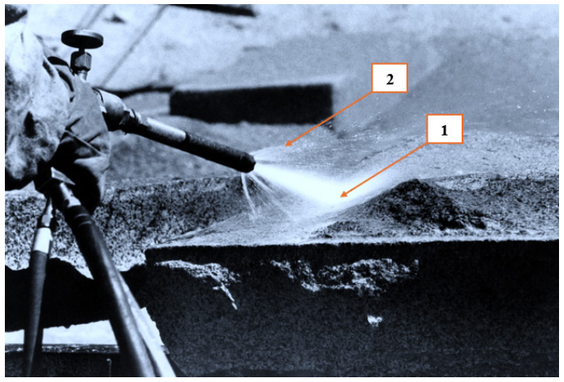


Рисунок 1 – Термоинструмент

Схема питания горелки – вытеснительная (вода из баллона вытеснялась воздухом) [1]. Горючее – керосин. Окислитель – кислород. Система охлаждения – вода, пористые покрытия. Также применялась насосная система (вода и горючее из баков нагнетались насосом) [2]. Режимы нанесения покрытий осуществлялись при следующих параметрах горелки: расход кислорода $G_{кис}$ до 18 нм^3/час, расход керосина $G_{кер}$ до 12 л/час. Давление кислорода – 1.2÷1.5 МПа. Критический диаметр сопла $d_к = (4\div5)\times10^{-3}$ м, диаметр камеры сгорания $d_{к.с.} = 14\times10^{-3}$ м (см. рис. 2, 3). На рис. 2 представлено нанесение напылением факелом термоинструмента на вертикальную поверхность 1. Вода 2 имеет технологическое значение. Система охлаждения 3 горелки – комбинированная.

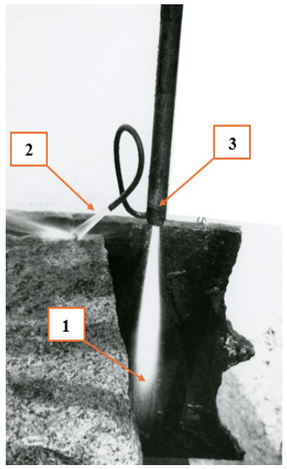


Рисунок 2 – Процесс нанесение покрытия напылением

На рис. 3 представлено взаимодействие факела 1 с поверхностью покрытия 2 под углом на площади пятна растекания и оптимальном расстоянии от среза сопла.

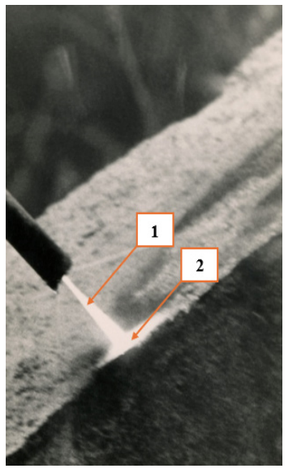


Рисунок 3 – Взаимодействие факела 1 с поверхностью покрытия 2

Зависимости для q и τ имеют экспериментальное подтверждение. Тепловые потоки q струи горелки измерялись датчиком из медного цилиндра [2]. Время процесса τ и размер оторвавшейся частицы δ измерялись скоростной кинокамерой СКС-1М.

Гранулометрический состав «шелухи» $(0.1 \div 0.5) \times 10^{-3}$ м (см. рис. 4). Пределы изменения тепловых потоков от факела горелки в покрытие составляли

$(2 \times 106 \div 2 \times 107)$ Вт/м^2. Продукты разрушения капиллярно-пористого покрытия имеют вид чешуеобразных частиц, форма и размер которых определяется физико-механическим свойствами породы, газодинамическими параметрами теплового потока и конструкций сопла.

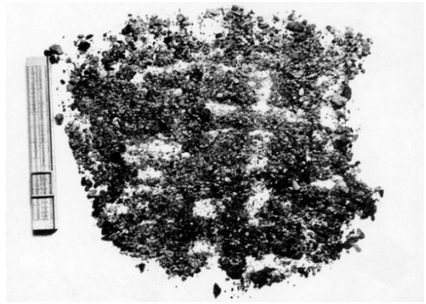


Рисунок 4 – Продукты разрушения гранитной породы керосино-кислородной горелкой (см. рис. 1) в виде гранулометрического состава порошка

Опыты проводились с Коунрадскими кварцитами [12]. Набор сит (крупность буровых частиц) составлял: 1; 0.5; 0.25; 0.1; 0.07; 4×10^{-3} м. Ему отвечал выход частиц по весу в %: 9.4; 6.6; 4.4; 3.6; 2.3. Средняя толщина частиц равнялась для набора сит, 10-3 м: +1.0; +0.5; +0.25 соответственно: +0.54; +0.29; +0.11.

Средние линейные размеры, в 10^{-3} м, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Средние линейные размеры

Ширина	+1.0	+0.5
	+1.54	+0.7
Длина	+2.31	+1.1

Результаты и обсуждение

Регулирование теплообменом на поверхности покрытия осуществлялось длиной струи горелки, истекающей из сопла (см. рис. 5), на котором зарегистрирована спиновая детонация [13] по длине факельной струи в виде участков «бочек» 2 [14], причем обнаружено вздутие струи на конечном участке 3 и разрыв факела 4 на центральном участке.

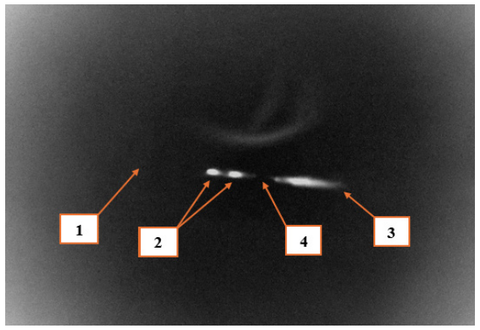


Рисунок 5 – Структура затопленной струи 1 и спиновая детонация 2

Определены предельные тепловые потоки плавления, напряжений и отвечающие им тепловые потоки, которые зависели от теплофизических свойств материала, времени воздействия теплового источника, размера оторвавшейся частицы (порошка) или глубины проникновения тепловой волны в облучаемый материал.

Существует аналогия процесса разрушения для хрупких материалов (естественные минеральные среды) и металлов [15]. Аналогия процесса разрушения различных материалов вытекает из следующих соображений. Скорость разрушения ϑ капиллярно-пористого покрытия:

$$\vartheta = \frac{q}{c \cdot \rho \cdot \Delta t}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где $\Delta t = t_{ст} - t_{раз}$; q – тепловая нагрузка, Вт/м^2; c – теплоемкость капиллярно-пористого покрытия, Дж/(кг·К); ρ – плотность капиллярно-пористого покрытия, кг/м^3; Δt – температурный напор, К (°С).

Увеличение ϑ (1) при уменьшении Δt связано с тем, что при нагревании покрытия температура на поверхности $t_{ст}$ и на внешней поверхности разрушаемого слоя $t_{раз}$ в результате интенсивного подвода тепла q становятся близкими. Это способствует объёмному разрушению покрытия и разрушению слоя определенной толщины.

Температура поверхности нагрева кварца и кварцсодержащих пород должна быть не более 1350 °С, так как при температуре (1200÷1350) °С α – кварц переходит в α – кристобалит в отсутствие плавления быстро и с увеличением объёма на + 17.4 %.

Другая фаза превращения – это переход при 870 0С α - кварца в α – тридимит, но это дает объёмное расширение на + 12.7 %. Максимальная скорость разрушения будет иметь место при = (100÷200) °С, q > (2÷3)×106 Вт/м^2, и составляет для кварца (5÷15) м/час для ρ = (2500÷2700) кг/м^3 и = (1÷1.2) кДж/(кг·К).

На рис. 6 представлены фотоснимки покрытия из гранита через каждые 6 с после начала нагрева одновременно тремя источниками суммарной мощностью 7 Вт. Опыты проводились на голографическом стенде [16] согласно применяемому стандарту [17].

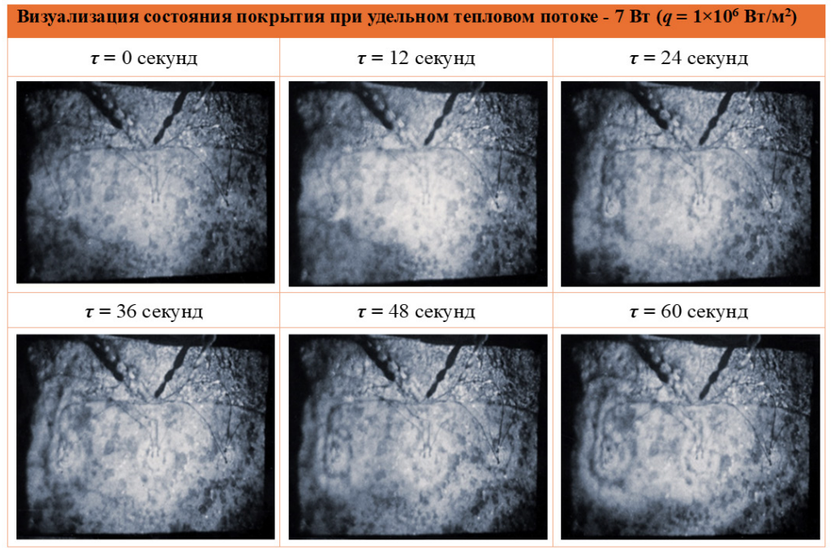


Рисунок 6 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из гранита

Проведем оценку высокоинтенсивной системы охлаждения. Предельные области тепловых нагрузок для капиллярно-пористых покрытий из естественных минеральных сред имеют значения: тешенитные покрытия – (2.1÷4)×10^6 Вт/м^2, гранитные покрытия – (4÷6)×10^6 Вт/м^2 и кварцевые покрытия – (6.2÷15)×10^6 Вт/м^2. Тепловые нагрузки находились в зоне перегрева поверхности относительно температуры насыщенного водяного пара ΔT = T$_{ст}$ – T$_н$ = (20÷75) К.

При воздействии факела ракетной горелки, имеющего параметр $T = T(\frac{z}{h}; t)$,

на капиллярно-пористое покрытие, согласно рис. 1, 3, частицы покрытия, близлежащие к поверхности нагрева по теории термоупругости [1, 3, 15], будут находиться в сложном напряженном состоянии (см. рис. 6). Они испытывают одновременно действие деформации сжатия, растяжения и изгиба и согласно рис. 6 можно представить эпюру распределения напряжений в виде рис. 7. Для описания механизма теплоотдачи α и разрушающих напряжений σ_{xx}, σ_{yy} (2) эффективно использовать безразмерную величину теплоотдачи $\frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$.

Напряжения σ определяются согласно [15]:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\alpha E}{(1-\upsilon)} T\left(\frac{Z}{h}; t\right) + \frac{1}{(1-\upsilon)2h}\int_{-h}^{+h} \alpha E T\left(\frac{Z}{h}; t\right) dZ, \qquad (2)$$

где первый член – составляющая напряжения сжатия, а второй – растяжения; α – температурный коэффициент линейного расширения; E – модуль Юнга; υ – коэффициент Пуассона; T – температура; t – время. Произведение αE не зависит от температуры, и выражение для напряжения растяжения упрощается.

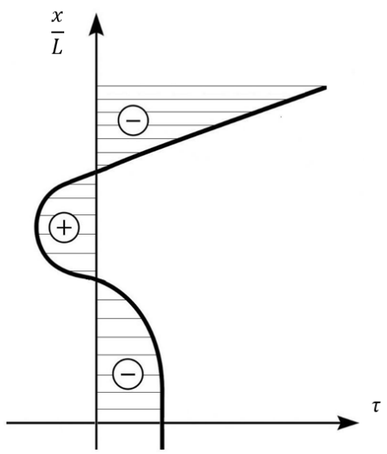


Рисунок 7 – Эпюра распределения напряжений сжатия и растяжения в нагреваемом слое капиллярно-пористого покрытия

Задаваясь предельными значениями напряжений для капиллярно-пористого покрытия, получаем функциональную зависимость теплового потока q, достаточного для разрушения, от времени воздействия и глубины проникновения теплоты h [15].

Напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ являются наибольшими в нагреваемом слое (см. рис. 7). По мере удаления от нагреваемого капиллярно-пористого покрытия (l растет) эти напряжения резко уменьшаются, переходят в напряжения растяжения $\sigma_{раст}$, достигают на некотором расстоянии своего максимума и затем убывают, т.е. критерий $\frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ (число Нуссельта) возрастает. Здесь α – коэффициент теплоотдачи; l – расстояние от факела до капиллярно-пористого покрытия; λ – коэффициент теплопроводности покрытия.

Для материала капиллярно-пористого покрытия с теплопроводностью λ и при теплоотдаче α существует минимальная толщина слоя. Если толщина материала менее величины L (расчетная толщина разрушаемого материала), то в материале не

возникают сразруш шелушением. Критическая толщина $l_{кр}$ составляет несколько миллиметров (определялось по рис. 6, 7).

Рисунок 7 строился на основе расчета предельных напряжений сжатия и растяжения, которые приведены в работе [15], также в работе изложен механизм процесса разрушения поверхности. Расчетная толщина разрушаемого капиллярно-пористого покрытия – это участвующий в деформации слой породы за время возникновения в нем разрушающих напряжений, которая зависит от свойств покрытия и от параметров струи.

При больших q (Q) (см. рис. 6) и в нагреваемом слое мгновенно возникают σ, очень быстро достигающие максимальных значений. Затем они быстро уменьшаются, стремясь к нижнему пределу (см. рис. 7) и [1].

Итак, на нагреваемой поверхности возникают наибольшие напряжения сжатия. Они уменьшаются с удалением от поверхности, переходят в напряжения растяжения, которые увеличиваются, достигают своего максимума, а затем опять уменьшаются, переходя в малые напряжения сжатия на большой глубине (см. рис. 7) и [1]. При высоких q (см. рис. 6) разрушение капиллярно-пористого покрытия может произойти вследствие выкрашивания или от напряжений сдвига, вызванных сжатием. Разрушение капиллярно-пористого покрытия обычно происходит откалываем частиц от их поверхности (см. рис. 1).

Сечения, в которых возникают $\sigma_{раст}^{max}$, лежат на расстоянии 0.2÷0.3 расчетной толщины от нагреваемой поверхности, что зависит от τ и λ.

При $\frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = 1$, $\frac{\sigma_р}{\sigma_{сж}} = 0.52$, а при $\frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = 20 \rightarrow \frac{\sigma_р}{\sigma_{сж}} = 0.3$. В слое капиллярно-пористого покрытия должны возникать достаточные разрушающие его напряжения за время τ, равное или меньшее, чем необходимо для возникновения максимального возможного в данных условиях напряжения [2],

т.е. $\tau_{сж}^{раз} \leq \tau_{сж.max}^{раз}$; $\tau_{рас}^{раз} \leq \tau_{рас.max}^{раз}$.

Величины q и α должны быть такими, чтобы напряжения в слое a, следовательно, и его разрушение возникали раньше, чем будут достигнуты предельные возможные напряжения (см. рис. 6).

При росте q и α необходимо учитывать, что происходит запаздывание возникновения $\sigma_{раст.max}$ относительно начала нагрева поверхности, иначе для вязких капиллярно-пористых покрытий (например туф [1]) может возникнуть преждевременное плавление материала.

Выводы

Впервые разработан термоинструмент для напыления порошков природных минеральных сред с использованием детонационного сверхзвукового высокотемпературного факела, что открывает новые возможности в создании высокопрочных покрытий.

Научная новизна работы заключается в сочетании сетчатых и порошковых структур в составе покрытий, что обеспечивает их комплексные функциональные свойства.

Механизмы теплопередачи были изучены с использованием уникального сочетания методов: голографии, высокоскоростной киносъемки, теории термоупругости и интегрального эксперимента. Это обеспечило высокую степень точности и новизны анализа. Предложенный метод голографии позволил экспериментально выявить механизмы деформации и разрушения, за счет новой системы охлаждения можно прогнозировать и уменьшать вероятность возникновения и развития трещин.

Определена критическая толщина разрушения покрытия и построена эпюра распределения напряжений сжатия и растяжения, что важно для прогнозирования долговечности конструкций.

Актуальность работы состоит в создании системы охлаждения, способной отводить повышенные тепловые нагрузки, что значительно расширяет область применения разработанных покрытий в энергетике и машиностроении.

Будущие исследования должны быть направлены на дальнейшее изучение теплопередающих свойств покрытий на основе природных материалов таких как кварциты, граниты, тешениты, мраморы и туфы.

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 **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.

3 **Mohammad, S. A.** Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2008. – Vol. 47(1). – P. 159–167. – https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.07.021.

4 **Li, C.** Evaporation / Boiling in Thin Capillary Wicks (l) – Wick Thickness Effects. Journal of Heat Transfer. – 2006. – Vol. 128(12). – P. 1312–1319. – https://doi.org/10.1115/1.2349507.

5 **Hanlon, M. A.** Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media. Journal of Heat Transfer. – 2003. – Vol. 125(4). – P. 644–652. – https://doi.org/10.1115/1.1560145

6 **Li, C.** Evaporation / Boiling in Thin Capillary Wicks (ll) – Effects of volumetric porosity and mesh size. Journal of Heat Transfer. – 2006. – Vol. 128(12). – P. 1320–1328. – https://doi.org/10.1115/1.2349508.

7 **Das, A. K.** Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling. Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29(17–18). – P. 3643–3653. – https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.06.020.

8 **Mehmet, A.** Enhancement of pool boiling critical heat flux in dielectric liquids by microporous coatings. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50(5–6). – P. 997–1009. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.005.

9 **Mohammad, S. S.** Subcooled flow boiling CHF enhancement with porous surface coatings. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50(17–18). – P. 3649–3657. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.011.

10 **Forrest, E.** Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53(1–3). – P. 58–67. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.008.

11 **Arkhipov, V., Moskvitin, G., Pugachev, M., Severov, P.** Features of the formation process of brass coating by gas-dynamic deposition of copper and zinc particles. Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 20. – P. 124–129. – https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.127.

12 **Shen, P., Pan, H., Seitmuratova E.** Petrogenesis of the mineralized granitoids from the Kounrad and Borly porphyry Cu deposits and the East Kounrad porphyry Mo deposit in Kazakhstan: Implication for tectonic evolution and mineralization of the western part of the Central Asian Orogenic Belt. Lithos. – 2017. – Vol. 286–287. – P. 53–74. – https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.06.006.

13 **Дейч, М. Е.** Техническая газодинамика. – М. : Энергия, 1974. – 592 с.

14 **Юдаев, Б. Н.** Техническая термодинамика. Теплопередача. – Москва. : Высшая школа, 1988. – 479 с.

15 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Y.** Limiting thermal state of capillary-porous power-plant components. Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. – P. 384–389. – https://doi.org/10.3103/S1068798X20050093.

16 **Генбач А. А, Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я.** Оптические методы исследования динамики процессов тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых структурах. Надежность и безопасность энергетики. – 2025. – Т. 18. – № 4. – С. 297–304. – https://doi.org/10.24223/1999-5555-2025-18-4-297-304

17 Голография и ее применение / Дж. Батерс; пер. с англ. А. С. Тюфлина. – М. : Энергия, 1977. – 223 с. Пер. изд.: Holography and its technology / J. Butters. – London, 1971.

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 **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.

3 **Mohammad, S. A.** Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2008. – Vol. 47(1). – P. 159–167. – https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.07.021.

4 **Li, C.** Evaporation / Boiling in Thin Capillary Wicks (l) – Wick Thickness Effects. Journal of Heat Transfer. – 2006. – Vol. 128(12). – P. 1312–1319. – https://doi.org/10.1115/1.2349507.

5 **Hanlon, M. A.** Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media. Journal of Heat Transfer. – 2003. – Vol. 125(4). – P. 644–652. – https://doi.org/10.1115/1.1560145

6 **Li, C.** Evaporation / Boiling in Thin Capillary Wicks (ll) – Effects of volumetric porosity and mesh size. Journal of Heat Transfer. – 2006. – Vol. 128(12). – P. 1320–1328. – https://doi.org/10.1115/1.2349508.

7 **Das, A. K.** Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling. Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29(17–18). – P. 3643–3653. – https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.06.020.

8 **Mehmet, A.** Enhancement of pool boiling critical heat flux in dielectric liquids by microporous coatings. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50(5–6). – P. 997–1009. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.005.

9 **Mohammad, S. S.** Subcooled flow boiling CHF enhancement with porous surface coatings. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50(17–18). – P. 3649–3657. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.011.

10 **Forrest, E.** Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53(1–3). – P. 58–67. – https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.008.

11 **Arkhipov, V., Moskvitin, G., Pugachev, M., Severov, P.** Features of the formation process of brass coating by gas-dynamic deposition of copper and zinc particles. Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 20. – P. 124–129. – https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.127.

12 **Shen, P., Pan, H., Seitmuratova E.** Petrogenesis of the mineralized granitoids from the Kounrad and Borly porphyry Cu deposits and the East Kounrad porphyry Mo deposit in Kazakhstan: Implication for tectonic evolution and mineralization of the western part of the Central Asian Orogenic Belt. Lithos. – 2017. – Vol. 286–287. – P. 53–74. – https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.06.006.

13 **Dejch, M. E.** Texnicheskaya gazodinamika [Technical Gas Dynamics]. – M. : E`nergiya, 1974. –592 p.

14 **Yudaev, B. N.** Texnicheskaya termodinamika [Technical Thermodynamics]. Teploperedacha. –M. : Vy`sshaya shkola, 1988. – 479 p.

15 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Y.** Limiting thermal state of capillary-porous power-plant components. Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40. – P. 384–389. – https://doi.org/10.3103/S1068798X20050093.

16 **Genbach, A. A, Bondartsev, D. Yu., Shelginskij, A. Ya.** Opticheskie metody` issledovaniya dinamiki processov teplo- i massoperenosa v kapillyarno-poristy`x strukturax [Optical Methods for Studying the Dynamics of Heat and Mass Transfer Processes in Capillary-Porous Structures]. Nadezhnost` i bezopasnost` e`nergetiki. – 2025. – Vol. 18. – № 4. – P. 297–304. – https://doi.org/10.24223/1999-5555-2025-18-4-297-304

17 Golografiya i ee primenenie [Holography and Its Applications] / Dzh. Baters; per. s angl. A. S. Tyuflina. – M. : E`nergiya, 1977. – 223 p. – Per. izd.: Holography and its technology / J. Butters. – London, 1971.

Поступило в редакцию 20.01.26.
Поступило с исправлениями 30.01.26.
Принято в печать 02.03.26.

А. А. Генбач[1], *Д. Ю. Бондарцев[2]
[1,2]Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
20.01.26 ж. баспаға түсті.
30.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҰНТАҚ ТӘРІЗДІ ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДЫ БҮРКУГЕ АРНАЛҒАН ТЕРМИЯЛЫҚ ЖАБДЫҚ

Табиғи минералдық орталардың қасиеттеріне байланысты ұнтақтарды бүркуге арналған термиялық құралға зерттеу жүргізілді. Зымыран түріндегі жанарғы қолданылды. Торлы құрылымдар мен кеуекті жабындарға негізделген кеуекті салқындату жүйесі жасалды. Жабындарды бүрку үшін аса жоғары температуралы, көп фазалы, дыбыс жылдамдығынан асатын импульстік алаулар қолданылды. Зерттеулерде интегралды өлшеу әдісі және голография пайдаланылды. Салқындату жүйесі капиллярлық және масса күштерінің бірлескен әсері арқылы жұмыс істейді. Оттегінің қысымы 1.2–1.5 МПа аралығында, саптаманың критикалық диаметрі (4–5)×10⁻³ м, жану камерасының диаметрі 14×10⁻³ м болды. Тік бетке бүрку жұмыстары бүрку дағының белгілі бір ауданында және алаудың саптама ұшынан оңтайлы қашықтығында жүргізілді. Батып кеткен ағын құрылымы мен оның айналмалы детонациясы, бөшке тәрізді аймақтары, соңғы бөлігіндегі ағынның кеңеюі және орталық бөлігінде алаудың үзілуі анықталды. Қаптаманың сыну критикалық қалыңдығы анықталды және қаптама бетіндегі кернеулердің таралу эпюрасы салынды. Қысу кернеулері ең жоғары мәнге қыздырылған қабатта ие болып, одан алыстаған сайын күрт төмендеп, созылу кернеулеріне ауысады; олар белгілі бір максимумға жетіп, кейін төмендейді.

Кілтті сөздер: термиялық құрал, бүрку, ұнтақтар, табиғи материалдар, жабындар, жану камерасы.

***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 20.01.26.
Received in revised form 30.01.26.
Accepted for publication 02.03.26.

THERMAL SPRAYING EQUIPMENT FOR POWDERED NATURAL MATERIALS

Studies were conducted on a thermal spraying tool for applying powders derived from natural mineral media, depending on their properties. A rocket-type burner was used. A porous cooling system based on mesh structures and porous coatings was developed. Supersonic multiphase high-temperature pulsating jets were used for the coating process. The research employed integral measurement methods and holography. The cooling system operates under the combined action of capillary and mass forces. Oxygen pressure in the range of 1.2–1.5 MPa was applied, with a critical nozzle diameter of (4–5)×10⁻³ m and a combustion chamber diameter of 14×10⁻³ m. Spraying on vertical surfaces was investigated with respect to the defined spray spot area and the optimal distance from the nozzle exit to the torch. The structure of the submerged jet and its spin detonation were identified, including barrel-shaped sections, jet swelling in the terminal region, and disruption of the torch in the central area. The critical failure thickness of the coating has been determined, and a stress distribution diagram on the coating surface has been constructed. Compressive stresses were found to be highest in the heated layer, sharply decreasing with distance and transitioning into tensile stresses, which reached a maximum and then declined.

Keywords: thermal tool, spraying, powders, natural materials, coatings, combustion chamber.

МРНТИ 55.09.91
https://doi.org/10.48081/BGQF1910

***В. Ю. Куликов*[1], *Св. С. Квон*[2], **А. М. Сапиянова*[3]**
[1,2,3]Карагандинский технический университет
имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6191-8569
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5439-4426
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3601-803X
*e-mail: Tsum2013@icloud.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ДВУСЛОЙНОМ ПОКРЫТИИ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

В статье представлены результаты комплексных экспериментальных и аналитических исследований, направленных на повышение эксплуатационных характеристик и долговечности стальных деталей за счёт нанесения двухслойных газотермических покрытий. Нижний слой выполняет демпфирующую функцию и состоит из медно-алюминиевого сплава в соотношении 4:1, обеспечивающего высокую адгезию покрытия к подложке, снижение остаточных напряжений и повышение термической совместимости материалов. Верхний слой представлен карбидом титана, формирующим плотную, прочную, износо- и термостойкую поверхность. Применение метода газотермического напыления позволило получить покрытия с равномерным распределением частиц, высокой плотностью структуры и минимальной пористостью. Детальные исследования микроструктуры и фазового состава выявили образование мелкозернистой структуры с включениями карбидов, нитридов и оксидов титана, которые комплексно упрочняют поверхность и повышают её сопротивляемость внешним воздействиям. Анализ механических свойств показал значительное увеличение твёрдости, прочности сцепления и коррозионной стойкости по сравнению с необработанными образцами. Полученные результаты подтверждают эффективность разработанной технологии и её практическую значимость для восстановления, защиты и продления срока службы деталей машин, работающих в условиях повышенных нагрузок, трения, высоких температур и агрессивных сред.

Ключевые слова: Газотермическое напыление, порошки, долговечность, твердость, прочность, износостойкость.

Введение

Как известно, для увеличения срока эксплуатации деталей достаточно увеличить стойкость поверхностного слоя, что удешевляет себестоимость детали. Известно, что газопламенное напыление включает в себя нагревание, плавление, диспергирование расплава и перенос расплавленных частиц пламени материала на металлическую поверхность детали, на котором формируется

стабильное непрерывное покрытие. Предлагается, в качестве материала покрытия использовать порошки карбида титана, которые будут обеспечивать формирование износостойкого, жаростойкого и коррозионностойкого покрытия [1; 2].

Низкие эксплуатационные показатели изделий и оборудования в целом имеют место на ряде предприятий, как в нашей стране, так и на зарубежном производстве. Это свидетельствует о том, что увеличение срока службы деталей является актуальной задачей, которая имеет большое практическое значение и хорошие перспективы для дальнейшей коммерциализации [3].

Современным направлением повышения эксплуатационных свойств сталей является нанесение покрытий, поскольку они являются относительно дешевыми [4; 5].

Вопросам подготовки поверхности подложки для нанесения покрытий газопламенным методом посвящена работа [6]. Использование покрытий из высокоэнтропийных сплавов способствует повышению механических свойств [7].

Так, например, для деталей, к которым выдвигаются требования по износостойкости, прочности, твердости (броня, зубья ковшей, кулаки и др.). обычно используются стали, которые относятся к перлитному классу, а, именно, в их микроструктуре содержатся легированные α-раствор и перлит, которые включают в себя смешанные карбиды цементитного типа Me_3C, где в качестве Me могут выступать железо и хром. Также структура может включать в себя карбиды типа VC, TiC, что определяется наличием тех или иных легирующих элементов [8; 9].

Такие микроструктуры показывают твердость порядка 350–500 единиц твердости по Бринеллю. Такие повышенные показатели твердости обеспечиваются высоким металлургическим качеством сталей (при использовании специальных методов выплавки, например, электрошоковым переплавом) и дальнейшим применением упрочняющих термообработок, обычно это закалка и низкий отпуск [10; 11].

Предлагаемое к разработке защитное покрытие представляет собой композиционное покрытие, состоящее из двух слоев – слоя карбида титана и слоя демпфирующего сплава. Как известно, карбид титана – это высокотемпературное соединение с температурой плавления – 3140 °С, обладающее высокой твердостью, при этом оно химически инертное. Карбид титана показывает высокую износостойкость, что определяет его широкое использование как покрытия либо основного материала для изделий, которые эксплуатируются в условиях абразивного износа. Основным недостатком карбида титана являются его хрупкость и сложности при его обработке [12; 13].

Для демпфирующих материалов планируется применять сплавы, обладающие демпфирующими свойствами с такой основой, как алюминий, медь и др. [14; 15] Применение таких материалов для покрытий будут способствовать равномерному распределению энергии удара для деталей, работающих в условиях ударных нагрузок (молоты, шары и др.) [16; 17].

Материалы и методы

Для проведения исследований был выбран полнофакторный эксперимент типа n^k. Здесь n – число факторов, k – количество уровней, на которых варьируются значения факторов.

В качестве функции отклика Y была выбрана износостойкость, %.

Основные варьируемые факторы:

X_1 – содержание TiC, %;

X_2 – содержание Cu-Al, %;

X_3 – температура нагрева частиц порошка, °С.

Условия проведения эксперимента и матрица планирования эксперимента приведены соответственно в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики эксперимента

Характеристика	X_1	X_2	X_3	Кодовые обозначения
Основной уровень	40	50	60	0
Верхний уровень	60	50	40	+1
Нижний уровень	1000	1100	1200	-1

В итоге, была использована шестифакторная матрица экспериментов на пяти уровнях, в которой три фактора – вакантные.

В таблице 2 приведены факторы эксперимента по содержанию легирующих элементов и давление прессования и их численные значения.

Таблица 2 – Факторы эксперимента по содержанию легирующих элементов и давление прессования

Факторы		Уровни факторов				
1		2	3	4	5	
X_1	Содержание TiC, %	40	50	60	70	80
X_2	Содержание Cu-Al, %	20	30	40	50	60
X_3	Температура нагрева частиц порошка, °С	1000	1050	1100	1150	1200
X_4	Вакантный фактор	1	2	3	4	5
X_5	Вакантный фактор	1	2	3	4	5
X_6	Вакантный фактор	1	2	3	4	5

План 6-факторного эксперимента в 5 уровнях представлен в таблице 3.

Таблица 3 – План 6-факторного эксперимента в 5 уровнях

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Износостойкость, %	Коррозионная стойкость, %	Предел прочности на сжатие, МПа
40	20	1000	1	1	1	79,4	93,1	710
40	40	1100	3	3	3	79,7	93,3	718
40	30	1050	2	2	2	79,5	93,3	714
40	60	1200	5	5	5	83,4	94,5	727
40	50	1150	4	4	4	82,5	94,3	722
60	20	1100	2	5	4	89,2	95,0	720
60	40	1050	5	4	1	90,1	95,2	726
60	30	1200	4	1	3	89,7	95,0	722
60	60	1150	1	3	2	90,5	95,5	734
60	50	1000	3	2	5	90,3	95,4	729
50	20	1050	4	3	5	84,7	94,6	711
50	40	1200	1	2	4	85,5	94,6	718
50	30	1150	3	5	1	84,9	94,3	715
50	60	1000	2	4	3	85,8	94,8	728
50	50	1100	5	1	2	85,6	94,7	726
80	20	1200	3	4	2	92,5	96,8	714
80	40	1150	2	1	5	92,8	96,9	721
80	30	1000	5	3	4	92,7	96,9	718
80	60	1100	4	2	1	93,1	97,1	737
80	50	1050	1	5	3	92,9	97,0	733
70	20	1150	5	2	3	90,1	96,2	715
70	40	1000	4	5	2	90,8	96,3	719
70	30	1100	1	4	5	90,7	96,2	717
70	60	1050	3	1	4	91,6	96,3	736
70	50	1200	2	3	1	91,4	96,3	728

В качестве подложки использовалась сталь 30ХГС шириной 4 см, длиной 10 см.

Способ нанесения покрытия – газопламенное напыления.

Рисунок 1 – Образец после нанесения газотермического покрытия

Для напыления использовалось оборудование Тена – ППМ (Белоруссия, г. Минск, ОДО «Тена») (рисунок 2).

Рисунок 2 – Установка «Тена –ППМ» для газопламенногь напыления

Технологические параметры процесса напыления представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технологические параметры процесса напыления

Параметр	Значение параметра
Скорость напыления, м/с	400
Угол напыления, º	30
Расстояние от сопла до образца, мм	50
Температура плавления, ºС	1050-1150

На первом этапе напыление демпфирующим сплавом, состоящим из порошков меди и алюминия в соотношении 4:1.

На втором этапе – напыление порошком карбида титана (рисунок 3).

Исследование микроструктуры поверхности после напыления проводили после каждого этапа на электронном микроскопе Jeol JCM – 7000, элементного состава с помощью МРСА на энергодисперсионной приставке SDTM 30 с Si-детектором.

Для определения прочности на сжатие применялась напольная установка для определения механических свойств INSRON-100 (Великобритания), для

определения износостойкости применяли прибор для определения износостойкости TABER ABRASER 352G. Для определения износостойкости использовали значение после 10 000 вращений абразивного контртела по напыленному образцу.

Механическую напряжённость в образцах измеряли с помощью измерителя концентрации напряжений ИКН-3М-12.

Рисунок 3 – Образец после двухслойного напыления

Результаты и обсуждение

В работах [18; 19] указано, что применение карбида титана как лигатуры способствует значительному изменению свойств материалов: увеличению твердости и износостойкости, гомогенизирует структуру и снижает анизотропию свойств.

Микроструктура образца представлена на рисунке 4. Из анализа структуры видно, что наблюдается в целом однородное и мелкозернистое строение с включением оксидов и нитридов титана вследствие попадания в напыляемый слой кислорода и азота из атмосферы.

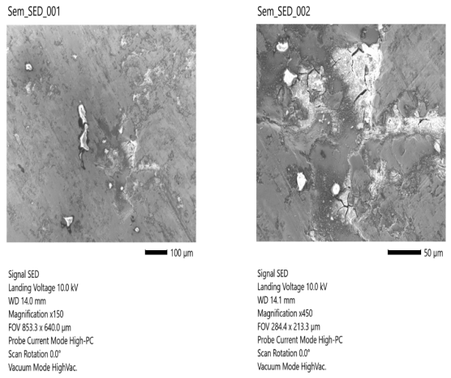


Рисунок 4 – Микроструктура напыленного участка образца

Как видно из рисунка 4 поверхность второго слоя носит «сглаженный» характер, что может объясняться отсутствием влияния шероховатости поверхности подложки. На шероховатость второго слоя оказывает влияние только поверхность слоя после первого напыления.

Картирование элементов напыленного участка представлены на рисунке 5 показало наибольшее распространение титана. Элементный состав демонстрирует наличие основных компонентов – углерода, титана, алюминия. Также наблюдаются кислород, азот (из атмосферы), хром, кремний, остаточный ванадий – их подложки.

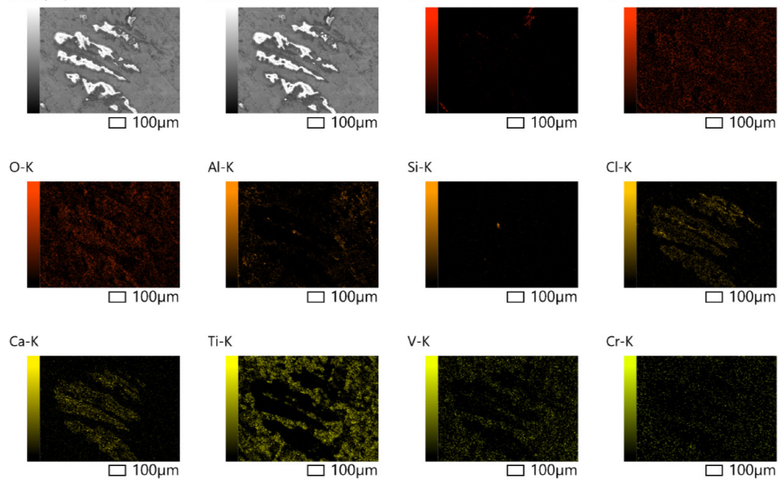


Рисунок 5 – Картирование элементов образца

В поверхностном слое образца присутствует Ti, N, C и следы Al. Присутствие азота в поверхностном слое, также как и ранее присутствие O можно объяснить попаданием из атмосферы в процессе газотермического напыления. Попадание кислорода и азота из атмосферы будет способствовать образованию новых фаз типа оксидов и нитридов.

В поверхностном слое после второго напыления также присутствуют в достаточно большом количестве кислород и углерод, титан, следы алюминия и азот. Титан может присутствовать как в виде карбидов титана, так и в виде нитридов, которые могут играть роль дополнительных фаз-упрочнителей. Следует ожидать повышенную твердость и износостойкость поверхности.

Из магнитограммы (рисунок 6) видно, что скачок концентрации механических напряжений по всей длине образца незначительные, что позволяет утверждать о гомогенности и отсутствии высоких внутренних напряжений в напыленном слое. Из восьми зондом, регистрирующих внутренние напряжения, только первый зонд, перемещаемый по краю образца, зафиксировал скачок напряжений. Это может свидетельствовать о возникновении механических напряжений при подготовке (резке) кромки образца, возникновении наклепанного участка. В то время как остальные семь зондом перемещающиеся от периферии к центру показали равномерность и незначительную величину напряжений.

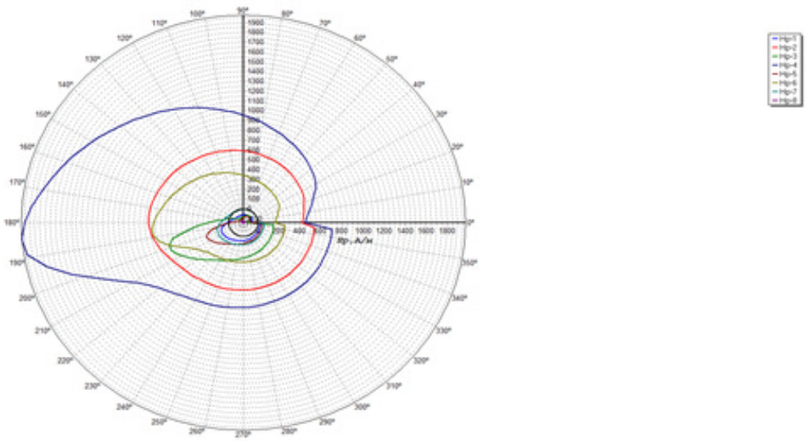


Рисунок 6 – Магнитограмма механических напряжений в образце

Далее исследовали механические свойства образцов – износостойкость и предел прочности на сжатие.

Применение демпфирующих материалов для покрытий (алюминий, медь) способствует равномерному распределению энергии удара для деталей, работающих в условиях ударных нагрузок (молоты, шары и др.) [20]. Улучшение механических свойств подтверждают результаты, приведенные в таблице 5.

В качестве образцов сравнения использовали образец 2 с однослойным покрытием карбидом титана. Также рассматривали образцы с различной толщиной покрытия от 0,5 до 2,5 мм. Образец 1 – двуслойное покрытие с демпфирующим первым слоем.

Как видно из приведенных данных, композиционного состава с использованием в верхнем слое карбида титана, а в нижнем порошка алюминия и меди повышает механические свойства образцов, причем увеличение толщины покрытия интенсивнее сказывается на механических свойствах.

Особенно положительно предлагаемый состав порошков влияет на прочностные характеристики вследствие использования в его составе демпфирующей связки алюминия и меди.

Таблица 5 – Механические свойства образцов с нанесенными покрытиями

№	Состав	Толщина покрытия, мм	Предел прочности на сжатие, МПа	Износостойкость, %
1	1	0,5	695	86
2	1	1,5	702	91
3	1	2,5	704	92
4	2	0,5	674	85
5	2	1,5	679	87
6	2	2,5	685	89

Из полученный результатов можно определить, что двуслойное покрытие с демпфирующим первым слоем обеспечивает более высокую прочность на сжатие и износостойкость при одинаковых толщинах. При этом толщина слоя более 1,5 мм почти не влияет на предел прочности на сжатие и на износостойкость, то есть является оптимальной. Повышенную прочноть и износостойкость можно объяснить более прочными связями карбидных частиц, составляющих металлическую матрицу, что минимизирует вероятность их выпадения в процессе трения или при ударных нагрузках. В результате этого, такие покрытия характеризуются трибологическими и износостойкими качествами по сравнению с другими разновидностями покрытий.

Предлагаемый композиционный состав порошков может использоваться для нанесения на детали оборудования металлургической и машиностроительной отраслей, работающие в условиях агрессивных сред (при высоких температурах, повышенной влажности, трущихся пар и др.).

Информация о финансировании

Данные исследования проведены в рамках реализации гранта Комитета науки МНВО РК AP 26199877 «Разработка технологии нанесения композиционных защитных покрытий на детали оборудования металлургической и машиностроительной отраслей».

Выводы

Показано, что нанесение покрытий с использованием карбида титана в виде нанопорошка и слоя сплава, обладающего демпфирующими свойствами методом газотермического напыления, обеспечивает твердость почти аналогичную твердости покрытий, полученными с использованием стандартного порошка, что связано с интенсивными обезуглероживающими процессами частиц мелкой фракции в результате большой удельной поверхности. Однако, износостойкость такого покрытия получается значительно выше относительно покрытии, полученных с применением стандартных порошков. Это можно объяснить более прочными связями карбидных частиц, составляющих металлическую матрицу, что минимизирует вероятность их выпадения в процессе трения или при ударных нагрузках. В результате этого, такие покрытия характеризуются трибологическими и износостойкими качествами по сравнению с другими разновидностями покрытий.

Показано, что предлагаемый состав порошков влияет на прочностные характеристики деталей и повышает их износостойкость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Кобылкин, И. Ф., Селиванов, В. В.** Материалы и структуры легкой бронезащиты [Текст]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 191 с. – ISBN 978-5-7038-4001-6.

2 **Гладышев, С. А., Григорян, В. А.** Броневые стали [Текст]. – М. : Интермет Инжиниринг, 2010. – 336 с. – ISBN 978-5-89594-154-6.

3 **Шаш, Н.** Метод создания бронекабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с требуемыми параметрами по защите от стрелкового оружия : дис. … канд. техн. наук [Текст]. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 151 с.

4 **Зузов, В. Г., Шаш, Н.** Анализ противопульной стойкости броневых сталей иностранного производства [Текст] // Наука и образование. МГТУ им. Баумана. – 2017. – № 5. – С. 21–41.

5 **Чистяков, Е. Н.** Активная защита бронетанковой техники – реалии и перспективы [Текст] // Экспорт вооружений. – 2019. – № 5. С. 15–23.

6 **Никонова, Т. Ю., Жунуспеков, Д. С., Ясаков, Ю. Д.** Эмпирико-математическая модель обработки штока гидроцилиндра струйно-абразивным методом [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2023. – № 3. – С. 57–70.

7 **Қамбаров, Е. Е., Кусайнов, А. Е., Ковалевски, П., Уазырханова, Г. К.** Microstructure and mechanical characteristics of high entropy alloy coating of ALCrCoFeNI system obtained by detonation spraying method [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2024. – № 4. – С. 288–301.

8 **Загорянский, В. Г.** Обоснование применимости биметалла сталь–алюминий по расчетным критериям противопульной бронестойкости [Текст] // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2015. – № 3(75). – С. 37–41.

9 **Калинин, Е. Н., Плюснин, С. О., Ладанов, В. И.** К вопросу о возможности броневой защищенности бронетранспортёра на современном этапе развития [Текст] // Исследования молодых ученых: материалы VIII Междунар. науч. конф. (г. Казань, март 2020 г.). – Казань, 2020. – С. 9–11.

10 **Yilmaz, A.** Development of an Armor Steel for Ballistic Protection [Text] // Materials Testing. – 2010. – Vol. 52. – № 11–12. – P. 811–818. – https://doi.org/10.3139/120.110190.

11 **Fras, T., Christian, C., Roth, D.** Fracture of high-strength armor steel under impact loading [Text] // International Journal of Impact Engineering. – 2018. – Vol. 111. – P. 147–164.

12 **Issagulov, A. Z., Kulikov, V. Y., Shcherbakova, Y. P., Kovaleva, T. V., Kvon, S. V.** The corrosion resistant coating with halloysite nanoparticles [Text] // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55. – № 3. – P. 426–428.

13 **Aubakirov, D., Issagulov, A., Kvon, S., Kulikov, V., Shcherbakova, Y., Arinova, S.** Modifying Effect of a New Boron-Barium Ferroalloy on the Wear Resistance of Low-Chromium Cast Iron [Text] // Metals. – 2022. – Vol. 12. – № 7. – 1153. – https://doi.org/10.3390/met12071153.

14 **Issagulov, A. Z., Kvon, S. S., Kulikov, V. Y., Sakbossynova, A. A.** Cr–Ni system alloys composition impact on durability value [Text] // Metalurgija. – 2014. – Vol. 53. – № 4. – P. 621–623.

15 **Langdon, G., Lee, W., Louca, L.** The influence of material type on the response of plates to air-blast loading [Text] // International Journal of Impact Engineering. – 2015. – Vol. 78. – P. 150–160.

16 **Алексеенцева, С. Е., Захаров, И. В.** Влияние демпфирующих свойств сплавов на пулестойкость [Текст] // Вестник Самарского технического университета. – 2011. – № 4(32). – С. 88–95. – ISSN 1991-8542.

17 **Konca, E.** A Comparison of the Ballistic Performances of Various Microstructures in MIL-A-12560 Armor Steel [Text] // Metals. – 2020. – Vol. 10, № 4. – 446.

18 **Kim, H. K., Kim, H. G., Park, H. K.** Atmosphere Gas arburizing for Improved Wear Resistance of Pure Titanium Fabricated by Additive Manufacturing [Text] // Materials Transactions. – 2017. – № 4. – P. 592–595. – https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016361.

19 **Cherepova, T. S., Dmitrieva, G. P.** The Wear Features of Powder Cobalt Alloys Strengthened with Titanium Carbide [Text] // Powder Metallurgy And Metal Ceramics. – 2016. – № 5–6. – P. 374–378. – https://doi.org/10.1007/s11106-016-9816-x.

20 **Guilemany, J. M., Espallargas, N., Suegama, P. H., Benedetti, A. V., Fernández, J.** High-Velocity Oxyfuel Cr3C2-NiCr Replacing Hard Chromium Coatings [Text] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2005. – Vol. 14 (3). – P. 335–341.

REFERENCES

1 **Kobylkin, I. F., Selivanov, V. V.** Materialy i struktury legkoi bronezashchity [Materials and structures of light armor protection] [Text]. – Moscow : Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. – 191 p. – ISBN 978-5-7038-4001-6.

2 **Gladyshev, S. A., Grigoryan, V. A.** Bronevye stali [Armor steels] [Text]. – Moscow : Intermet Engineering, 2010. – 336 p. – ISBN 978-5-89594-154-6.

3 **Shash, N.** Metod sozdaniya bronekabin gruzovykh avtomobilei na stadii proektirovaniya s trebuemymi parametrami po zashchite ot strelkovogo oruzhiya [Method for designing armored cabins of trucks at the design stage with required parameters for protection against small arms fire] : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences [Text]. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2018. – 151 p.

4 **Zuzov, V. G., Shash, N.** Analiz protivopulnoi stoikosti bronevykh stalei inostrannogo proizvodstva [Analysis of bullet resistance of foreign-made armor steels] [Text]. In Nauka i obrazovanie. Bauman Moscow State Technical University. – 2017. – № 5. – P. 21–41.

5 **Chistyakov, E. N.** Aktivnaya zashchita bronetankovoi tekhniki – realii i perspektivy [Active protection of armored vehicles – realities and prospects] [Text]. In Eksport vooruzhenii. – 2019. – № 5. – P. 15–23.

6 **Nikonova, T. Yu., Zhunuspekov, D. S., Yasakov, Yu. D.** Empiriko-matematicheskaya model' obrabotki shtoka gidrocilindra strujno-abrazivnym metodom [Tekst] // Nauka i tekhnika Kazahstana. – 2023. – № 3. – P. 57–70.

7 **Kambarov, E. E., Kusajnov, A. E., Kovalevski, P., Uazyrhanova, G. K.** Microstructure and mechanical characteristics of high entropy alloy coating of ALCrCoFeNI system obtained by detonation spraying method [Tekst] // Nauka i tekhnika Kazahstana. – 2024. – № 4. – P. 288–301.

8 **Zagoryansky, V. G.** Obosnovanie primenimosti bimetalla stal–alyuminii po raschetnym kriteriyam protivopulnoi bronestoikosti [Justification of applicability of steel–aluminum bimetal according to calculated criteria of bulletproof armor resistance] [Text]. In Visnyk NTUU «KPI». – Seriia mashynobuduvannia. – 2015. – № 3(75). – P. 37–41.

9 **Kalinin, E. N., Plyusnin, S. O., Ladanov, V. I., Vasiliev, V. G.** K voprosu o vozmozhnosti bronevoi zashchishchennosti bronetransportera na sovremennom etape razvitiya [On the possibility of armored protection of an armored personnel carrier at the present stage of development] [Text]. In Issledovaniya molodykh uchenykh : materials of the VIII International Scientific Conference (Kazan, March 2020). – Kazan, 2020. – P. 9–11.

10 **Yilmaz, A.** Development of an Armor Steel for Ballistic Protection [Text] // Materials Testing. – 2010. – Vol. 52. – № 11–12. – P. 811–818. – https://doi.org/10.3139/120.110190.

11 **Fras, T., Christian, C., Roth, D.** Fracture of high-strength armor steel under impact loading [Text] // International Journal of Impact Engineering. – 2018. – Vol. 111. – P. 147–164.

12 **Issagulov, A. Z., Kulikov, V. Y., Shcherbakova, Y. P., Kovaleva, T. V., Kvon, S. V.** The corrosion resistant coating with halloysite nanoparticles [Text] // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55. – № 3. – P. 426–428.

13 **Aubakirov, D., Issagulov, A., Kvon, S., Kulikov, V., Shcherbakova, Y., Arinova, S.** Modifying Effect of a New Boron-Barium Ferroalloy on the Wear Resistance of Low-Chromium Cast Iron [Text] // Metals. – 2022. – Vol. 12. – № 7. – 1153. – https://doi.org/10.3390/met12071153.

14 **Issagulov, A. Z., Kvon, S. S., Kulikov, V. Y., Sakbossynova, A. A.** Cr–Ni system alloys composition impact on durability value [Text] // Metalurgija. – 2014. – Vol. 53. – № 4. – P. 621–623.

15 **Langdon, G., Lee, W., Louca, L.** The influence of material type on the response of plates to air-blast loading [Text] // International Journal of Impact Engineering. – 2015. – Vol. 78. – P. 150–160.

16 **Алексеенцева, С. Е., Захаров, И. В.** Влияние демпфирующих свойств сплавов на пулестойкость [Текст] // Вестник Самарского технического университета. – 2011. – № 4(32). – С. 88–95. – ISSN 1991-8542.

17 **Konca, E.** A Comparison of the Ballistic Performances of Various Microstructures in MIL-A-12560 Armor Steel [Text] // Metals. – 2020. – Vol. 10, № 4. – 446.

18 **Kim, H. K., Kim, H. G., Park, H. K.** Atmosphere Gas arburizing for Improved Wear Resistance of Pure Titanium Fabricated by Additive Manufacturing [Text] // Materials Transactions. – 2017. – № 4. – P. 592–595. – https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016361.

19 **Cherepova, T. S., Dmitrieva, G. P.** The Wear Features of Powder Cobalt Alloys Strengthened with Titanium Carbide [Text] // Powder Metallurgy And Metal Ceramics. – 2016. – № 5–6. – P. 374–378. – https://doi.org/10.1007/s11106-016-9816-x.

20 **Guilemany, J. M., Espallargas, N., Suegama, P. H., Benedetti, A. V., Fernández, J.** High-Velocity Oxyfuel Cr3C2-NiCr Replacing Hard Chromium Coatings [Text] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2005. – Vol. 14 (3). – P. 335–341.

Поступило в редакцию 13.01.26.
Поступило с исправлениями 16.01.26.
Принято в печать 12.02.26.

В. Ю. Куликов[1], Св. С. Квон[2], *А. М. Сапиянова[3]
[1,2,3]Абылкас Сагинов атындағы Қарағанды Техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
13.01.26 ж. баспаға түсті.
16.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
12.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ГАЗОТЕРМИЯЛЫҚ БҮРКУ АРҚЫЛЫ БЕТТЕРІН ЕКІ ҚАБАТТЫ ҚАПТАУ КЕЗІНДЕ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ПАЙДАЛАНУ ҚАСИЕТТЕРІН АРТТЫРУ

Мақалада болат бөлшектердің пайдалану сипаттамалары мен ұзақ мерзімділігін екі қабатты газотермиялық бүрку арқылы арттыруға бағытталған кешенді эксперименттік және аналитикалық зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Төменгі қабат демпферлеуші қызмет атқарады және 4:1 қатынастағы мыс-алюминий қорытпасынан тұрады, ол қаптаманың негізбен жоғары адгезиясын, қалдық кернеулердің төмендеуін және материалдардың термиялық үйлесімділігінің артуын қамтамасыз етеді. Жоғарғы қабат тығыз, берік, тозуға және жылуға төзімді бетті қалыптастыратын титан карбидімен ұсынылған.

Газотермиялық бүрку әдісін қолдану бөлшектердің біркелкі таралуымен, құрылымының жоғары тығыздығымен және кеуектіліктің минималды деңгейімен сипатталатын қаптамаларды алуға мүмкіндік берді. Микроқұрылым мен фазалық құрамды егжей-тегжейлі зерттеу титанның карбидтері, нитридтері және оксидтері бар ұсақ түйіршікті құрылымның түзілуін анықтады, олар бетті кешенді түрде беріктендіріп, сыртқы әсерлерге төзімділігін арттырады.

Механикалық қасиеттерді талдау өңделмеген үлгілермен салыстырғанда қаттылықтың, адгезиялық беріктіктің және коррозияға төзімділіктің айтарлықтай артқанын көрсетті. Алынған нәтижелер әзірленген технологияның тиімділігін және жоғары жүктемелер, үйкеліс, жоғары температуралар мен агрессивті орталар жағдайында жұмыс істейтін машина бөлшектерін қалпына келтіру, қорғау және олардың қызмет ету мерзімін ұзарту үшін практикалық маңыздылығын растайды.

Кілтті сөздер: газотермиялық бүрку, ұнтақтар, ұзақ мерзімділік, қаттылық, беріктік, тозуға төзімділік.

V. Yu. Kulikov[1], Sv. S. Kvon[2], *A. M. Sapiyanova[3]
[1,2,3]Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
Received 13.01.26.
Received in revised form 16.01.26.
Accepted for publication 12.02.26.

ENHANCEMENT OF THE SERVICE PROPERTIES OF PARTS BY DOUBLE-LAYER SURFACE COATINGS PRODUCED BY THERMAL SPRAYING

The article presents the results of comprehensive experimental and analytical studies aimed at improving the performance and durability of steel components through the application of double-layer gas-thermal coatings. The lower layer acts as a damping barrier and consists of a copper–aluminum alloy in a 4:1 ratio, which provides high adhesion of the coating to the substrate, reduces residual stresses, and improves thermal compatibility between the materials. The upper layer is made of titanium carbide, forming a dense, strong, wear-resistant, and heat-resistant surface. The use of the gas-thermal spraying method made it possible to obtain coatings with uniform particle distribution, high structural density, and minimal porosity. Detailed studies of the microstructure and phase composition revealed the formation of a fine-grained structure with inclusions of titanium carbides, nitrides, and oxides that comprehensively strengthen the surface and increase its resistance to external influences. The analysis of mechanical properties showed a significant increase in hardness, adhesion strength, and corrosion resistance compared to uncoated samples. The obtained results confirm the effectiveness of the developed technology and its practical importance for restoring, protecting, and extending the service life of machine parts operating under conditions of high loads, friction, elevated temperatures, and aggressive environments.

Keywords: gas-thermal spraying, composite coating, titanium carbide, copper-aluminum alloy, microstructure, wear resistance, hardness.

ҒТАМР 55.03.35

https://doi.org/10.48081/BGQF1911

И. С. Қуанов[1], Б. С. Дөненбаев[2], А. К. Шеров[3],
****С. О. Тусупова[4], А. Б. Бөбеев[5]***
[1,3,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2]А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4]Торайғыров университеті, Казахстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9827-5728
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6923-3476
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1433-957X
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8920-4901
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3378-2949
*e-mail: suleeva.s@inbox.ru

HARDOX 450 БОЛАТЫН ИМПУЛЬСТІ САЛҚЫНДАТУҒА ИЕ ТЕРМОФРИКЦИЯЛЫҚ ФРЕЗЕРЛЕУ АЙМАҒЫНДАҒЫ ТЕМПЕРАТУРАНЫ ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада ANSYS Workbench бағдарламалық жасақтамасын пайдалана отырып, HARDOX 450 болатын импульсті салқындатуға ие термофрикциялық фрезерлеу процесінің математикалық моделін ұсынған. Бұл модель кесу аймағында өтетін жылулық және физикалық процестерді динамикалық режимде зерттеуге мүмкіндік береді. Ұсынған әдістеме кесу аймағындағы жылулық процестерді зерттеуге және жоғары беріктікті және тозуға төзімді болаттарды, мысалы HARDOX 450 маркалы болатын, импульсті салқындатуға ие термофрикциялық фрезерлеу кезінде оңтайлы кесу режимдерін анықтауға бағытталған.

Зерттеуді орындау үшін кесу кезінде бұзылудың көпшілік модельдерінің ішінен алғаш рет профессор В. Л. Колмогоров ұсынған критерий қолданылды, ол үлкен пластикалық деформациялар мен жоғары температура жағдайына бейімделген. Есептеу тиімділігін арттыру мақсатында екі объектіге ие қарапайым математикалық модель ұсынылды: HARDOX 450 болатынан жасалған параллелепипед пішінді дайындама және пластина түріндегі үйкеліс фрезасының кескіш жиегі.

Модельде үйкеліс фрезасының кескіш жиегі (пластина) мен дайындама арасындағы коэффициент есепке алынды, μ = 0,4 деп қабылданды. Дайындаманың түйісу қабатының астындағы қабаттың температура өрісін талдау үшін жергілікті координат жүйесінде біркелкі қадаммен орналасқан тоғыз сипаттамалық нүктенің координаттары енгізілді. Моделдеу нәтижесінде әртүрлі айналу жиіліктерінде көрсетілген нүктелердегі түйісу қабатының температурасын алу мүмкін болды.

Зерттеу нәтижелері HARDOX 450 маркалы болатын импульсті салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу кезінде жылулық процестерді тиімді басқаруға болатындығын көрсетті.

Кілтті сөздер: термофрикциялық фрезерлеу, импульсті салқындату, HARDOX 450, температура, бұзылу моделі, шексіз элементтік тор, математикалық модель, жылу өткізгіштік.

Кіріспе

Термофрикциялық өңдеу металдарды термомеханикалық тәсілдермен өңдеу технологияларының қатарына жатады және құрал мен дайындама арасындағы жоғары жылдамдықтағы салыстырмалы қозғалыс нәтижесінде үйкеліс әсерінен байланыс аймағында қарқынды жылу бөлінуімен сипатталады. HARDOX 450 секілді жоғары берікті және тозуға төзімді болаттарды дәстүрлі механикалық өңдеу кезінде кесу құралының жедел тозуы мен энергия шығындарының артуы жиі байқалады. Импульстік салқындату қолданылатын термофрикциялық фрезерлеу әдісін пайдалану кесу аймағында температураның уақытша жоғарылауын қамтамасыз етіп, материалдың жергілікті түрде жұмсаруына әкеледі. Бұл өз кезегінде кесу күштерін төмендетуге және өңдеу процесінің тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар кесу жылдамдығын шамадан тыс арттыру жабдыққа қойылатын техникалық талаптардың күрт өсуіне және энергия тұтынудың ұлғаюына себеп болады.

Осыған байланысты HARDOX 450 болатын импульстік салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу кезінде кесу режимдерінің өңделген бет сапасына әсерін анықтау және оңтайлы өңдеу параметрлерін белгілеу мақсатында эксперименттік зерттеулер жүргізілді [1; 2].

1-суретте HARDOX 450 болатын импульстік салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу процесі көрсетілген. Жүргізілген тәжірибелік зерттеулер нәтижелері өңделген бет кедір-бұдырлығының Ra = 1,0–7,5 мкм аралығында қамтамасыз етілетінін көрсетті, бұл 5–7 кедір-бұдырлық класына сәйкес келеді. Сонымен қатар HARDOX 450 болатының бастапқы қаттылығының төмендеуі байқалмады. Алынған нәтижелер аталған болат маркасының импульстік салқындату қолданылатын термофрикциялық фрезерлеу тәсілімен тиімді өңделетінін дәлелдейді.

1 – қысқыш тиски; 2 – HARDOX 450 болатынан жасалған дайындама;
3 – салқындату-майлау сұйықтығын (СОЖ) беру шлангі;
4 – термофрикциялық фреза
1-сурет – HARDOX 450 болатын импульстік салқындату
қолдану арқылы термофрикциялық фрезерлеу процесі

Алдыңғы зерттеулерде [1;2] термофрикциялық өңдеу процесін одан әрі терең зерттеу тұрғысынан «кесу құралы – дайындама» түйісу аймағында жүретін жылулық құбылыстардың ғылыми және практикалық маңызы ерекше екендігі атап өтілген. Кесу аймағындағы физикалық процестер туралы ақпаратты тәжірибелік әдістермен алу бірқатар факторларға байланысты едәуір қиындық тудырады. Атап айтқанда, түйісу аймағының геометриялық өлшемдерінің шағын болуы, процестің өте жоғары жылдамдықта өтуі, кесу құралы мен өңделетін материал арасындағы үздіксіз салыстырмалы қозғалыс, сондай-ақ жоңқа түзілу құбылысы өлшеу мүмкіндіктерін шектейді.

Осы жағдайларды ескере отырып, импульстік салқындату қолданылатын термофрикциялық фрезерлеу процесін зерттеуде математикалық модельдеу мен компьютерлік есептеулерді қолдану аталған мәселелерді шешудің тиімді тәсілі болып табылады. Бұл бағыттағы жекелеген мәселелер бірқатар жұмыстарда [3;4;5] қарастырылғанымен, оларда негізінен кесу пластинасы көлеміндегі физикалық процестерге жалпылама талдау ғана жүргізілген.

Қазіргі заманғы қолданбалы бағдарламалық кешендерді, атап айтқанда ANSYS Workbench ортасын пайдалану арқылы кесумен өңдеу кезінде жүретін жылулық және механикалық процестерді динамикалық режимде зерттеуге,

сондай-ақ технологиялық параметрлердің әртүрлі нұсқаларын ескеріп, процестің тиімділігін арттыруға мүмкіндік туады.

Осы зерттеудің мақсаты – ANSYS Workbench бағдарламалық кешенін қолдана отырып, HARDOX 450 болатынан импульстік салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу кезінде тікелей кесу аймағында қалыптасатын жылулық процестерді зерттеу болып табылады.

Материалдар мен әдістер

HARDOX 450 болатының импульстік салқындату қолданылатын термофрикциялық фрезерлеу процесі кезіндегі кесу аймағында температураның қалыптасуын модельдеу және талдау [6; 7] еңбектерінде ұсынылған әдістемелік негізге сүйене отырып жүзеге асырылды. Зерттеу барысында есептік модельді құру бірнеше дәйекті кезеңдер арқылы орындалды.

Алдымен кесу құралы мен өңделетін дайындаманың үшөлшемді CAD-моделі жасалды. Кейін модельге кесу құралы материалы мен HARDOX 450 болатының физикалық және жылулық қасиеттері енгізілді. Бұдан кейін режуші пластина беті мен дайындама арасындағы өзара әрекеттесу шарттары анықталып, түйісу аймағындағы контакт түрі тағайындалды. Сонымен қатар есептеу дәлдігін қамтамасыз ету мақсатында модель үшін соңғы элементтер торын (КЭТ) құру шарттары белгіленді.

Есептік модельде қолданылған HARDOX 450 болатының термофизикалық қасиеттері және термофрикциялық фрезерлеу процесіне қатысты бастапқы параметрлер 1-кестеде келтірілген.

1-кесте – Дайындамалардың физикалық қасиеттері

Параметрлер	Өлшем бірлігі	HARDOX 450
Тығыздық, ρ	кг/м^3	7850
Юнг модулі, E	ГПа	215
Пуассон коэффициенті, ν	-	0.3
Меншікті жылусыйымдылық, c_p	Дж/(кгС)	-
Жылуөткізгіштік коэффициенті, λ	Вт/(мС)	-
Бастапқы температура,T_t	°C	22
Балқу температурасы, T_f	°C	-

Үлкен деформация кезінде материалдың әртүрлі мінез-құлық заңдарының ішінде ең кең таралғаны – Джонсон-Кук заңы [8; 9; 10]. Бұл заң үлкен пластикалық деформациялар мен айтарлықтай температура градиенттері туғызатын адиабаттық кесу құбылыстарын есепке алады. Джонсон-Кук заңы кернеу σ-ның деформация дәрежесі ε (%) мен деформация жылдамдығына, сондай-ақ температура T-ға тәуелділігін анықтайды және мультипликативтік формада үш функцияға жіктелуі мүмкін:

$$\sigma = \left(A + B \cdot \varepsilon^{n}\right)\left(1 + C \cdot \frac{\ln \varepsilon}{\varepsilon_0}\right)\left(1 - \left[\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right]\right) \quad (1)$$

Бірінші көбейткіш материалдың наклеп құбылысын сипаттайды, екінші – динамикалық процестерді, ал үшінші – отпуска құбылысын көрсетеді. Наклепке қатысты көбейткіш тұрақты деформация жылдамдығында ағым кернеуіне сәйкес келеді. Мұнда A – қарастырылып отырған материалдың беріктілік шегі, B және n – наклептің сызықтық және сызықтық емес параметрлері болып табылады.

Екінші көбейткіш – материалдың динамикалық беріктілігін сипаттайтын мультипликативтік фактор. Ол пластикалық деформацияның эквивалентті жылдамдығына тәуелді. Мұнда C– деформация жылдамдығына сезімталдық коэффициенті. Бастапқы деформация жылдамдығы 1 $с^{-1}$ деп алынады.

Үшінші көбейткіш – жылулық отпуска құбылысын сипаттайтын фактор. Мұнда T_0 – бастапқы температура. T_0 мен балқу температурасы T_f арасындағы температураларда ағым кернеуі температураның өсуіне байланысты азаяды және $T=T_f$ кезінде шамамен нөлге тең болады. Балқу температурасына жақындаған сайын ағым кернеуі іс жүзінде нөлге тең болады.

Осылайша, T_0 – жылулық отпуска механизмін қарастыруға қатысты бастапқы температура, ал m – аталған жылулық отпускаға тән дәрежелік көрсеткіш. Джонсон-Кук моделі параметрлерінің HARDOX 450 болаты үшін мәндері 2-кестеде берілген.

2-кесте – HARDOX 450 болаты үшін Джонсон-Кук моделі параметрлері

Дайындама	A, МПа	B, МПа	C	n	m
HARDOX 450	1100	900	0,35	0,015	1,0

Модельде жоңқаның түзілуі және бөлінуі материалдың бұзылу заңы негізінде жүзеге асырылады. Бұл заң «элементтерді эрозиялау» әдісіне сүйенеді, ол өңделетін бөлшектегі кернеу мен деформация жағдайына тәуелді жарықтың дамуын сипаттайды. Аталған заңды қолдану екі критерийді қамтиды. Бірінші критерий материалдың қажетті бұзылу дәрежесін сипаттаса, екінші – жарықтың дамуын, оның таралуын және элементтердің бір-бірінен бөлінуін реттейді.

Бұзылуға бейімделген критерий Джонсон-Кук қозғалыс заңымен байланысты. Әр элемент үшін бұзылу келесі жағдайдан бастап есепке алынады:

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\Delta \bar{\varepsilon}_f}, \quad (2)$$

мұндағы $\Delta \bar{\varepsilon}$ – нәтижелік пластикалық деформацияның инкременті,

$\Delta \bar{\varepsilon}_f$ – материалдың бұзылуына сәйкес нәтижелік деформация [8, 9, 10].

Материалдағы бұзылу ω = 1 болған кезде басталады.

Джонсон-Кук моделі үлкен деформация кезінде термомеханикалық процестерді есепке алады. Материалдың бұзылуына сәйкес нәтижелік пластикалық деформация теңдеуі келесі түрде беріледі:

$$\bar{\varepsilon}_f = \left[D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \sigma^*)\right] \cdot \left[1 + D_4 \cdot \ln \bar{\varepsilon}^*\right] \cdot \left[1 + D_5 \cdot T^*\right], \quad (3)$$

мұндағы σ^* – орташа кернеу (σ_m) мен Мизес кернеуі арасындағы қатынас ($\bar{\sigma}$);

$\bar{\varepsilon}^*$ – есептеу деформация жылдамдығымен алынған пластикалық деформацияның өлшемсіз дәрежесі $\dot{\varepsilon}$ және деформация жылдамдығына сезімталдық моментін $\dot{\varepsilon}_0$ сипаттайтын шек.

Өлшемсіз температура коэффициенті T* келесі түрде жазылады:

$$T^* = \left(T - T_0\right) / \left(T_f - T_0\right), \quad (4)$$

мұндағы T_f – материалдың балқу температурасы;

T_0 – бастапқы температура;

D_1 – бастапқы бұзылу деформациясы;

D_2 – экспоненциалдық фактор;

D_3 – үшосьтілік факторы;

D_4 – деформация жылдамдығы факторы;

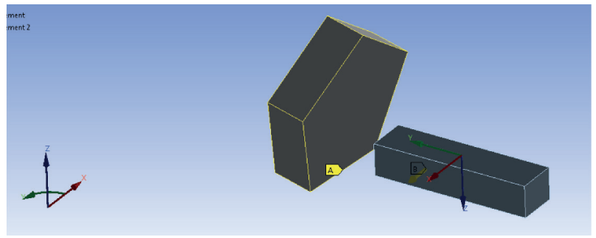
D_5 – жылулық факторы [9, 10, 11, 12].

Дайындаманың пластикалық бұзылу деформациясының (3) теңдеу параметрлері 3-кестеде берілген.

3-кесте – HARDOX 450 болатының пластикалық бұзылу деформациясы параметрлері

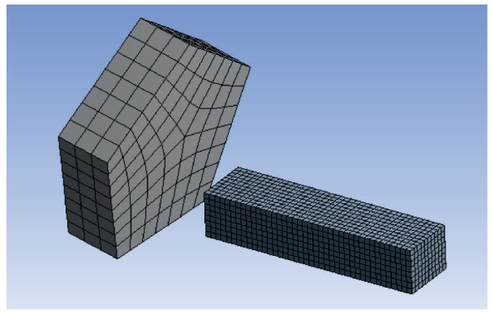
Дайындама	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
HARDOX 450	0,05	0,25	-1,5	0,01	1,0

Бұзылу критериі орындалған жағдайда бұзылудың дамуы критериі іске қосылады. Бұл критерий жарықтың дамуы үшін қажетті энергия деңгейін Gf сипаттайды. Жарық пайда болғаннан кейін материалдың мінез-құлқы кернеу мен орын ауыстыру арасындағы тәуелділік ретінде қарастырылады, кернеу мен деформация арасындағы байланыс емес. Кесу процесін ғылыми зерттеу үшін келесі ақпарат алу қажет: түйісу аймағындағы контакт күші және дайындамадағы температураның таралуы. Соңғы элементтер торын тығыз орналастыру физикалық процестерді модельдеу кезінде дәлірек нәтижелер алуға мүмкіндік берсе де, уақыт шығынын арттырады. Сондықтан әрқашан қажетті дәлдік пен уақыт шектеулері арасындағы компромисс таңдалады. Кесу аймағындағы физикалық процестерді талдау мақсатында дайындаманың беті мен термофрикциялық фреза кескіш жиегінің беті пластиналар ретінде көрсетіліп, олар нөмірленеді (қараңыз: 2-сурет).



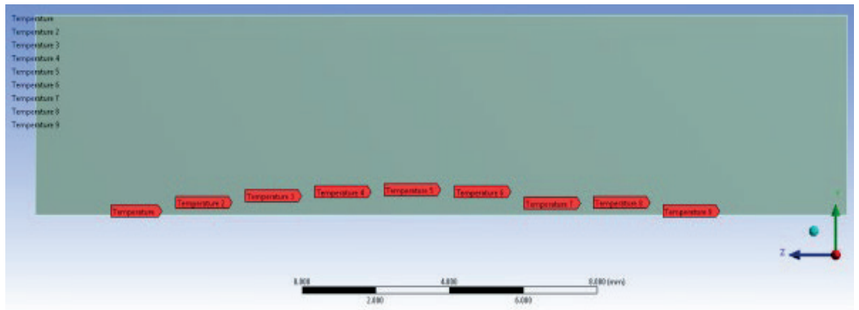
2-сурет – Шекаралық шарттар

3-суретте пластина мен дайындаманың соңғы элементтер торы көрсетілген.



3-сурет – Пластина мен дайындаманың соңғы элементтер торы

4-суретте термофрикциялық фрезерлеу аймағындағы дайындама бетінде сипаттамалық нүктелердің нөмірленуі көрсетілген.



4-сурет – Фрезерлеу аймағында дайындама бетінің сипаттамалық нүктелерінің нөмірленуі

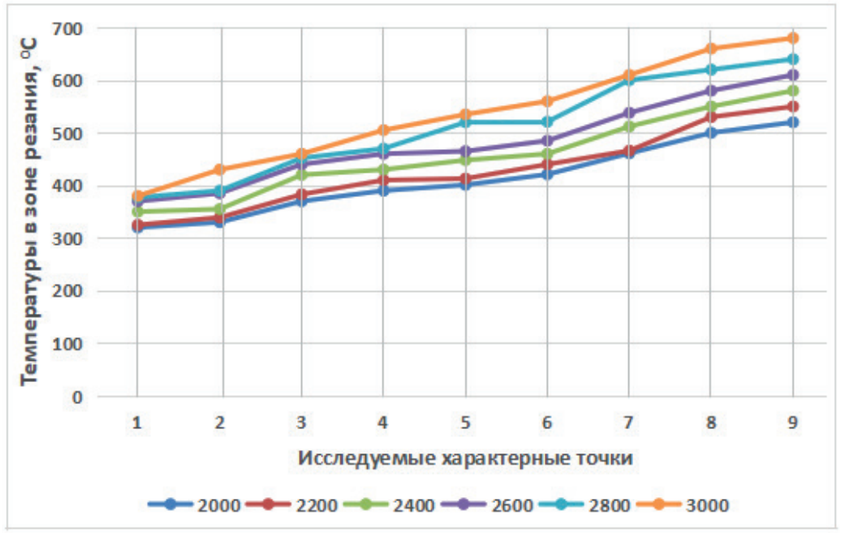
Нәтижелер және талқылау

Термофрикциялық фрезерлеу кезінде «құрал–дайындама» түйісу аймағында жүретін процестер туралы егжей-тегжейлі ақпарат алу үшін өңделетін дайындама

беті біркелкі орналасқан нүктелерге бөлінеді. Бұл сипаттамалық нүктелерді термофрикциялық фреза кескіш жиегінің жасаған доға тәрізді жұмыс іздері ретінде қарастыруға болады.

Кесу аймақтарындағы физикалық процестерді талдау мақсатында құралдың айналу жиілігіне тәуелді контакт температурасының өзгерісін көрсететін графиктер салынады.

5-суретте HARDOX 450 болатын дайындаманы өңдеу кезінде контакт температурасының айналу жиілігіне тәуелділігі көрсетілген.



S = 21,6 мм/мин; n = 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000 об/мин

5-сурет – HARDOX 450 болатынан жасалған дайындамаларды өңдеу кезінде контакт температурасы

Графиктен көрініп тұрғандай, құралдың айналу жиілігі артқан сайын «құрал–дайындама» түйісу аймағындағы температураның көтерілуі байқалады. Ұсынылған фрезерлеу әдісі үшін «құрал–дайындама» түйісу аймағындағы температура өңделетін материалдың рекристаллану температурасына жақын болуы қажет [3,6].

5-суретте HARDOX 450 болатын дайындаманы өңдеу кезінде контакт температурасының айналу жиілігіне тәуелділігі көрсетілген. HARDOX 450 үшін балқу температурасы $T_{пл}$=1500 °С, ал рекристаллану температурасы $T_{рек} \approx 600$ °С. Графиктен көрініп тұрғандай, берілген өңдеу режимдерінде «құрал–дайындама» түйісу аймағындағы температура рекристаллану температурасынан аспайды.

Бұл тұжырым берілген өңдеу режимдерінің оңтайлылығын растайды. Зерттеу жүргізу барысында кесу кезінде бұзылудың көпшілік қолданыстағы модельдерінің

ішінен алғаш рет проф. В. Л. Колмогоров ұсынған критерий қолданылды. Есептеу тиімділігін арттыру мақсатында математикалық модель ұсынылды, онда тек екі объекті қарастырылды: параллелепипед пішінді дайындама және бесбұрышты призмалық кескіш пластина. Сонымен қатар, жұмыста кесуші пластина мен дайындама арасындағы үйкеліс коэффициенті μ=0,4 ретінде алынды. Дайындаманың түйісу астындағы қабатындағы температураны анықтау үшін жергілікті координат жүйесінде біркелкі орналасқан тоғыз сипаттамалық нүктенің координаттары енгізілді. Термофрикциялық фреза айналу жиілігі өзгерген кезде HARDOX 450 болатының зерттелетін нүктелерінде температура мәндері алынды.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ұсынылған әдістемені пайдалану арқылы әртүрлі материалдарды, оның ішінде HARDOX 450 болатын болатты, импульстік салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу кезінде оңтайлы кесу режимдерін ұсынуға болады.

Қорытынды

ANSYS Workbench бағдарламалық қамтамасыздандыруын пайдалана отырып жасалған кесу процесінің компьютерлік моделі HARDOX 450 болатын болатты импульстік салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу кезінде жүретін жылулық және физикалық процестерді динамикалық режимде зерттеуге мүмкіндік берді. Сондай-ақ, бұл әдістеме әртүрлі материалдарды өңдеуде импульстік салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу үшін оңтайлы кесу режимдерін ұсынуға мүмкіндік береді.

«Құрал–дайындама» түйісу аймағындағы жылулық процестерді зерттеу нәтижелері көрсеткендей, жылулық процестерді кесу режимдерін оңтайлы таңдау арқылы басқаруға болады.

HARDOX 450 болатының импульстік салқындатумен термофрикциялық фрезерлеу кезінде кесу аймағындағы температура HARDOX 450 болатының рекристаллдану температурасынан аспайтыны анықталды ($T_{рек} \approx 600$ °C).

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Куанов И. С., Шеров К. Т., Сагитов А. А., Тусупова С. О., Мендалиева С. И.** Экспериментальное исследование твердости обработанной поверхности при термофрикционном фрезеровании с импульсным охлаждением стали HARDOX 450.[Текст] // Наука и техника Казахстана. – Павлодар: Изд-во «КЕРЕКУ» ПГУ им. С. Торайгырова, 2025. – № 1. – С. 116–128. – https://doi.org/10.48081/BNPE4061

2 **Шеров К. Т., Куанов И. С., Сагитов А. А., Иманбаев Е. Б., Бобеев А. Б.** Исследование шероховатости обработанной поверхности при термофрикционном фрезеровании с импульсным охлаждением стали HARDOX 450 [Текст] // Труды университета. – Караганда : Изд-во КарТУ, 2025. – № 2(99). – С. 41–47. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2025_2_41

3 **Кушназаров И. К., Шеров К. Т., Алтынбаев Р. Р.** Технология термофрикционного фрезерования с высокочастотным охлаждением. [Текст] //

Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків, 2007. – Вип.2(15). – С. 134–139.

4 **Шеров К. Т., Сихимбаев М. Р.** Перспективная технология изготовления базовых деталей // [Текст]. – Германия : Издательство Palmarium Academic Publishing. – 2013. – 267 с.

5 **Ainabekova S., Myrzakhmet B., Bekzhanov Y., Gabdyssalik R., Mazdubay A.** и др. Research of temperature distribution in the process of thermofrictional cutting of titanium alloy TI-5553. [Text] // Journal of Applied Engineering Science, (2022) 20(2). – P. 400–407. – https://doi.org/10.5937/jaes0-32723.

6 **Sherov K. T., Sikhimbayev M. R., Sherov A. K., Donenbayev B. S., Rakishev A. K., Mazdubai A. B., Musayev M. M., Abeuova A. M.** Matematical modeling of thermofrictional milling process using ANSYS WB software. [Text] // Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia. – 2017. – Vol. 47. – № 2. – P. 24–33.

7 **Маздубай А. В., Мусаев М. М. и др.** Исследование устойчивости диска при термофрикционной резке с применением ПО ANSIS / Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – Алматы : Изд-во КазАТК, 2015. – № 4(94) . – С. 35–43.

8 **Zhang Y., Mabrouki T., Nelias D., Gong Y.** FE-model for Titanium alloy (Ti-6Al-4V) cutting based on the identification of limiting shear stress at tool-chip interface. [Text] // Springer-Verlag France. – 2010.

9 **Ducobu F., Filippi E., Riviere-Lorphevre E.** Modelisation de l'influence de la profondeur de coupe en micro-coupe orthogonale. [Text]. – 19eme Congres Frangais de Mecanique // Marseille 2009. – P. 24–28.

10 **Bacaria J. L.** Un modele comportemental et transitoire pour la coupe des metaux. These presentee pour obtenir le titre de Docteur. Specialite : genie mecanique. - Toulouse, 2001.

11 **Khaymovich A. I., Balyakin A. V., Kondratev A. I.** Methodology of rheological material properties phenoinenological modeling at high speed cutting by reverse analysis [Text] // Research Journal of Applied Sciences, 2014. – 9(11). – P. 753–760.

12 **Permanasari, A. A., Puspitasari, P., Choiron, M. A., Andokoa and Affandi, M. T.** The modeling and optimization of the hot rolling process of A36 structural steel by using response surface methodology (Conference Paper) [Text]. // MATEC Web of Conferences, 204. – 2018, 07018.

REFERENCES

1 **Kuanov, I. S., Sherov, K. T., Sagitov, A. A., Tusupova, S. O., Mendaliyeva, S. I.** Eksperimental'noye issledovaniye tverdosti obrabotannoy poverkhnosti pri termofriktsionnom frezerovanii s impul'snym okhlazhdeniyem stali HARDOX 450 [Experimental study of the hardness of the machined surface during thermofriction milling with pulse cooling of HARDOX 450 steel]. [Text] // Nauka i

tekhnika Kazakhstana. – Pavlodar: Izd-vo «KEREKU» PGU im. S. Toraygyrova, 2025. – № 1. – P. 116–128. – https://doi.org/10.48081/BNPE4061

2 **Sherov K. T., Kuanov I. S., Sagitov A. A., Imanbayev Ye. B., Bobeyev A. B.** Issledovaniye sherokhovatosti obrabotannoy poverkhnosti pri termofriktsionnom frezerovanii s impul'snym okhlazhdeniyem stali HARDOX 450 [Study of the surface roughness of the machined surface during thermofriction milling with pulse cooling of HARDOX 450 steel] [Text] // Trudy universiteta. – Karaganda: Izd-vo KarTU, 2025. – № 2(99). – P. 41–47. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2025_2_41

3 **Kushnazarov I. K., Sherov K. T., Altynbayev R. R.** Tekhnologiya termofriktsionnogo frezerovaniya s vysokochastotnym okhlazhdeniyem [Technology of thermofriction milling with high-frequency cooling]. [Tekst] // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків, 2007. – Вип.2(15). – P. 134–139.

4 **Sherov K. T., Sikhimbayev M. R.** Perspektivnaya tekhnologiya izgotovleniya bazovykh detaley [Advanced technology for manufacturing basic parts]. – [Text] – Germaniya : Izdatel'stvo Palmarium Asademis Publishing, 2013. – 267 p.

5 **Ainabekova S., Myrzakhmet B., Bekzhanov Y., Gabdyssalik R., Mazdubay A.** и др. Research of temperature distribution in the process of thermofrictional cutting of titanium alloy TI-5553. [Text] // Journal of Applied Engineering Science, (2022) 20(2). – P. 400–407. – https://doi.org/10.5937/jaes0-32723.

6 **Sherov K. T., Sikhimbayev M. R., Sherov A. K., Donenbayev B. S., Rakishev A. K., Mazdubai A. B., Musayev M. M., Abeuova A. M.** Matematical modeling of thermofrictional milling process using ANSYS WB software. [Text] // Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia. – 2017. – Vol. 47. – № 2. – P. 24–33.

7 **Mazdubay A. V., Musayev M. M. i dr.** Issledovaniye ustoychivosti diska pri termofriktsionnoy rezke s primeneniyem PO ANSIS [Study of disk stability during thermofriction cutting using ANSYS software] / Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpayeva. – Almaty : Izd-vo KazATK, 2015. – № 4(94) . – P. 35–43.

8 **Zhang Y., Mabrouki T., Nelias D., Gong Y.** FE-model for Titanium alloy (Ti-6Al-4V) cutting based on the identification of limiting shear stress at tool-chip interface. [Text] // Springer-Verlag France. – 2010.

9 **Ducobu F., Filippi E., Riviere-Lorphevre E.** Modelisation de l'influence de la profondeur de coupe en micro-coupe orthogonale. [Text]. – 19eme Congres Frangais de Mecanique // Marseille 2009. – P. 24–28.

10 **Bacaria J. L.** Un modele comportemental et transitoire pour la coupe des metaux. These presentee pour obtenir le titre de Docteur. Specialite : genie mecanique. - Toulouse, 2001.

11 **Khaymovich A. I., Balyakin A. V., Kondratev A. I.** Methodology of rheological material properties phenoinenological modeling at high speed cutting by reverse analysis [Text] // Research Journal of Applied Sciences, 2014. – 9(11). – P. 753–760.

12 **Permanasari, A. A., Puspitasari, P., Choiron, M. A., Andokoa and Affandi, M. T.** The modeling and optimization of the hot rolling process of A36 structural steel by using response surface methodology (Conference Paper) [Text]. // MATEC Web of Conferences, 204. – 2018, 07018.using response surface methodology (Conference Paper) [Text] // MATEC Web of Conferences, 204 (2018), 07018.

20.01.26 ж. баспаға түсті.
20.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
09.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

И. С. Куанов[1], Б. С. Доненбаев[2], А. К. Шеров[3],
****С. О. Тусупова[4], А. Б. Бобеев[5]***
[1,3,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[2]Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
Поступило в редакцию 20.01.26.
Поступило с исправлениями 20.01.26.
Принято в печать 09.02.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ТЕРМОФРИКЦИОННОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ СТАЛИ HARDOX 450

В данной статье представлено математическое моделирование процесса термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением стали HARDOX 450 с использованием программного обеспечения ANSYS Workbench, позволяющее в динамическом режиме исследовать тепловые и физические процессы, протекающие в зоне резания. Разработанная методика ориентирована на исследование тепловых процессов в зоне резания и определение оптимальных режимов резания при термофрикционном фрезеровании с импульсным охлаждением высокопрочных износостойких сталей на примере стали HARDOX 450.

Для выполнения исследования из множества существующих моделей разрушения при резании использован критерий, впервые предложенный профессором В.Л. Колмогоровым, адаптированный к условиям больших пластических деформаций и высоких температур. С целью повышения вычислительной эффективности предложена упрощённая математическая модель, включающая два объекта: заготовку в форме параллелепипеда из стали HARDOX 450 и режущую кромку фрезы трения в виде пластины.

В модели учитывался коэффициент трения между режущей кромки фрезы трения (пластиной) и заготовкой, принятый равным μ = 0,4. Для анализа температурного поля в подконтактном слое заготовки были введены координаты девяти характерных точек с равномерным шагом в локальной

системе координат. В результате моделирования получены значения контактной температуры в указанных точках при различных частотах вращения фрезы трения.

Результаты исследования показали возможность эффективного управления тепловыми процессами при термофрикционном фрезеровании с импульсным охлаждением стали HARDOX 450.

Ключевые слова: термофрикционное фрезерование, импульсное охлаждение, HARDOX 450, температура, модель разрушения, конечно-элементная сетка, математическая модель, теплопроводность.

I. S. Kuanov[1], B. S. Donenbaev[2], A. K. Sherov[3],
****S. O. Tussupova[4], A. B. Bobeev[5]***
[1,3,5]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana
[2]A. Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 20.01.26.
Received in revised form 20.01.26.
Accepted for publication 09.02.26.

STUDY OF TEMPERATURE IN THE ZONE OF THERMO-FRICTION MILLING WITH PULSE COOLING OF HARDOX 450 STEEL

This article presents the mathematical modeling of thermo-frictional milling with pulse cooling of HARDOX 450 steel using ANSYS Workbench software. The model enables dynamic investigation of the thermal and physical processes occurring within the cutting zone. The developed methodology is focused on analyzing heat distribution during the cutting process and determining optimal parameters for thermo-frictional milling with pulse cooling for high-strength, wear-resistant steels, specifically exemplified by HARDOX 450.

To perform the study from a variety of existing models of fracture during cutting, a criterion was used that was first proposed by Professor V. L. Kolmogorov and adapted to conditions of large plastic deformations and high temperatures. In order to increase computational efficiency, a simplified mathematical model was proposed, including two objects: a parallelepiped-shaped workpiece made of HARDOX 450 steel and the cutting edge of a friction milling cutter in the form of a plate.

The model took into account the friction coefficient between the cutting edge of the friction cutter (plate) and the workpiece, assumed to be $\mu = 0.4$. To analyze the temperature field in the subcontact layer of the workpiece, the coordinates of nine characteristic points were entered at uniform intervals in the local coordinate system. As a result of modeling, the contact temperature values at these points were obtained at different friction cutter rotation frequencies.

The results of the study showed the possibility of effective thermal process control during thermo-friction milling with pulse cooling of HARDOX 450 steel.

Keywords: thermal friction milling, pulse cooling, HARDOX 450, temperature, model of fracture, finite element mesh, mathematical model, thermal conductivity.

FTAMP 55.69.01
https://doi.org/10.48081/BGQF1912

Б. Маратұлы[1], Б. Н. Азаматов[2], М. С. Муздыбаев[3],
Г. В. Кустарев[4], *Ж. А. Бекмырза[5]
[1,2,3]Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[4]Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университеті,
Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.;
[5]Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай облыстық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2506-2545
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1787-0921
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7804-7581
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5086-4127
*e-mail: studentkp@inbox.ru

МАГНЕТРОНДЫҚ ТҰНДЫРУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІ ЖӘНЕ АЛЫНҒАН ЖАБЫНДАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН САЛЫСТЫРУ

Металл өңдеу өнеркәсібінде сумен араласатын майлау-салқындату сұйықтықтарының (МСС) микробиологиялық ластануы және биоқабыршақтардың түзілуі маңызды мәселе болып табылады. Бұл үдеріс МСС қасиеттерінің нашарлауына, коррозияға және жабдықтың жеделдетілген механикалық тозуына әкеледі. Бұл мәселе сандық бағдарламалық басқаруы (СББ) бар заманауи станоктардың дәлдік түйіндерінің мерзімінен бұрын істен шығуына және өңдеу сапасының төмендеуіне тікелей әсер етеді. МСС жүйелерінің биологиялық ластануының алдын алу үшін магнетрондық тұндыру әдісімен алынған бактерицидтік Ta-Cu жабындарының технологиялық параметрлерін зерттеу және тиімділігін бағалау жұмысы жүргізілді.

Тұндыру үдерісі EPOS-PVD-440 қондырғысында үш түрлі режимде жүргізілді. Тұндыру үдерісінде жоғары тазалықтағы тантал және мыс материалдары қолданылды. Жабындардың химиялық құрамы энергия-дисперсиялық анализаторы бар сканерлеуші электрондық микроскоп арқылы талданды. Бактерицидтік тиімділікті бағалау үшін үлгілерді бактериялық суспензиямен бірлесіп өсіру және колонияларды санау әдісі қолданылды.

Зерттеу барысында массасы бойынша орташа есеппен 89,1 % тантал және 9,6 % мыс мөлшері бар тұрақты Ta-Cu бинарлы жүйесінің қалыптасуы расталды. Эксперименттік үлгілердің барлығы бақылау тобымен салыстырғанда айқын бактерицидтік белсенділік көрсетті. Сонымен қатар, әртүрлі технологиялық режимдер үшін энергия тиімділігін бағалау мақсатында меншікті тұтынылатын қуат есептелді.

Кілтті сөздер: жабындар, Та-Си, майлау-салқындату сұйықтықтары, СББ станогі, магнетрондық қондырғы.

Кіріспе

Микробиологиялық ластану сумен араласатын майлау-салқындату сұйықтықтары (МСС) үшін металл өңдеу өнеркәсібінде маңызды мәселе болып табылады. МСС айналым жүйелеріне тиісті техникалық қызмет көрсету салқындатқыштардың қызмет ету мерзімін едәуір ұзартуға және өңделетін бөлшектер бетінің қажетті сапасын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. МСС ортасында микроорганизмдердің негізгі тіршілік ету формасы биоқабыршақтар — резервуарлардың бетіне, машина бөлшектеріне және бір-біріне жабысқан күрделі түзілімдер болып табылады.

Биоқабыршақтар дәстүрлі түрде микробиомның өсуін бақылау үшін МСС қоспалары ретінде қолданылатын биоцидтердің әсеріне өте жоғары төзімділігімен сипатталады. Биоқабыршақ түріндегі микробтық өскіндердің пайда болуы жүйелердің ластану деңгейін бағалау әдістерін қайта қарауды және металл өңдеу үдерістерінде биологиялық ластанудың алдын алудың инновациялық тәсілдерін әзірлеуді талап етеді [1;2;3].

Жабдықтың қол жетімсіз түйіндерінде биоқабыршақ түрінде бекініп қалған микроорганизмдердің қайталама ластанудың тұрақты көзі қызметін атқаратынын көрсетеді. Биоцидтік қоспаларды қолдану тек уақытша шара болып табылатындығы туралы факт зерттеудің маңыздылығын белгілейді, ал бактерицидтік жабындар тікелей жанасу беттерінде микрофлораның тұрақты түрде басылуын қамтамасыз етеді [4].

Тұрақты биоқабыршақтардың пайда болуымен қатар, заманауи МСС құрамындағы микроорганизмдердің тіршілік әрекеті олардың физика-химиялық қасиеттерінің қайтымсыз өзгеруіне әкеледі [5]. Pseudomonas, Enterobacter және Staphylococcus тектес бактериялардың метаболизм үдерістері сұйықтықтың майлау және салқындату қабілетіне жауап беретін қоспалардың белсенді ыдырауын тудырады.

Зерттеулер микрофлораның қарқынды өсуі pH деңгейінің төмендеуімен қатар жүретінін көрсетеді. Эмульсияның тұрақсыздығы оның коррозияға қарсы қасиеттерінің жоғалуына әкеледі. Бұл тек микробиологиялық индукцияланған коррозияның дамуы үшін ғана емес, сонымен қатар сандық бағдарламалық басқаруы бар станоктарының аспаптары мен бөлшектерінің жеделдетілген механикалық тозуы үшін қолайлы жағдай жасайды [6].

Биомасса мен оның ыдырау өнімдері МСС беру жүйесіндегі тар арналарды бітеп тастауы мәселені күрделендіре түседі. Сүзгілер мен құбырлардың биологиялық ластануы жүйедегі қысымның төмендеуіне, кесу аймағындағы температуралық режимнің бұзылуына және соның салдарынан өңдеу дәлдігінің төмендеуіне және бөлшектер бетінің кедір-бұдырлығының нашарлауына әкеледі (1-сурет). Сондықтан жабдық конструкциясына бактерицидтік Та-Cu жабындары бар беттерді енгізу технологиялық үдерістің тұрақтылығын қамтамасыз ету және

металл өңдеу жабдығының дәлдік түйіндерінің мерзімінен бұрын істен шығуын болдырмау үшін стратегиялық маңызды шешім болып табылады [7; 8].

1-сурет – DMG MORI CTX 510 ecoline станогындағы МСС арнасы

Өнеркәсіптік жабдықтар мен машиналарды қолданудың қазіргі заманғы жағдайында тиімді бактерицидтік жабындарды әзірлеу оны тұндырудың технологиялық әдісін негіздеуді талап етеді [9]. МСС-мен жанаса отырып жұмыс істейтін жабдыққа арналған ұзақ мерзімді бактерицидтік жабындарды жасау міндетіне келесі параметрлер қолайлы болуы тиіс: механикалық беріктік, әртүрлі төсеніштерге адгезия, коррозияға төзімділік және экономикалық тиімділік [10].

Материалдар мен әдістері

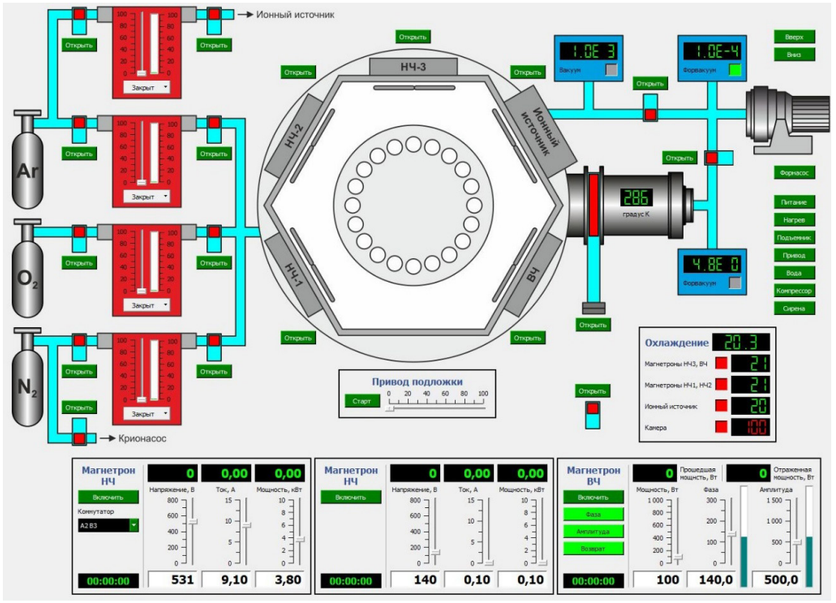
EPOS-PVD-440 қондырғысындағы технологиялық цикл герметикалық вакуумдық камерада өтеді. Тұндыру 3 режимнен тұрады. Оның негізгі көрсеткіштері 1-кестеде берілген. Жұқа қабықшалы құрылымдарды қалыптастыру үшін қажетті жағдайларды жасау және қолдау жоғары вакуумдық сору жүйесінің жұмысынан басталады. Мұнда негізгі атқарушы түйін болып Cryo-Plex 8/8LP криогендік сорғысы табылады.

1-кесте – Тұндыру параметрлері

Параметр	Сипаттамасы
Қондырғы жүйесі	EPOS-PVD-440 (Beams&Plasmas, Новосібір)
Тұрақты ток магнетрондары	3 дана (өлшемдері 472×132×18 мм)
Нысаналар (Targets)	Жоғары тазалықтағы тантал (99,999%) және мыс (99,999%)
Тантал магнетронының қуаты	2 кВт
Мыс магнетронының қуаты	0,33 кВт (TaCu-1 үшін); 0,46 кВт (TaCu-2 үшін); 0,8 кВт (TaCu-3 үшін)
Тұндыру уақыты	60 минут
Базалық қысым	7×10^{-4} Па
Жұмыс қысымы	$1{,}8\times10^{-1}$ Па

Төсеніштің айналу жылдамдығы	8 айн/мин
Магнетрон мен төсеніш арақашықтығы	~300 мм

Криогендік сорғы қондырғының камерасымен және форвакуумдық сорғымен жалғанған. Криогендік сорғыны салқындату үдерісін іске қосу 5 Па вакуумға қол жеткізілгеннен кейін жүреді. Үдерісті басқару магниттік-шашыратқыш қондырғының бағдарламалық жасақтамасының көмегімен жүргізіледі (3-сурет). Үлгілерді бетін алдын ала дайындау иондық бомбалау әдісімен жүзеге асырылады, бұл үшін иондық көз қолданылады. Иондық көзді басқару APEL-IS-4DC-3500 коректендіру блогы арқылы жүреді. Бұл модуль шығыс қуатын 3,5 кВт-қа дейін генерациялауға қабілетті, кернеуді 35-тен 3500 В-қа дейінгі кең ауқымда реттеуді және ток күшін 1,15 А-ге дейін қолдауды қамтамасыз етеді.



3-сурет – EPOS-PVD-440 магнетрондық-шашыратқыш қондырғысының басқару экраны

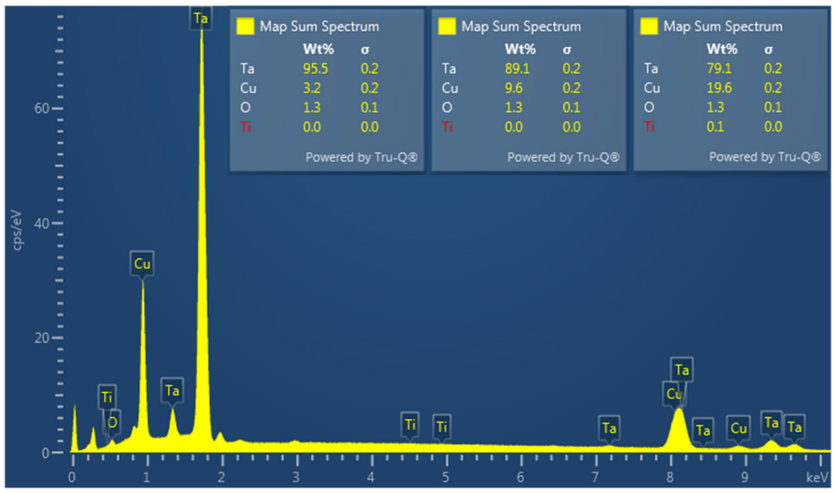
Материалды тікелей тұндыру магнетрондардың плазмалық разрядында жүзеге асырылады, оларды электр тогымен қоректендіруді MPS-3-10-12-800 РСх импульстік блогы қамтамасыз етеді. Аспап пульстік бірполярлы ток режимінде жұмыс істейді және зияткерлік доғаны сөндіру жүйесімен жабдықталған. Бұл жоғары қуат кезінде нысананы шашыратудың тұрақтылығын қолдауға мүмкіндік береді. Осы арқылы жабындағы тамшы фазасының алдын алады. Блоктың техникалық мүмкіндіктері берілген технологиялық параметрлерге байланысты токтың, кернеудің немесе қуаттың дәлдікпен тұрақтандырылуын қамтиды.

Үлгілердің химиялық құрамын талдау үшін Oxford Instruments компаниясының (Ұлыбритания) энергия-дисперсиялық анализаторымен жабдықталған Zeiss (Германия) автоэлектронды эмиссиялық сканерлеуші электрондық микроскопы қолданылды.

Бактерицидтік тиімділікті сандық бағалау үшін үлгілерді бактериялық суспензиямен қоректік ортада бірлесіп өсіру жүргізілді. Бактериялардың бастапқы концентрациясы 5×10^5 КОЕ/мл құрады. Ta-Cu1, Ta-Cu2, Ta-Cu3 және жабынсыз бақылау үлгісін ортаға батырып, шейкерде 37 °С температурада 24 сағат бойы инкубациялады. Сынамаларды іріктеу белгіленген уақыт аралықтары арқылы жүргізілді. Бактериялардың тіршілік қабілеттілігі 48 сағат инкубациядан кейін өскен колонияларды санау арқылы бағаланды.

Нәтижелер және талқылау

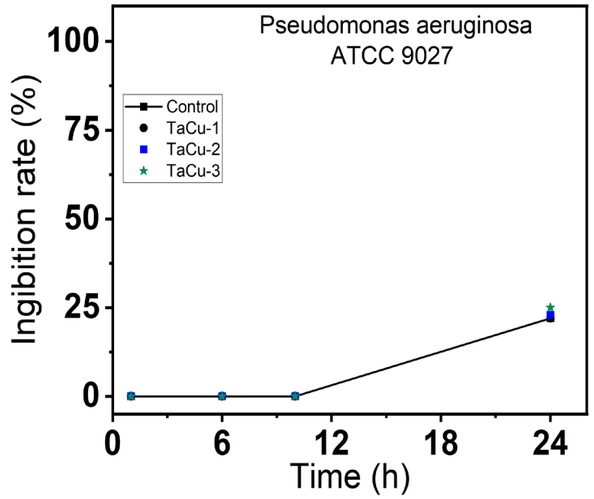
Жабындарды тұндырудың эксперименттік үдерісінің нәтижелерін талдау алынған үлгілерді энергодисперсиялық спектроскопия әдісімен кешенді бағалаудан басталды, бұл тұрақты Ta-Cu бинарлы жүйесінің қалыптасуын растауға мүмкіндік берді. Элементтік құрамның сандық көрсеткіштері тантал фазасының басым екендігін куәландырады, оның орташа мөлшері масса бойынша 89,1 % деңгейінде тіркелді, бұл танталға тән жоғары механикалық қасиеттері бар жабынның қатты қаңқасының қалыптасуын қамтамасыз етеді. Функционалды компонент ретінде мыстың орташа көлемі 9,6 % мөлшерінде енгізілуі бірлесіп шашыратудың таңдалған режимдерінің тиімділігін растайды (4-сурет).



4-сурет – Тұндырудың әртүрлі режимдерінде алынған Ta-Cu жабындарының салыстырмалы ЭДС-спектрлері

Эксперимент барысында әртүрлі магнетрондық тұндыру режимдерінде алынған Ta-Cu жүйесіндегі жабындардың бактерияға қарсы тиімділігі бағаланды. Ұсынылған диаграммадан көрініп тұрғандай, бақылау тобы тежегіш әсер

көрсетпеді, бұл бактерия колонияларының қарқынды өсуімен расталады (5-сурет). Сонымен қатар, Ta-Cu жабындары бар барлық эксперименттік үлгілер айқын бактерицидтік белсенділік көрсетті.



5-сурет – Ta-Cu жабындарының бактерияға қарсы белсенділігінің тұндырудың технологиялық режимдеріне тәуелділігі

Зерттелген режимдердің энергетикалық шығындарын есептеу өндіріске тікелей пайдасы бар. Магнетрондық разрядтың меншікті қуаттың артуы шашыратылған бөлшектердің кинетикалық энергиясын және олардың ағынының тығыздығын тікелей арттырады, бұл жабынның қалыптасу жылдамдығын жоғарылатуға мүмкіндік береді. Алайда қуаттың шамадан тыс өсуі нысана материалының жылулық қасиеттерімен шектеледі. Меншікті қуатты есептеу плазмалық разрядтың тұрақтылығын сақтай отырып, үдерістің жоғары өнімділігін теңестіруге мүмкіндік береді. Нысана ауданы S=47,2 см · 13,2 см = 623 см² болғанда, магнетронның меншікті қуаты:

$$\text{Ta (2 кВт): } W_{Ta} = \frac{2000\ \text{Вт}}{623\ \text{см}^2} \approx 3{,}21\ \text{Вт/см}^2$$

$$\text{Cu-1 (0,33 кВт): } W_{spec,Cu1} = \frac{330}{623} \approx 0{,}53\ \text{Вт/см}^2$$

$$\text{Cu-2 (0,46 кВт): } W_{Cu} = \frac{460}{623} \approx 0{,}74\ \text{Вт/см}^2$$

$$\text{Cu-3 (0,80 кВт): } W_{Cu3} = \frac{800}{623} \approx 1{,}28\ \text{Вт/см}^2$$

Жабын ауданының бірлігіне шаққандағы меншікті тұтынылатын қуат осы қалыңдықтағы 1 м² жабынды алуға қанша энергия жұмсалғанын көрсетеді. Бұл көрсеткіш әзірленген технологияның энергия тиімділігін бағалау критерийлерінің бірі болып табылады.

$$E_{spec} = \frac{(P_{Ta} + P_{Cu} + P_{aux}) \cdot T}{A_{total}} \quad (1)$$

$$\text{TaCu-1: } E_{spec1} = (2 + 0{,}33 + 7) \cdot 1/0{,}678 \approx 13{,}76\ \text{кВт·сағ/м}^2$$

$$\text{TaCu-2: } E_{spec2} = (2 + 0{,}46 + 7) \cdot 1/0{,}678 \approx 13{,}95\ \text{кВт·сағ/м}^2$$

$$\text{TaCu-3: } E_{spec3} = (2 + 0{,}80 + 7) \cdot 1/0{,}678 \approx 14{,}45\ \text{кВт·сағ/м}^2$$

Қаржыландыру

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант № AP25794661 – Медицинада қолданылатын мата материалдарына бактерицидті қасиеті бар наножабындарды әзірлеу).

Қорытынды

Зерттеу барысында магнетрондық тұндыру әдісі арқылы алынған бактерицидтік Ta-Cu жабындарының технологиялық параметрлері мен сипаттамаларына кешенді талдау жүргізілді. EPOS-PVD-440 қондырғысында Ta-Cu бинарлы жүйесінің тұрақты жабындарын алудың оңтайлы режимдері анықталды.

Эксперименттік үлгілердің барлығы бақылау тобымен салыстырғанда айқын бактерияға қарсы әсер көрсетті. Әртүрлі технологиялық режимдер үшін меншікті тұтынылатын қуат есептелді. Станоктардың дәлдік түйіндеріне бактерицидтік жабындарды енгізу МСС-ның қызмет ету мерзімін ұзартуға, жабдықтың коррозияға ұшырауын бәсеңдетуге және өңдеу үдерісінің тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Microbiological And Physicochemical Analyses Of Oil Contaminated Soil From Major Motor Mechanic Workshops In Benin City Metropolis,Edo State, Nigeria. J. Appl. Sci. Environ. Manage 2011, 15 (4), P. 597–600.

2 **Williams, J. O., Akemi, P. P.** Microbiological and Physicochemical Evaluation of Oil-Polluted Soil from Major Auto Mechanic Shops in Port Harcourt Metropolis, Rivers State, Nigeria. J. Adv. Microbiol. 2020. – P. 1–10. – https://doi.org/10.9734/jamb/2020/v20i330222.

3 **Mary, F. I. Oluwafemi, O. J. Veronica, O. O.** Microbiological and Physiochemical Analyses of Oil Contaminated Soil from Major Auto Mechanic Workshops in Ado Ekiti Metropolis. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2022. – 15 (1), P. 233–238. – https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.15.1.0695.

4 **Marchand, G., Lavoie, J., Racine, L., Lacombe, N., Cloutier, Y., Bélanger, E., Lemelin, C., Desroches, J.** Evaluation of Bacterial Contamination and Control Methods in Soluble Metalworking Fluids. J. Occup. Environ. Hyg. 2010, 7 (6), P. 358–366. – https://doi.org/10.1080/15459621003741631.

5 **Shen, Y.; Zhang, W.; Wu, L.; Dong, Y.; Guo, G.; Dong, L.; Guo, Z.** Microbial Proliferation Deteriorates the Corrosion Inhibition Capability, Lubricity, and Stability of Cutting Fluid. Front. Microbiol. 2025. – P. 16. – https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1522265.

6 **Telegdi, J., Shaban, A., Trif, L.** Microbiologically Influenced Corrosion (MIC). In Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies; Elsevier, 2017. – P 191–214. – https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00008-5.

7 **Schwarz, M., Dado, M., Hnilica, R., Veverková, D.** Environmental and Health Aspects of Metalworking Fluid Use, 2015. – Vol. 24.

8 **Rosenman, K.** Occupational Diseases in Individuals Exposed to Metal Working Fluids. Curr. Opin. Allergy Clin. Immunol, 2015. – 15 (2). – P. 131–136. – https://doi.org/10.1097/ACI.0000000000000140.

9 **Mascarenhas, L. A. B., dos Santos, L. M. C., Oliveira, F. O., Rodrigues, L. de A. P., Neves, P. R. F., Moreira, G. A. F., Santos, A. A. B., Lobato, G. M., Nascimento, C., Gerhardt, M., Machado, B. A. S.** Evaluation of the Microbial Reduction Efficacy and Perception of Use of an Ozonized Water Spray Disinfection Technology. Sci. Rep. – 2022. – 12 (1), P. 13019. – https://doi.org/10.1038/s41598-022-16953-2.

10 **Trafny, E. A., Lewandowski, R., Kozłowska, K., Zawistowska-Marciniak, I., Stępińska, M.** Microbial contamination and biofilms on machines of metal industry using metalworking fluids with or without biocides. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015. – 99. – P. 31–38. – https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.12.015.

17.01.26 ж. баспаға түсті.
22.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Б. Маратулы[1], Б. Н. Азаматов[2], М. С. Муздыбаев[3], Г. В. Кустарев[4], *Ж. А. Бекмырза[5]
[1,2,3]Восточно-Казахстанский технический университет,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[4]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
Российская Федерация, г. Москва;
[5]Костанайский областной университет имени Ахмета Байтурсынулы,
Республика Казахстан, г. Костанай
Поступило в редакцию 17.01.26.
Поступило с исправлениями 22.01.26.
Принято в печать 20.02.26.

ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МАГНЕТРОННОГО ОСАЖДЕНИЯ И СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУЧЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В металлообрабатывающей промышленности микробиологическое загрязнение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и последующее образование устойчивых биопленок представляют собой критическую проблему. Данный процесс неизбежно ведет к существенному ухудшению эксплуатационных характеристик СОЖ, интенсивному развитию коррозии и ускоренному механическому износу производственного оборудования. Установлено, что эта проблема напрямую влияет на преждевременный выход из строя прецизионных узлов современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), а также приводит к заметному снижению качества финишной обработки деталей.

С целью эффективного предотвращения биологического загрязнения систем циркуляции СОЖ была проведена комплексная работа по изучению технологических параметров и оценке антибактериальной эффективности бактерицидных Ta-Cu покрытий, полученных методом магнетронного распыления. Процесс осаждения тонкопленочных структур осуществлялся на специализированной установке EPOS-PVD-440 в трех различных технологических режимах. В ходе экспериментов применялись высокочистые мишени из тантала и меди. Химический состав полученных покрытий детально анализировался с помощью сканирующего электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным анализатором. Для количественной оценки бактерицидной эффективности применялся метод совместного культивирования образцов с бактериальной суспензией с последующим подсчетом выживших колоний.

В результате проведенных исследований было подтверждено формирование стабильной бинарной системы Ta-Cu со средним массовым содержанием тантала 89,1 % и меди 9,6 %. Все экспериментальные образцы продемонстрировали выраженную бактерицидную активность по сравнению с контрольной группой. Кроме того, для оптимизации процесса был произведен расчет удельной потребляемой мощности в различных технологических режимах, что позволило оценить общую энергоэффективность метода.

Ключевые слова: покрытия, Ta-Cu, смазочно-охлаждающие жидкости, станок с ЧПУ, магнетронная установка.

B. Maratuly[1], B. N. Azamatov[2], M. S. Muzdybaev[3], G. V. Kustarev[4], *Zh. A. Bekmyrza[5]
[1,2,3]East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan, Oskemen;
[4]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Russian Federation, Moscow;
[5]Akhmet Baitursynov Kostanay Regional University, Republic of Kazakhstan, Kostanay.
Received 17.01.26.
Received in revised form 22.01.26.
Accepted for publication 20.02.26.

PARAMETERS OF THE MAGNETRON SPUTTERING PROCESS AND COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS OF THE RESULTING COATINGS

In the metalworking industry, the microbiological contamination of metalworking fluids (MWFs) and the subsequent formation of stable biofilms represent a significant technical challenge. This biological degradation leads to the deterioration of the operational properties of MWFs, induces severe corrosion, and causes accelerated mechanical wear of industrial equipment. It has been established that these processes directly impact the premature failure of precision components in modern computer numerical control (CNC) machines and result in a reduction of the overall quality of metal processing.

To prevent the biological contamination of MWF circulation systems, research was conducted to evaluate the technological parameters and effectiveness of bactericidal Ta-Cu coatings produced via the magnetron sputtering method. The deposition process was performed using the EPOS-PVD-440 system across three distinct technological modes, utilizing high-purity tantalum and copper targets. The chemical composition of the resulting coatings was analyzed using a scanning electron microscope equipped with an energy-dispersive X-ray spectrometer (EDS). To assess the antimicrobial efficiency, a method of co-culturing the samples with bacterial suspensions followed by colony counting was employed.

The research results confirmed the formation of a stable binary Ta-Cu system with an average mass concentration of 89.1 % tantalum and 9.6 % copper. All experimental samples exhibited significant bactericidal activity compared to the control group. Furthermore, the specific power consumption was calculated for various technological modes to evaluate the energy efficiency of the process. The findings justify that the application of bactericidal coatings to precision machine parts can extend the service life of MWFs and enhance the stability of the metalworking process.

Keywords: coatings, Ta-Cu, metalworking fluids, CNC machine, magnetron unit.

FTAMP 55.24.99
https://doi.org/10.48081/BGQF1913

С. И. Мендалиева[1], К. Т. Шеров[2], *Д. И. Бердімұратова[3], А. Турусбекова[4], В. А. Хан[5]
[1,2,3,5]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[4]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4819-8656
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0209-180X
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9612-8487
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8007-1690
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4198-2712
*e-mail: d.berdimuratova@kazatu.edu.kz

АГРОӨНЕРКӘСІПТІК КЕШЕННІҢ ЖӨНДЕУ ӨНДІРІСІНДЕ АДДИТИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ҚОЛДАНУ ӨЗЕКТІЛІГІ ТУРАЛЫ

Мақалада аймақтар, агроөнеркәсіптер мен қызмет салалары бойынша аддитивті технологиялар мен 3D басып шығарудың дамуын талдау және болжау, қолдану әдісі мен материалдардың түрлері бойынша аддитивті әдістердің жүйелі жіктелуі келтірілген. Әлемде аддитивті технологиялардың дамуына шолу жасалады, сонымен қатар салыстыру үшін аддитивті технологияның әртүрлі әдістері қарастырылады. Сонымен қатар, аддитивті процестердің параметрлері, материалдардың қасиеттері және ағымдағы мәселелер және аддитивті технологияларды қолдануды дамыту бойынша зерттеулерге шолу талқыланады. Жалпыланған белгілер бойынша аддитивті технологиялардың даму кезеңдерін бөлудің авторлық нұсқасы ұсынылған. Ауыл шаруашылығы техникасының бөлшектерін қалпына келтіру үшін АМ (Additive manufacturing)-технологияларды пайдаланудың өзектілігі негізделген, жөндеу өндірісінде АМ-технологияларды 3D басып шығаруды қолдануды оңтайландыру және қазіргі жағдайда ауыл шаруашылығы техникасына техникалық қызмет көрсету мен бөлшектерді жөндеуді және өндіруге аддитивті технологияларды қолдануды ұйымдастырудың ұтымды жүйесін құру жөніндегі міндеттер тұжырымдалған.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 қаржыландыру тақырыбы аясында орындалды.

Кілтті сөздер: Жөндеу, қалпына келтіру, аддитивті технологиялар, 3D басып шығару, агроөнеркәсіптік кешен.

Кіріспе

Әлем бойынша аддитивті технологиялар нарығының дамуын талдау және болжау. Қазіргі уақытта 3D басып шығарудың мүмкіндіктері мен қолдану аясы үнемі өсіп келеді. Медицина, аэроғарыш, машина жасаудан бастап маржан рифтері мен жиһаздарға дейін бәрі осы технологияларға әсер етті. Өнеркәсіптік 3D басып шығару нарығы көлемінің өсуінің болжамды динамикасы суретте көрсетілген, 2032 жылға қарай бұл көрсеткіш 14 млрд долларға дейін өсетінін көруге болады, бұл бүгінгі күнмен салыстырғанда шамамен 4 есе көп [1; 2].

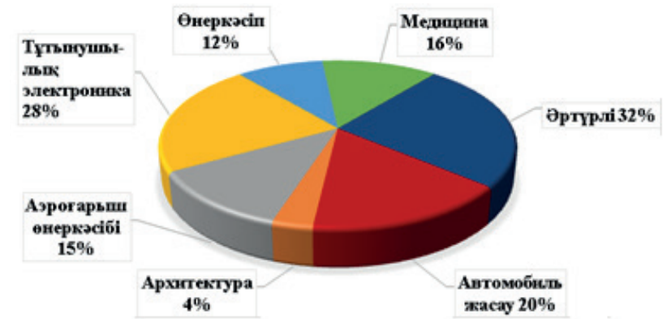
1-сурет – Өнеркәсіптік 3D басып шығару нарығының өсу динамикасы

Аддитивті технологияларды пайдалану салалары шексіз – шоколадты басып шығарудан металл басып шығаруға дейін. Әлемде интернет пайда болғанға дейін 3D басып шығару 1980 жылдары пайда болды. Бірақ интернет ұзақ уақыт бойы өмірдің қарапайым бөлігіне айналды, ал аддитивті технологиялар әлі де кең қолданысқа ие бола алмады. Қазіргі уақытта АМ-технологияларын қолдану салалары аэроғарыш, қорғаныс, машина жасау, медицина, көлік, құрылыс және басқа салалар болып табылады[1; 2].

Аддитивті технологияларды қолдануды дамыту бойынша зерттеулерге шолу. 2000-шы жылдардан бастап кеңістікте төрт координаталық және бес координаталық басып шығаруды қолдануды көздейтін 4D және 5D принтерлер пайда болды [2; 3].

Қазіргі әлемде алғашқы идеялардың пайда болуы мен аддитивті технологиялардың дамуына шолу бүгінгі күнге дейін үш кезеңге бөлуге мүмкіндік береді. Бұл бастапқы кезең (1890–1977ж.ж.) – АМ технологияның негізін қалаған идеялардың пайда болу кезеңі.

2-суретте ел экономикасының әртүрлі салаларындағы аддитивті технологияларды қолдану деңгейі (%) көрсетілген.



2-сурет – Ел экономикасының әртүрлі салаларындағы аддитивті технологияларды қолдану (%)

Екінші кезең (1980 – 2001ж.ж.) – осы саланың қарқынды дамуы. Үшінші кезең 2001жылдан қазіргі уақытқа дейін. Соңғы онжылдықта Ste520 принтері әлемдегі алғашқы 5D жұмыс үстелі принтерін жобалауда белгілі бір жетістіктерге жетті. Оның маңызды жетістігі-үш X, Y және Z координаталық осьтерінің орнына принтер тағы екі жазықтықта басып шығарады. Бес осьті басып шығарудың инновациялық технологиясы әдеттегі 3D басып шығарудан гөрі берік бұйымдар жасауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, авторлардың пікірінше, 5Dtech технологиясымен басып шығару бөлшектердің сапасы пішініне байланысты емес.

2012 жылы Волгоград мемлекеттік техникалық университетінің өндірістік процестерді автоматтандыру кафедрасының (ӨПА) жас ғалымдары А. Дроботов, А. Авдеев, А. Швец дипломды жобалаудан бастап 2016 жылы «Сколково» резиденті болған көп осьті 3D-принтерлер шығаратын өз бизнесін құрды.

Материалдар мен әдістер

Материалдардың, өнімдердің, жүйелердің және қызметтердің кең ауқымы үшін техникалық стандарттарды әзірлеумен айналысатын ASTM International (American Society for Testing and materials) ұйымы аддитивті технологияларды осылайша жіктейді, оларды 7 санатқа бөледі: [4]

1 Material extrusion – «материалды сығу»;

2 Material etting – «материалды шашырату», «реактивті технологиялар»;

3 Binder jetting – «байланыстырғышты шашырату»;

4 Sheet lamination – «Парақ материалдарын біріктіру»;

5 Vat photopolymerization – «ваннадағы фотополимерлеу»;

6 Powder bed fusion – «алдын ала қалыптасқан қабаттағы материалды балқыту»;

7 Directed energy deposition – «тікелей құрылыс орнына тікелей энергия жеткізу».

Бірінші санатқа, мысалы, жоғарыда аталған MJS технологиялары кіреді, оған сәйкес модельді құру орнына қыздырылған экструдер арқылы паста тәрізді құрылыс материалы – металл ұнтағы мен байланыстырғыш-пластификатор қоспасы сығылады. Осылайша салынған жасыл модель («green» – «жасыл» мағынасында, жетілмеген, шикі) дәстүрлі MIM (Metal Injection Molding) технологиясындағыдай

байланыстырғышты алып тастау және одан әрі агломерациялау үшін пешке орналастырылады [5]. Келесі технологияның мысалы Polyjet технологиясы, оған сәйкес модельдік материал – әдетте фотополимер немесе балауыз көп реактивті бас арқылы құрылыс аймағына беріледі. Техникалық әдебиеттерде бұл технология кейде Multi jetting Material деп аталады. Осы барлық технологиялар 3-суретте көрсетілген.

3-сурет – Қосымша технологияларды қабатты қолдану тәсілдері бойынша жалпы жіктеу

Үшінші санатқа сондай-ақ реактивті технологиялар немесе InkJet-технологиялар жатады, мұнда Material jetting технологиясынан айырмашылығы, модельдік материал емес, байланыстырушы реагент (мысалы, ExOne технологиясы) құрылыс аймағына енгізіледі.

Төртінші санатқа құрылыс материалы ретінде парақ материалын, полимерлі пленканы, металл фольганы, қағаз парақтарын және т.б. пайдалануды қамтитын технологиялар кіреді.

Мысал ретінде UAM (Ultrasonic additive manufacturing, Fabrisonic) технологиясы, оған сәйкес жұқа металл пластиналар ультрадыбыспен дәнекерленеді, содан кейін «артық» металл фрезерлеу арқылы жойылады.

Бесінші санатқа сұйық модельдік материалдарды – фотополимерлі шайырларды, атап айтқанда SLA технологиясын (3D Systems) және DLP технологиясын (Digital Light Procession, Envisiontec) пайдалануды көздейтін технологиялар жатады. Бұл «металл» технологиялары емес және бұл жұмыста олар қарастырылмайды.

Алтыншы санатқа лазерді жылу көзі ретінде қолданатын SLS технологияларының көптеген тобы, сондай-ақ электронды сәулені пайдаланатын Arcam немесе жылу көзі қыздыру элементтері болып табылатын SHS (Selective Heat Sintering (Blueprinter) сияқты басқа да лазерлік емес технологиялар кіреді.

Соңғы, жетінші санатқа құрылыс материалы мен оны балқыту үшін энергия бір мезгілде бұйым салынған жерге жеткізілетін технологиялар кіреді. Бұл технологиялар жұмыс органы – басы құрылыс материалы мен энергиясын жеткізу жүйелерімен жабдықталған, әдетте фокусталған лазерлік сәуле (Optomec, POM) немесе электронды сәуле (Sciaky) түріндегі машиналарды қолдануды қамтиды.

Халықаралық қоғамдастықта аддитивті технологиялардың қалыптасқан жіктелуі әлі қабылданған жоқ [6; 7].

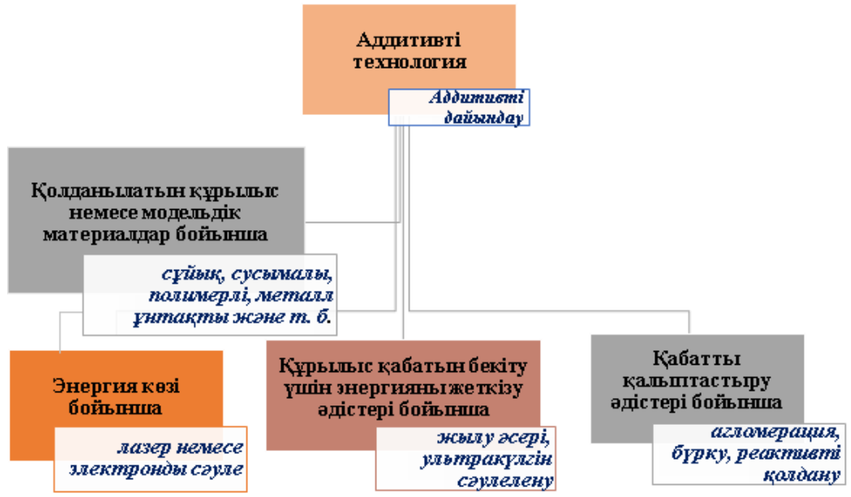
Әр түрлі авторлар оларды келесі белгілер бойынша бөледі:

– қолданылатын құрылыс немесе модельдік материалдар бойынша (сұйық, сусымалы, полимерлі, металл ұнтағы және т. б.);

– энергия көзі бойынша (лазер немесе электронды сәуле);

– құрылыс қабатын бекіту үшін энергияны жеткізу әдістеріне сәйкес (жылу әсерінен, ультракүлгін немесе көрінетін жарықпен сәулелену, байланыстырушы құрам арқылы және т. б.);

– қабатты қалыптастыру әдістері бойынша (4-сурет).



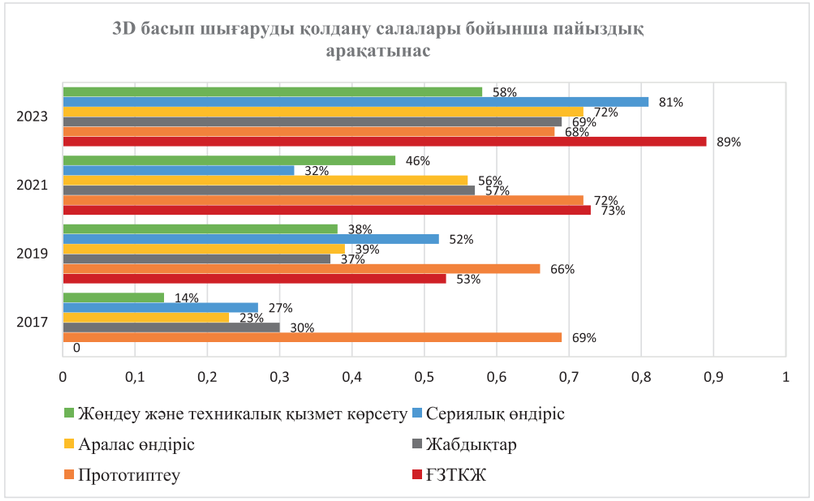
4-сурет – Аддитивті әдістерді жіктеу белгілері

Нәтижелер және талқылау

2024 жылы SU университеттің ғалымдар тобы «Модельдеу және эксперименттік зертеу жолымен процесті оңтайландыра отырып, ауыл шаруашылығы машиналарын жөндеу кезінде аддитивті технологиярды пайдалану» ғылыми жобасы бойынша жұмысты бастады. Аграрлық сектордағы техникалық паркті тұрақты жұмыс жағдайында ұстау қажеттілігін ескере отырып, ауыл шаруашылығы техникасының бөлшектерін қалпына келтіру үшін аддитивті технологияларды қолданудың өзектілігі айқын болады. Қолдану, ең алдымен, технологиялардың экономикалық жағдайына және істен шыққан бөлшектерді

ауыстырудың тиімділігіне байланысты. Әсіресе, істен шығу уақытын қысқарту және машинаның тоқтап қалуына әкеліп соқтыратын бөлшектерді қалпына келтіру тиімділігін арттыру тұрғысынан өте маңызды. Әр түрлі салаларда аддитивті технологияларды қолдану пайызы 5-суретте көрсетілген.

Суреттен 2017 жылдан 2023 жылға дейін жөндеу өндірісінде АМ-технологияларды қолдану 4 еседей артқанын көруге болады. Экономистердің аналитикалық есептері кез-келген ауылшаруашылық өнімдерінің өзіндік құнының едәуір бөлігін жөндеу және техникалық қызмет көрсету шығындары алатындығын көрсетеді. Сондықтан экономикалық тиімділік тұрғысынан тек ауылшаруашылық өнімдерін өндіруде ғана емес, оны өңдеуде де қолданылатын машиналарды жөндеу және жөндеу шығындарын азайту мәселелеріне назар аудару қажет.



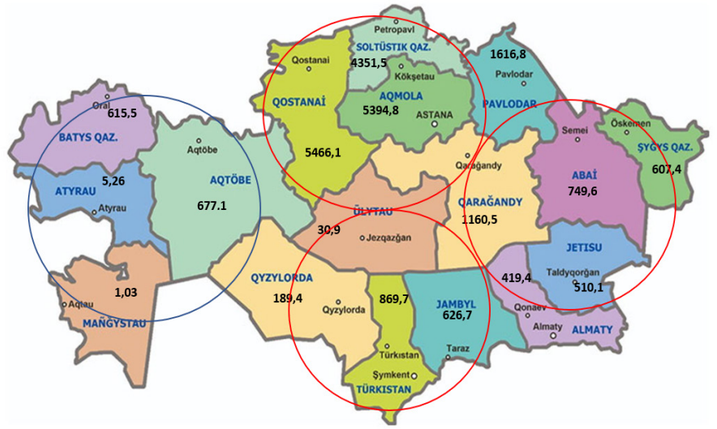
5-сурет – Аддитивті технологияларды өндіріс салалары бойынша пайызбен пайдалану

Өкінішке орай, бүгінде бұл технологияларды жөндеу өндірісінде қолданудың нақты тұжырымдамасы жоқ, бұл өнім өндірісінің сапасы мен тиімділігіне әсер етеді. Бүгінгі күнге дейін дәстүрлі қалпына келтіру технологияларын қолданған кезде, жөндеу құны, әдетте, қолданыстағы жөндеу-қызмет көрсету базасымен, жабдықтармен, жұмысшылардың біліктілігімен, материалдардың құнымен, сондай-ақ қолданылатын қалпына келтіру технологияларымен анықталады. Осы жоба аясында Raise3D Pro2 Plus 3D принтерін пайдалану пластикалық материалдарды қолдана отырып, бөлшектердің қажетті дизайнын басып шығаруға мүмкіндік береді.

Бұл технологиялардың пайдалылығы ауыстыруға сұранысқа ие бөлшектердің белгілі бір қорын құруға мүмкіндік береді. Мұндай резервтік бөлшектер кенеттен істен шығу және шұғыл ауыстыру жағдайлары үшін өте маңызды.

АМ-технологияларын қолданудың осындай жағымды жағын ескере отырып, жөндеу кәсіпорындары резервтік бөлшектердің қоймаларын құра алады, яғни кенеттен істен шығуды жоюға уақыттың аз шығынын қамтамасыз ететін резервтік бөлшектердің белгілі бір қоры. Жөндеу жұмыстарының жеделдігі ауыстырылатын бөлікті тез дайындау арқылы мүмкін болады, ол үшін 3D моделінің электронды нұсқасы және тиісті жабдық қажет. Нәтижесінде жөндеу және қалпына келтіру жұмыстарының тиімділігі артады, бұл ауылшаруашылық өнімдерінің өзіндік құнына әсер етеді.

Машиналар мен жабдықтардың заманауи конструкцияларының бөлшектері басқа материалдардан және басқа әдістерден жаңадан жасалған бөлшектермен оңай ауыстырылатын ерекшеліктермен сипатталады. Бөлшектерді жөндеу мен қалпына келтірудің бұл технологиясы салыстырмалы түрде төмен шығындармен жабдықтың тиісті ресурсын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Машиналарды жөндеуге арналған қосалқы бөлшектерді аддитивті өндіру процесі негізінен машиналардың өзін өндіруге арналған бөлшектерді жасау процесіне ұқсас. Бұл процесті тікелей жүзеге асыруға болады, егер аддитивті технологиялар сізге дайын бөлікті бірден алуға мүмкіндік берсе, сонымен қатар қосымша технологияның көмегімен бөлшекті одан әрі жасау үшін қажетті құрал-жабдықтар немесе құралдар жасалса[8]. Ауылшаруашылық техникасына техникалық қызмет көрсету мен жөндеудің ұтымды жүйесін құру үшін бүкіл аумақты қызыл дөңгелек сызықтармен көрсетілген 4 аймаққа бөлу ұсынылады (6-суретті қараңыз).



6-сурет – Қазақстан Республикасындағы аддитивті технологиялар орталықтары АӨК объектілеріне қызмет көрсетудің өңірлік аймақтары:
1 – «Батыс», 2 – «Солтүстік», 3 – «Шығыс», 4 – «Оңтүстік»

Суретте республиканың облыстары бойынша ауыл шаруашылығы техникасының бірліктерінің саны көрсетілген, ол жерден ең қанықкан аймақ - Солтүстік (16 мыңнан астам бірлік). Бұған Солтүстік Қазақстан, Қостанай, Ақмола және Павлодар облыстары кіреді.

Бұл өңірлік аймақтар бойынша бөлу ҚР АӨК объектілеріне қызмет көрсететін жөндеу-қалпына келтіру кәсіпорындарының үздіксіз және сапалы жұмысын қамтамасыз етеді. Осы өңірлердің әрқайсысында Ақтөбе, Астана, Қарағанды, Алматы қалаларында бір аддитивті технологиялар орталығы (АТО) құрылады деп болжануда. Өңірлерге бөлінудің негізгі критерийі машина-трактор паркі (МТП) бірліктерінің шоғырлануы болып табылады. Машина-трактор паркі бірліктерінің шоғырлануы - бұл республика облыстарындағы тракторлар, астық жинайтын комбайндар және басқа да ауыл шаруашылығы машиналары бірліктерінің саны. Мысалы, «батыс» аймағы үшін (6-суретті қараңыз) АТО құру облыс аумағында Ақтөбе қаласында орынды болады, өйткені мұнда МТП ең көп шоғырланған (677 бірлік). Аддитивті технологиялар орталығын құру үшін қалаларды таңдау басқа аймақтар үшін де жүзеге асырылды.

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.

Қорытынды

1 Аддитивті технологиялар бойынша жүргізілген шолу мен зерттеулердің нәтижесінде АМ-технологияларын қолдану салалары қарқынды дамып, әлемнің көптеген елдерінде белсенді түрде қолданылып жатқаны, сонымен қатар 3D принтерлерінің ассортименті мен олардың технологиялық мүмкіндіктері де артып келе жатқаны анықталды. Соңғы үш жылда әлемде 3D басып шығару нарығының көлемі екі еседен астам өсті, аддитивті технологияларды пайдалану деңгейі бойынша әлемнің барлық елдерінен АҚШ-тан, ал әртүрлі өндіріс салалары мен қызмет салаларында пайдалану бойынша ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық жұмыстар көш бастап тұр. Жөндеу өндірісінде АМ-технологияларды қолдану 2017 жылдан 2023 жылға дейін 4 еседен астам өсті.

2 ҚР АӨК кәсіпорындары жағдайында жүргізілген зерттеулер ауыл шаруашылығы техникасының бөлшектерін қалпына келтіру және дайындау үшін АМ-технологияларды пайдалану кезінде логистика айтарлықтай жеңілдетілетінін және қосалқы бөлшектерді жеткізу уақыты қысқаратынын, жөндеу жеделдетілетінін және қойма қорларының көлемі азаятынын көрсетті, бұл жөндеу кәсіпорындарының жұмысын ұйымдастыру қағидаттарының түбегейлі өзгеруіне әкелуі мүмкін.

3 Бұл анықталды:

– ҚР Ауыл шаруашылығы субъектілерінің экономикалық және аумақтық ерекшеліктерін, сондай-ақ біркелкі орналаспауы мен қашықтығын ескере отырып,

АӨК техникалық паркін жұмысқа жарамды күйде ұстау үшін технологияларды пайдалану перспективалы бағыттардың бірі болып табылады;

– ұйымдастырушылық тұрғыдан ауыл шаруашылығы техникасына техникалық қызмет көрсету мен жөндеудің ұтымды жүйесін құру үшін ҚР ауыл шаруашылығы алқаптарының бүкіл аумағын олардың әрқайсысында тиісті АТО құра отырып, төрт өңірге бөлу қажет (6 суретті қараңыз).

4 Болашақта АТО-тың сапалы жұмысын қамтамасыз ету үшін жұмыс істеу алгоритмін, сондай-ақ технологиялардың оңтайлы әдістері мен тиісті технологиялық жабдықтардың негіздемесін әзірлеу бойынша зерттеу жүргізу қажет.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Nika Zakerin, Khashayar Morshed-Behbahani, Donald Paul Bishop, AliNasiri.** Review of Tribological and Wear Behavior of Alloys Fabricated via Directed Energy Depozition Additive Manufacturing. Manufacturing and material Processing. 2025,9(6), 194. – https://doi.org/10.3390/jmmp9060194

2 Industrial 3D Printing Market by Technology material, end user industry, service type, machine type – global forecast to 2030. Report. – 2025. – 183 p.

3 Additive manufacturing market size, share, and trends 2025 to 2034.Report description 2025. – [Electronic resource]. – https://www.precedenceresearch.com/additive-manufacturing-market

4 **Dzhugan, A. A., Ovchinnikov, A. V., Olshanetsky, V. E.** additive technologies and possibilities of their application in modern conditions (review). New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. – № 2. – 2014. – P. 96–101.

5 **Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., Hui, D.** Additive manufacturing (3D printing): a review of materi als, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. – 2018. –Vol. 143. – P. 172–196. – https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

6 **Zlenko, M. A., Dovbysh, V. M.** Additive technologies in mechanical engineering / / manual for engineers. – M. : SSC RF FSUE «NAMI», 2015. – 220 p.

7 **Dovbysh, V. M.** Additive technologies and metal products // The foundry's library. – 2014. – № 9. – P. 14–71.

8 ISO/ASTM52900-21 Additive manufacturing - General principles Fundamentals and vocabulary.Аддитивные технологии. Стандартные решения ASTM.

9 **Вержаковская, М. А., Аронов, В. Ю., Осанов, В. А.** Технологии аддитивного производства как наиболее приоритетные современные цифровые технологии. Журнал Инновации, 2025. – № 7 (237). – 2018. – С. 23–27.

10 **Tolochko, N. K., Nukeshev, S. O., Romanyuk, N. N., Mendalieva, S. I.** Additive Technologies in the Production and Repair of Machines; S. Seifullin Kazakh National Technical University : Nur-Sultan, Kazakhstan, 2022.

11 **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.

REFERENCES

1 **Nika Zakerin, Khashayar Morshed-Behbahani, Donald Paul Bishop, AliNasiri.** Review of Tribological and Wear Behavior of Alloys Fabricated via Directed Energy Depozition Additive Manufacturing. Manufacturing and material Processing. 2025,9(6), 194. – https://doi.org/10.3390/jmmp9060194

2 Industrial 3D Printing Market by Technology material, end user industry, service type, machine type – global forecast to 2030. Report. – 2025. – 183 p.

3 Additive manufacturing market size, share, and trends 2025 to 2034.Report description 2025. – [Electronic resource]. – https://www.precedenceresearch.com/additive-manufacturing-market

4 **Dzhugan, A. A., Ovchinnikov, A. V., Olshanetsky, V. E.** additive technologies and possibilities of their application in modern conditions (review). New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. – № 2. – 2014. – P. 96–101.

5 **Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., Hui, D.** Additive manufacturing (3D printing): a review of materi als, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. – 2018. –Vol. 143. – P. 172–196. – https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

6 **Zlenko, M. A., Dovbysh, V. M.** Additive technologies in mechanical engineering / / manual for engineers. – M. : SSC RF FSUE «NAMI», 2015. – 220 p.

7 **Dovbysh, V. M.** Additive technologies and metal products // The foundry's library. – 2014. – № 9. – P. 14–71.

8 ISO/ASTM52900-21 Additive manufacturing - General principles Fundamentals and vocabulary.Аддитивные технологии. Стандартные решения ASTM.

9 **Verzhakovskaya M. A., Aronov V. Yu., Osanov V. A.** Tekhnologii additivnogo proizvodstva kak naiboleye prioritetnyye sovremennyye tsifrovyye tekhnologii [Additive manufacturing technologies as the most priority modern digital technol]. Zhurnal Innovatsii № 7 (237), 2018. – P. 23–27.

10 **Tolochko, N. K., Nukeshev, S. O., Romanyuk, N. N., Mendalieva, S. I.** Additive Technologies in the Production and Repair of Machines; S. Seifullin Kazakh National Technical University : Nur-Sultan, Kazakhstan, 2022.

11 **Sherov K. T., Berdímūratova D. I., Myrzakhmet B., Sagitov A. A., Mendaliyeva S. I.** Issledovaniye vozmozhnosti ispol'zovaniya metodov additivnoy tekhnologii pri remonte detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Study of the possibility of using additive technology methods in the repair of agricultural machinery parts] / VESTNIK YENU imeni L. N. Gumileva. Seriya tekhnicheckiye nauki i

tekhnologii – Astana: Izd-vo YENU, № 1(148)/2024 – P. 241–252. – https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-148-3-241-252

06.01.26 ж. баспаға түсті.
17.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

С. И. Мендалиева[1], К. Т. Шеров[2], *Д. И. Бердимуратова[3], А. Турусбекова[4], В. А. Хан[5]
[1,2,3,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[4]Карагандинский технический университет имени Ә. Сагынова, Республика Казахстан, г. Караганда.
Поступило в редакцию 06.01.26.
Поступило с исправлениями 17.01.26.
Принято в печать 03.02.26.

ОБ АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

В статье дается анализ и прогноз развития аддитивных технологий и 3D-печати по регионам, агропромышленности и сферам деятельности, систематическая классификация аддитивных методов по способу применения и видам материалов. Дается обзор развития аддитивных технологий в мире, а также рассматриваются различные методы аддитивных технологий для сравнени. Кроме того, обсуждаются параметры аддитивных процессов, свойства материалов и текущие проблемы, а также обзор исследований по разработке приложений аддитивных технологий. Предложен авторский вариант выделения этапов развития аддитивных технологий по обобщенным признакам. Обоснована актуальность использования АМ (Additive manufacturing)-технологий для восстановления деталей сельскохозяйственной техники, сформулированы задачи по оптимизации применения 3D-печати AM(Additive manufacturing)-технологий в ремонтном производстве и созданию в современных условиях рациональной системы организации технического обслуживания и ремонта деталей сельскохозяйственной техники и применения аддитивных технологий к производству.

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: Ремонт, восстановление, аддитивные технологии, 3D-печать, агропромышленный комплекс.

***S. I. Mendaliyeva*[1], *K. T. Sherov*[2], **D. I. Berdimuratova*[3],**
***A. Turusbekova*[4], *V. A. Khan*[5]**
[1,2,3,5]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[4]Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karagandy.
Received 06.01.26.
Received in revised form 17.01.26.
Accepted for publication 03.02.26.

ON THE RELEVANCE OF THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE REPAIR INDUSTRY OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

The article provides an analysis and forecast of the development of additive technologies and 3D printing by region, agroindustry and fields of activity, a systematic classification of additive methods by method of application and types of materials. An overview of the development of additive technologies in the world is given, as well as various methods of additive technologies for comparison. In addition, the parameters of additive processes, material properties and current issues are discussed, as well as an overview of research on the development of additive technology applications. The author's version of the identification of the stages of development of additive technologies according to generalized criteria is proposed. The relevance of using AM (Additive manufacturing) technologies for the restoration of agricultural machinery parts is substantiated, tasks are formulated to optimize the use of 3D printing of AM (Additive manufacturing) technologies in repair production and to create in modern conditions a rational system for the organization of maintenance and repair of agricultural machinery parts and the application of additive technologies to production.

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: Repair, restoration, additive technologies, 3D printing, agro-industrial complex.

МРНТИ 55.57.43
https://doi.org/10.48081/BGQF1914

****Б. А. Молдаханов*[1], *М. В. Дудкин*[2], *Т. Лешневский*[3],**
***В. С. Яковлев*[4], *А. Ж. Байгунусов*[5]**
[1,2]ТОО «Европлюс Восток», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[3]Вроцлавский университет науки и технологий, Польша, г. Вроцлав;
[4,5]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2977-693X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5732-0724
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1903-3967
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7315-4719
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8607-4986
*e-mail: bek_m78@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В статье представлены результаты исследований по оптимизации технологических параметров процесса измельчения материалов пружинно-роторными мельницами с использованием математического моделирования второго порядка. На основе планирования эксперимента с пятью варьируемыми факторами были получены полиномиальные модели второго порядка для пяти ключевых выходных параметров: тонкости помола, производительности, мощности привода, удельной энергоемкости и удельной металлоемкости. Методом полного факторного эксперимента получены регрессионные уравнения, описывающие взаимосвязь между технологическими параметрами и выходными характеристиками процесса. Проведен статистический анализ адекватности моделей и определены наиболее значимые факторы, влияющие на каждый из выходных параметров. На основе аналитического решения систем уравнений найдены оптимальные значения технологических параметров, обеспечивающие максимальную производительность при минимальных энергозатратах и требуемом качестве продукта. Разработаны практические рекомендации по настройке оборудования и определены допустимые диапазоны варьирования параметров для обеспечения стабильности технологического процесса. Результаты исследования показывают возможность повышения производительности на 15–20 % при одновременном снижении энергопотребления на 8–12 % по сравнению с эмпирически устанавливаемыми режимами работы. Полученные модели и методика оптимизации могут быть использованы для совершенствования технологических процессов на предприятиях по переработке сыпучих материалов.

Ключевые слова: пружинно-роторные мельницы, измельчение материалов, тонкость помола, математическое моделирование, оптимизация параметров, планирование эксперимента, энергоэффективность.

Введение

Процессы измельчения различных материалов и отходов растениеводства в тонкие порошки являются ключевыми операциями во многих производствах. Эффективность процесса измельчения напрямую влияет на качество конечного продукта, энергопотребление и себестоимость производства. Однако технология измельчения характеризуется сложными взаимосвязями между многочисленными параметрами, что затрудняет оптимизацию процесса эмпирическими методами.

Актуальность исследований в области оптимизации процессов измельчения обусловлена постоянно растущими требованиями к энергоэффективности производств и качеству выпускаемой продукции. Современные тенденции развития промышленности требуют перехода от эмпирического подхода к научно обоснованным методам управления технологическими процессами на основе математического моделирования [1, с. 33], [2, с. 169–176], [4, с. 3–11], [5, с. 185–196].

Перспективными представляют работы, использующие методы планирования эксперимента для построения полиномиальных моделей, позволяющих количественно оценить влияние каждого фактора и их взаимодействий. Недостатком многих существующих исследований является отсутствие системного подхода к многокритериальной оптимизации, когда необходимо одновременно учитывать противоречивые требования к различным выходным параметрам.

Для измельчения твердых материалов создано много типов измельчительных машин, отличающихся друг от друга как конструктивными параметрами, так и скоростью нагружения на обрабатываемый материал. Однако по ряду причин, основными из которых являются высокая энерго- и металлоемкость процесса, ведется поиск более совершенных конструктивных схем измельчителей, позволяющих интенсифицировать процесс измельчения и повысить эффективность работы оборудования. В связи с вышеизложенным, совершенствование помольного оборудования, применение более эффективных и экономичных способов измельчения в настоящее время является актуальной задачей и хозяйственной проблемой [6, с. 1015–1033], [7, с. 1167–1180], [8, с. 65–72], [9, с. 10–16], [10, с. 107–116].

Материалы и методы

После тщательного анализа работы и недостатков вышеперечисленного оборудования и исходя из особенностей измельчаемых отходов растениеводства, таких, как длинностеблевый и волокнистый материал, для измельчения которого требовалось разработать соответствующее оборудование, было принято решение о разработке и исследовании конструкций измельчителей с пружинно-роторными рабочими органами, как наиболее перспективных из известных видов помольного оборудования, работающих в ударно-растирающем режиме и использующих

для тонкого измельчения активную зону, образуемую перекрытием нескольких пружинных витков роторов.

На рисунке 1 представлен внешний вид экспериментальной пружинно-роторной мельницы, выполненной с прозрачной внешней стенкой 9.

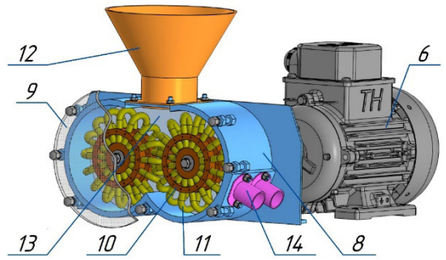


Рисунок 1 – Экспериментальная установка измельчителя

Экспериментальная мельница с пружинным рабочим органом содержит корпус 8 с загрузочным 12 и выгрузочным 14 люками, внутри корпуса в виде роторов вращаются рабочие диски 10 с закрепленными на их внешнем диаметре винтовыми пружинами 11: объем помольной камеры – 5 л; материал рабочих органов – сталь 65Г; мощность электродвигателя – 15 кВт; система управления - частотно-регулируемый привод; система измерения: датчики мощности, тахометр, весовой дозатор. Помольные камеры, образуемые корпусом 8 мельницы и вращающимися пружинными роторами 11, можно тиражировать и монтировать на приводном валу, разделяя их сплошной или сетчатой стенкой-диафрагмой 13.

Исходный продукт поступает через загрузочный люк в помольную камеру, где попадает под воздействие пружинных роторов 11 (рисунок 2). Разрушение материала происходит в трех зонах. В первой зоне материал разрушается под действием удара рабочих элементов ротора и от соударения частиц материала друг о друга. Во второй зоне материал раздавливается и истирается о стенки помольной камеры. В третьей зоне материал истирается и раздавливается между рабочими элементами роторов при прохождении зоны зацепления и подвергается воздействию центробежных сил. Под действием роторов материал проходит все три зоны измельчения.

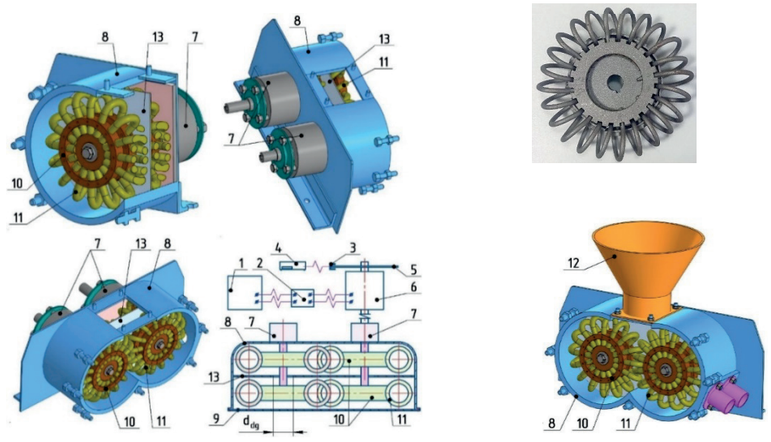
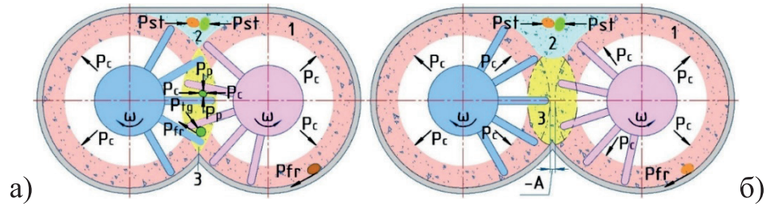


Рисунок 2 – Мельница с двурядным пружинным (пружинящим) рабочим органом и межсекционной диафрагмой: 1) источник питания; 2) ваттметр; 3) датчик тахометра; 4) тахометр; 5) диск; 6) электродвигатель привода; 7) подшипниковые опоры; 8) корпус; 9) передняя стенка; 10) диск ротора; 11) рабочий орган; 12) загрузочный люк; 13) проходная диафрагма

При работе мельницы в режиме непрерывного действия материал из загрузочного люка непрерывно поступает в помольную камеру мельницы, измельчается и за счет наклона витков рабочих элементов перемещается вдоль помольной камеры к разгрузочному отверстию. Качество готового продукта определяется контрольными ситами. Влияние других факторов, таких как температура, содержание поверхностно-активных веществ в материале, влажность в задачи исследований не входили. На характер движения материала в рабочей камере большое влияние оказывает частота вращения рабочих органов и объем, занимаемый материалом. При малых числах оборотов рабочих органов (100–200 об/мин) происходит перемешивание материала и его перемещение лишь в нижней части рабочей камеры. При увеличении числа оборотов до (300–400 об/мин) основная, по массе, часть материала поднимается на боковые поверхности рабочей камеры, а небольшая часть материала начинает участвовать в круговом движении. Увеличение частоты вращения рабочих органов более 500 об/мин приводит к образованию под действием центробежных сил устойчивой тороподобной зоны. Материал из одной торообразной зоны под действием центробежной силы старается проникнуть во внутреннюю область другой зоны (рисунок 3,а). Если толщина тороподобной зоны меньше величины перекрытия роторов, то рабочие элементы ведущего ротора во время зацепления с ведомым ротором, проталкивают материал из тороподобной зоны ведомого ротора и наоборот, материал из зоны ведомого ротора проталкивается во внутреннюю зону ведущего ротора.



а) б)

Рисунок 3 – Схема действия сил в помольной камере на измельчаемый материал при положительном (а) и отрицательном (б) перекрытии роторов

Кинетическая энергия материала, проталкиваемого рабочими элементами роторов, гасится противодействием материала в зоне зацепления роторов и материал не попадает во внутреннюю область. В этом случае проталкиваемый материал попадает в область ротора, занятую таким же материалом (рисунок 3, б). Действие центробежной силы одного ротора уравновешивается действием центробежной силы другого ротора.

Тонкость измельчения (степень измельчения, i) определяется как отношение среднего размера кусков материала до измельчения ($d_н$) к размеру после ($d_к$), для этого используют ситовой анализ (остаток R_x на сите x, мкм).

$$i = \frac{d_н}{d_к}$$

Остаток на сите R_x (в процентах) показывает долю частиц крупнее размера ячеек сита x. Тонкий помол: $i = 50–100$.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к моделированию процесса измельчения и разработке аналитического метода определения оптимальных режимов работы для многокритериальной задачи.

Практическая значимость исследования состоит в создании методики, позволяющей повысить эффективность работы измельчительного оборудования на 15–20 % за счет научно обоснованного выбора технологических параметров. В работе использованы методы математической статистики, планирования эксперимента, регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации. Полученные результаты могут быть применены не только для процессов измельчения, но и для оптимизации других технологических процессов со сложными нелинейными зависимостями между параметрами.

Предмет исследования – взаимосвязи между технологическими параметрами процесса измельчения и его выходными характеристиками, а также методы оптимизации этих параметров на основе математического моделирования. Для изучения влияния технологических параметров на процесс измельчения был выбран пятифакторный план второго порядка. Были выделены пять ключевых технологических факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс измельчения даны в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы и уровни варьирования

№	Исследуемые факторы	Обозначения	Уровни варьирования			Интервал варьирования
			-1	0	+1	
1	Частота вращения рабочих органов, n, об/мин	X_1	1500	2000	2500	500
2	Степень загрузки материалом, k_m	X_2	0,1	0,3	0,5	0,2
3	Величина перекрытия рабочих зон ведущего и ведомого ротора, k_z, мм	X_3	-15	0	+15	15
4	Зазор между частями помольной камеры,k_{zaz}, мм	X_4	2	7	12	5,0
5	Продолжительность измельчения, Т, сек	X_5	60	90	120	30

Выходные параметры (функции отклика). Для комплексной оценки эффективности процесса измельчения были выбраны пять выходных параметров: Y_1 – Тонкость помола (R_{-71}), % – содержание фракции крупностью менее 71 мкм; Y_2 – Производительность (P), кг/ч – масса измельченного материала за единицу времени; Y_3 – Мощность привода (N), кВт – потребляемая электрическая мощность; Y_4 – Удельная энергоемкость (E_{ud}), кВт · ч/т – энергозатраты на единицу продукции; Y_5 – Удельная металлоемкость (M_{ud}), т · ч/т – косвенный показатель износа оборудования.

Примененная структура эксперимента: Общее количество опытов составило 27, включая: 16 опытов ядра плана (2^{5-1}); 5×2=10 опытов «звездных» точек; 3 опыта в центре плана для оценки ошибки воспроизводимости. В результате проведения 27 экспериментов по установленному плану были получены значения пяти выходных параметров для различных комбинаций технологических факторов.

Таблица 2 – Сводные статистические характеристики экспериментальных данных

Выходной параметр	Ед. Изм.	Мин. значение	Макс. значение	Средн. значение	Стандарт. отклонение	Коэфф вариации, %
Тонкость помола (R_{-71})	%	10,4	38,0	23,7	7,2	30,4
Производительность (P)	кг/ч	2,1	23,3	8,3	5,1	61,4
Мощность привода (N)	кВт	0,8	14,2	4,2	3,1	73,8
Удельная энергоемкость (E_{ud}),	кВт·ч/т	1,1	9,3	5,0	2,2	44,0
Удельная металлоемкость (M_{ud}),	т·ч/т	0,2	2,4	0,8	0,5	62,5

Получение регрессионной модели. В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены полиномиальные модели второго порядка для каждого выходного параметра, из которых в данной статье рассмотрим модель тонкости помола (R_{-71}):

$$R_{-71} = 30{,}1 - 0{,}7 \cdot X_1 + 0{,}9 \cdot X_2 - 2{,}1 \cdot X_3 - 0{,}52 \cdot X_4 - 2{,}58 \cdot X_5 - 4{,}05 \cdot X_1^2 - 3{,}6 \cdot X_2^2 - 3{,}55 \cdot X_3^2 - 3{,}4 \cdot X_4^2 - 3{,}95 \cdot X_5^2 - 0{,}018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}006 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0{,}006 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0{,}012 \cdot X_1 \cdot X_5 + 0{,}01 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0{,}01 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0{,}05 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0{,}04 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0{,}03 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0{,}03 \cdot X_4 \cdot X_5 \quad (1)$$

Для анализа модели и нахождения оптимальных значений факторов использовался метод аналитической оптимизации, для проверки условий экстремума использовались матрицы Гессе.

Для визуализации областей оптимумов использовались:

1. Двумерные сечения поверхности отклика при фиксированных значениях трех факторов.
2. Трехмерные поверхности отклика для пар наиболее значимых факторов.
3. Контурные графики (изолинии) для анализа областей с заданными значениями выходных параметров.

Компромиссная оптимизация. Для учета противоречивых требований к различным выходным параметрам применялся метод взвешенных сумм:

$$F_{\text{комп}} = \sum_{k=1}^{5} \omega_k \cdot f_k(X) \quad (2)$$

где: ω_k – весовые коэффициенты ($\sum \omega_k = 1$);
$f_k(X)$ – нормализованные значения выходных параметров.

Для оценки вклада различных факторов в изменчивость выходных параметров проводился анализ дисперсии (ANOVA) с разделением общей изменчивости на компоненты: обусловленную регрессией; остаточную (необъясненную); ошибку эксперимента.

Обработка экспериментальных данных, построение моделей и оптимизация проводились с помощью: Python 3.8 с библиотеками NumPy, SciPy, pandas для численных расчетов; Matplotlib и Plotly для визуализации результатов; Jupyter Notebook для интерактивного анализа данных. Таким образом, предложенная методология позволяет комплексно подойти к решению задачи оптимизации процесса измельчения, начиная от планирования эксперимента и заканчивая разработкой практических рекомендаций по настройке оборудования.

Результаты и обсуждение

Статистические характеристики всех пяти моделей даны в таблице 3.

Таблица 3 – Статистические характеристики полученных моделей

Модель	Коэффициент детерминации R^2	Скорректированный R^2	Стандартная ошибка	F-критерий	p-value
R_{71}	0,954	0,942	0,87	79,3	<0,001
П	0,962	0,951	0,42	88,7	<0,001
N	0,947	0,933	0,38	72,5	<0,001
Еуд	0,938	0,921	0,35	65,8	<0,001
Муд	0,931	0,912	0,09	59,4	<0,001

Все модели являются статистически значимыми (p-value < 0,001) и обладают высокими коэффициентами детерминации ($R^2 > 0{,}93$), что свидетельствует об их адекватности и способности объяснять более 93 % вариабельности

экспериментальных данных. Анализ значимости факторов и визуализация их влияния только (!) на тонкость помола приведены на графиках рисунков 3 – 5.

Интерпретация результатов:

1 Наиболее значимым фактором является «время измельчения» (X_5):

– линейный эффект: – 2.58 (отрицательный);

– квадратичный эффект: 3.95;

– общее влияние: 6.53;

– оптимальное время: 80 сек.

2 Второй по значимости фактор – «перекрытие рабочих зон» (X_3):

– линейный эффект: – 2.10 (отрицательный);

– оптимальное перекрытие: – 4.5 мм.

3 Все факторы имеют значимые квадратичные эффекты, что свидетельствует о наличии оптимумов в исследуемой области.

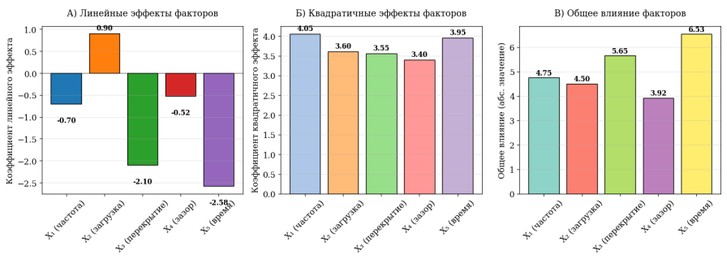


Рисунок 4 – Сравнительный анализ влияния факторов на тонкость помола

Рекомендации для минимизации тонкости помола:

– установить время измельчения ~ 80 сек;

– установить перекрытие зон ~ – 4.5 мм;

– частоту вращения поддерживать ~ 2000 об/мин;

– степень загрузки ~ 0.28;

– зазор в камере ~ 7.0 мм.

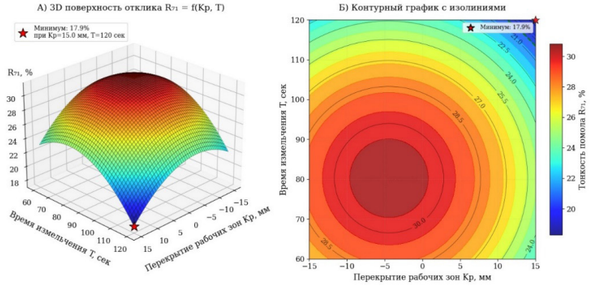


Рисунок 5 – Влияние наиболее значимых факторов (X_3 и X_5) на тонкость помола

Анализ поверхности отклика R_{-71}=f(k_p, T) (рисунок 5,а). Поверхность отклика тонкости помола представляет собой пятимерный эллиптический параболоид с выраженной вогнутостью по всем осям. Это следует из того, что все квадратичные коэффициенты модели являются отрицательными и статистически значимыми: $b_{11} = -4{,}05$; $b_{22} = -3{,}60$; $b_{33} = -3{,}55$; $b_{44} = -3{,}40$; $b_{55} = -3{,}95$.

Среднее значение квадратичных коэффициентов составляет -3,71, что указывает на сильно выраженную нелинейность поверхности. Для сравнения: в линейных моделях эти коэффициенты были бы статистически незначимы или близки к нулю.

Топографические особенности поверхности следующие. Центральный максимум поверхности имеет единственную стационарную точку типа максимума в области исследования. Средний радиус кривизны составляет примерно 0,27 (обратная величина среднего квадратичного коэффициента), что свидетельствует о достаточно «крутых» склонах поверхности. Относительная близость значений квадратичных коэффициентов (разброс ~20 %) указывает на умеренную анизотропию поверхности.

При фиксации трех факторов на нулевом уровне, 2D-сечения поверхности представляют собой семейство концентрических эллипсов (изолиний равной тонкости помола), что визуализировано на рисунке 5, в.

Ориентация главных осей эллипсоида показывает следующее:

– первая главная ось (v_1) направлена преимущественно вдоль X_5 (время) с компонентой – 0,91;

– вторая главная ось (v_2) направлена преимущественно вдоль X_3 (перекрытие) с компонентой – 0,91.

– остальные оси имеют существенно меньшие собственные значения.

– ось X_5 объясняет ≈38 % общей вариабельности поверхности;

– ось X_3 объясняет ≈32 % общей вариабельности;

– совместно X_3 и X_5 объясняют ≈70 % изменчивости функции отклика. Такая ориентация осей указывает на то, что:

– время измельчения (X_5) является наиболее «чувствительным» параметром – небольшие изменения времени приводят к значительным изменениям R_{71};

– перекрытие рабочих зон (X_3) – второй по значимости фактор, определяющий геометрию взаимодействия роторов.

– остальные факторы играют вспомогательную или корректирующую роль.

Форма поверхности - вогнутая по всем осям (отрицательные квадратичные коэффициенты). Главные оси эллипсоида ориентированы вдоль факторов X_3 и X_5. Угол наклона наибольший в направлении X_5.

Ссогласно полиномиальной модели второго порядка (1) для тонкости помола (R_{-71}) построили также четыре 3D-поверхности отклика для анализа влияния ключевых пар факторов на тонкость помола (R_{-71}). Целью построения является визуализация сложной нелинейной зависимости и взаимодействия между технологическими параметрами. Приведенные ниже графики построены методом расчета значений полиномиальной модели второго порядка в диапазоне

кодированных значений факторов от -1 до +1 с последующим преобразованием в натуральные величины.

Поверхности окрашены по обратной цветовой шкале Jet, где синие области соответствуют меньшим значениям R_{-71} (более тонкий помол), а красные – большим значениям (более грубый помол). На каждом графике отмечены точки глобального минимума (синий треугольник ▼) и максимума (красная звезда ★).

Анализ показал, что наиболее выраженную вогнутую поверхность формирует пара «перекрытие рабочих зон – время измельчения» (X_3–X_5), где минимум R_{-71} = 13.12 % достигается при максимальном времени и отрицательном перекрытии. Взаимодействие «частота вращения – степень загрузки» (X_1– X_2) демонстрирует седловидную поверхность с двумя локальными экстремумами, что подтверждает наличие значимого взаимодействия между этими факторами. Для пары «перекрытие – зазор» (X_3 – X_4) наблюдается выраженный минимум в области отрицательных значений обоих параметров, а график «Время – Частота» (X_5–X_1) показывает, что увеличение времени измельчения компенсирует негативное влияние высокой частоты на тонкость помола.

Анализ взаимодействия факторов на тонкость помола R_{-71} показан также на рисунке 6. Анализ рассматриваемых параметров позволяет сделать технологические выводы.

Приоритеты управления процессом следующие:

Первичный контроль: время измельчения (X_5) – требует наиболее точного поддержания;

Вторичный контроль: перекрытие рабочих зон (X_3) – важный корректирующий параметр;

Третичный контроль: частота вращения (X_1) – регулировка в относительно широких пределах;

Фоновые параметры: загрузка (X_2) и зазор (X_4) – устанавливаются один раз при настройке.

Рекомендации по эксплуатации рассматриваемого измельчителя:

1) Оптимальная рабочая точка: X_5 = – 0,32 (80 сек), X_3 = – 0,30 (–4,5мм).

Коррекционные воздействия:

– при отклонении R_{-71} на +2 % → уменьшить время на 7–8 сек;

– при отклонении R_{-71} на -2 % → увеличить время на 7–8 сек или уменьшить перекрытие на 1–2 мм.

3) Допустимые колебания: времени: ±5 сек; перекрытия: ±3 мм.

Анализ поверхности позволяет спрогнозировать:

Предсказывать изменение R_{-71} при любых комбинациях параметров.

Рассчитывать компенсирующие воздействия при отклонении одного параметра.

Оптимизировать переходные процессы при смене режимов.

Оценивать устойчивость процесса к возмущениям.

Рисунок 4. Анализ взаимодействий факторов на тонкость помола

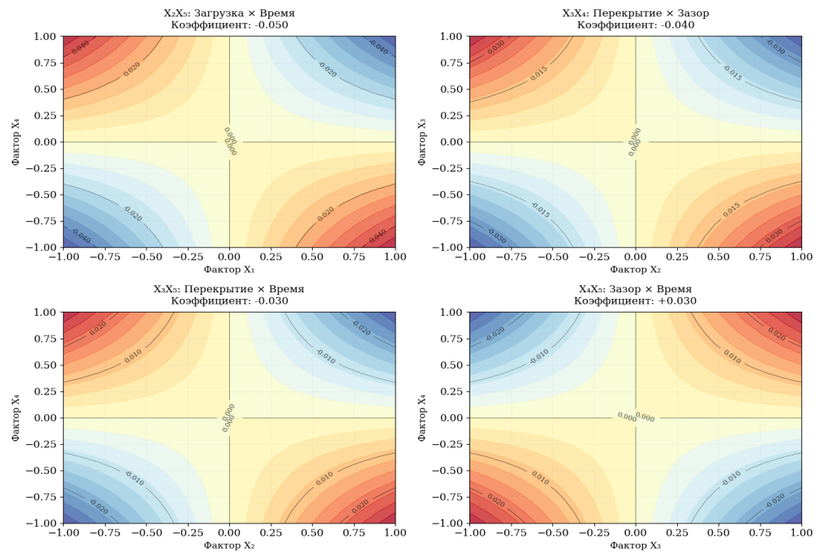


Рисунок 6 – Анализ взаимодействия факторов на тонкость помола R_{-71}

Сводный анализ влияния факторов на тонкость помола () приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики влияния факторов на тонкость помола

Фактор	Линейный	Квадратичный	Общее	Ранг	Оптимум (нат.)
X_1: Частота вращения	– 0,70	4,05	4,75	4	2000 об/мин
X_2: Степень загрузки	0,90	3,60	4,50	3	0,28
X_3: Перекрытие зон	– 2,10	3,55	5,65	2	-4,5 мм
X_4: Зазор в камере	– 0,52	3,40	3,92	5	7,00 мм
X_5: Время измельчения	– 2,58	3,95	6,53	1	80 сек

Результаты анализа влияния факторов на тонкость помола (R_{-71}).

Количественные результаты анализа сследующие:

1 Линейные эффекты факторов: Анализ коэффициентов линейных членов модели тонкости помола выявил следующее ранжирование факторов по силе влияния.

1) X_5 (время измельчения): – 2,58; отрицательный знак указывает на уменьшение тонкости помола при увеличении времени, это наибольший по абсолютной величине линейный эффект.

2) X_3 (перекрытие рабочих зон): – 2,10; отрицательный знак указывает, что уменьшение перекрытия (отрицательные значения) способствует снижению тонкости. Это второй по значимости фактор.

3) X_3 (степень загрузки): +0,90; положительный знак указывает, что увеличение загрузки приводит к росту тонкости помола. Это единственный фактор с положительным линейным эффектом.

4) X_1 (частота вращения): – 0,70; незначительное отрицательное влияние, минимальный линейный эффект среди отрицательных факторов.

5) X_4 (зазор в камере): – 0,52; наименьшее линейное влияние.

2 Квадратичные эффекты факторов: Квадратичные эффекты в модели тонкости помола характеризуют нелинейность влияния факторов и наличие оптимумов внутри исследуемого диапазона. Все коэффициенты квадратичных членов являются отрицательными, что указывает на вогнутый характер поверхности отклика с максимумом в центральной точке плана. Это означает, что зависимость R_{-71} от каждого фактора имеет форму перевернутого параболоида — сначала при увеличении фактора от нижнего уровня тонкость помола растет, достигает максимума, а затем начинает снижаться.

Ранжирование факторов по величине квадратичного эффекта (по абсолютной величине) следующее.

1) X_1 (частота вращения): – 4,05 – наибольшая нелинейность, резкое изменение R_{71} при отклонении от центрального значения.

2) X_5 (время измельчения): – 3,95 – сопоставимое по силе влияние, что указывает на сложную кинетику процесса.

3) X_2 (степень загрузки): – 3,60 – существенное влияние, особенно при перегрузке камеры.

4) X_3 (перекрытие рабочих зон): – 3,55 – умеренная нелинейность.

5) X_4 (зазор в камере): – 3,40 – наименьший квадратичный эффект, но всё же значимый.

Отрицательные квадратичные коэффициенты свидетельствуют о том, что существуют оптимальные значения каждого параметра, при которых достигается максимальная тонкость помола. Отклонение от этих оптимальных значений в любую сторону (как увеличение, так и уменьшение) приводит к ухудшению показателя R_{-71}. Наличие значимых квадратичных эффектов подчеркивает недопустимость экстраполяции линейных моделей за пределы исследованного диапазона и необходимость точного поддержания параметров вблизи оптимума для обеспечения стабильного качества продукта. Взаимодействия факторов. Анализ коэффициентов взаимодействий в модели тонкости помола выявил неаддитивный характер влияния технологических параметров, что свидетельствует о синергетических и антагонистических эффектах при их совместном варьировании.

Ключевые взаимодействия и их интерпретация следующие:

1) X_2X_5 (загрузка×время): – 0,050 – наиболее сильное антагонистическое взаимодействие. Увеличение времени измельчения при высокой загрузке приводит к меньшему снижению R_{71}, чем можно было бы ожидать от простой суммы эффектов.

2) X_3X_4 (перекрытие×зазор): – 0,040 – отрицательное взаимодействие указывает на взаимное усиление эффектов при одновременном отклонении этих параметров от оптимальных значений.

3) X_3X_5 (перекрытие×время): – 0,030 – схожий антагонистический характер.

4) X_4X_5 (зазор×время): + 0,030 – единственное положительное взаимодействие, что означает возможность частичной компенсации негативных эффектов.

Научное значение приведенного анализа можно выразить следующим образом: наличие значимых взаимодействий подтверждает сложный, нелинейный характер процесса измельчения и обосновывает необходимость использования моделей второго порядка вместо упрощенных линейных аппроксимаций для адекватного описания технологии. Приведем физическую интерпретацию результатов анализа, которая показывает преобразование статистических коэффициентов моделей в технологически объяснимые закономерности, связывающие математические зависимости с реальными механизмами процесса измельчения:

1 Влияние времени измельчения (X_5): линейный эффект – 2,58; т.е. на каждое увеличение времени на 30 секунд (ΔX_5=1) уменьшает R_{-71} на 2,58 %. Здесь баланс рассматривается между дополнительным дроблением и агрегацией/переизмельчением. В ходе анализа определено оптимальное значение в 80 сек, что соответствует завершению основного этапа дробления до начала доминирования негативных процессов. Длительное измельчение приводит к переизмельчению части материала, но одновременно увеличивает долю мелкой фракции. Оптимум обусловлен балансом между этими процессами.

2 Влияние перекрытия рабочих зон (X_3): отрицательный коэффициент – 2,10, т.е. уменьшение перекрытия (отрицательные значения) снижает тонкость помола. Оптимум достигается при $X_3 = – 0,30$ (перекрытие – 4,5 мм). При отрицательном перекрытии создается зона «защемления» материала, улучшающая эффективность измельчения.

3 Влияние степени загрузки (X_2) носит положительный эффект + 0,90, что показывает, что при увеличении загрузки ухудшает тонкость помола. Оптимум достигается при минимальной загрузке ($X_2 = – 1$, КМ = 0,1), т.к. при малой загрузке каждая частица получает больше энергии воздействия от рабочих органов.

4 Влияние частоты вращения (X_1): имеет слабый линейный эффект – 0,70, но сильный квадратичный – 4,05; оптимум достигается около $X_1 = 0$ (2000 об/мин). Слишком низкие частоты недостаточны для эффективного измельчения, слишком высокие вызывают перегрев и агрегацию частиц.

5 Влияние зазора в камере (X_4) – имеет минимальное влияние среди всех факторов. Оптимум достигается в центре области (X_4=0, зазор 7 мм). Зазор влияет преимущественно на энергопотребление, а не на качество помола.

Обобщающие физические принципы:

1 Энергетический баланс: процесс измельчения в пружинно-роторной мельнице описывается оптимальным распределением механической энергии.

2. Кинетика процесса: измельчение в пружинно-роторной мельнице следует закону уменьшающейся отдачи; наибольший эффект достигается в первые

60–80 секунд; дальнейшее измельчение имеет экспоненциально убывающую эффективность пружинно-роторной мельницы.

3. Механохимические эффекты: при длительном измельчении в пружинно-роторной мельнице возникают поверхностная активация частиц; агрегация за счет электростатических и ван-дер-ваальсовых сил; локальный перегрев и изменение свойств материала.

4. Гидродинамические аспекты: при высоких оборотах рабочих элементов пружинно-роторной мельницы возникает эффект «воздушной подушки»; центробежные силы изменяют траекторию движения материала.

Научное значение физической интерпретации: подтверждает адекватность математических моделей реальному процессу измельчения в пружинно-роторных мельницах; обосновывает технологические рекомендации физическими законами; создает основу для разработки более совершенного оборудования.

Вывод: физическая интерпретация трансформирует статистические зависимости в инженерно-применимые знания, позволяя не только оптимизировать существующий процесс измельчения в пружинно-роторных мельницах, но и проектировать новые технологические решения на основе понимания фундаментальных механизмов измельчения.

Статистическая значимость эффектов по результату дисперсионного анализа дана в таблице 5, значимость коэффициентов – в таблице 6.

Таблица 5 – Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для модели R_{-71}

Источник вариации	Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	F-значение	p-value
Регрессия	1456,8	20	72,84	79,3	<0,001
Остаточная	73,2	6	0,92	-	-
Общая	1530,0	26	-	-	-

Вывод: модель достижения тонкости помола в пружинно-роторных мельницах статистически значима (p<0,001), объясняет 95,2 % вариабельности данных.

Таблица 6 -Значимость отдельных коэффициентов (t-критерий)

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	p-value	Значимость
b_5 (X_5)	-2,58	0,12	-21,50	<0,001	высоко значим
b_3 (X_3)	-2,10	0,12	-17,50	<0,001	высоко значим
b_2 (X_2)	+0,90	0,12	7,50	<0,001	высоко значим
b_{55} (X_5^2)	-3,95	0,18	-21,94	<0,001	высоко значим
b_{11} (X_1^2)	-4,05	0,18	-22,50	<0,001	высоко значим

Определение оптимальных значений факторов для минимизации R_{-71}.

Аналитическое решение системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dR_{-71}}{dX_3} = -2{,}1 - 7{,}0X_3 = 0 \\ \frac{dR_{-71}}{dX_5} = -2{,}5 - 7{,}8X_5 = 0 \\ \frac{dR_{-71}}{dX_2} = 0\ ,9 - 7{,}2X_2 = 0 \\ \frac{dR_{-71}}{dX_1} = -0{,}7 - 8{,}1X_1 = 0 \\ \frac{dR_{-71}}{dX_4} = -0{,}52 - 6{,}8X_4 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Результат решения системы уравнений:

X_1опт = −0,086 → 1957 об/мин

X_2опт = +0,125 → 0,325

X_3опт = −0,300 → -4,5 мм

X_4опт = −0,076 → 6,6 мм

X_5опт = −0,321 → 80,4 сек

Прогнозируемое минимальное значение тонкости помола в ПРМ R_{-71}:

$R_{-71\min}$ = 30,1−2,1·(−0,300)−2,5 · (−0,321)−4,1· (−0,086)2−3,6· (0,125)$^{2-}$
- 3,5 · (−0,300)$^{2-}$3,4 · (−0,076)$^{2-}$ 3,9 · (−0,321)^2 ≈ 17,8%.

Информация о финансировании

Исследования, связанные с публикацией, финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК: грант AP26102017 «Обоснование параметров и разработка оборудования для инновационной технологии переработки отходов растениеводства с высокой производительностью».

Выводы

Детальный анализ поверхности отклика не только подтвердил статистическую значимость полученной модели, но и выявил глубокие структурные закономерности процесса измельчения в пружинно-роторной мельнице, которые могут быть использованы как для оптимизации существующей технологии, так и для проектирования новых технических решений.

Минимальная тонкость помола достигается при максимальном времени измельчения (120 сек), отрицательном перекрытии рабочих зон (–15 мм), пониженной частоте вращения (1500 об/мин) и минимальном зазоре (2 мм); Тонкость помола наиболее чувствительна к перекрытию рабочих зон (X_3, – 2.10) и времени измельчения (X_5, – 2.58), причем квадратичные эффекты всех факторов для R_{71} отрицательны, что свидетельствует о наличии выраженных оптимумов. Наибольшее влияние на R_{71} оказывают время измельчения и перекрытие рабочих зон;

Взаимодействие между частотой и степенью загрузки имеет сложный нелинейный характер; Оптимальные области образуют компактные «долины»

на поверхностях отклика, что указывает на узкий диапазон параметров для достижения высокого качества помола.

Проведенный анализ выявил комплексный характер влияния технологических параметров на тонкость помола в пружинно-роторной мельнице и позволил определить научно обоснованные оптимальные режимы работы оборудования, обеспечивающие минимальную тонкость продукта при заданных ограничениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ганбат, Д., Гаврюшин, С. С.** Исследование статических и динамических характеристик винтовых пружинных мельниц // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2007. – № 8. – С. 10–16. – [Электронный ресурс]. – https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/685/685.pdf.

2 **Севостьянов, В. С., Сиваченко, Т. Л., Севостьянов, М. В., Горягин, П. Ю., Бабуков, В. А.** Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 3. – С. 107–116. – https://doi.org/10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359.

3 **Сорокин, Ф. Д., Чжоу, Су.** Конечный элемент в виде витка для расчета частот и форм собственных колебаний пружин с учетом сдвига, и инерции вращения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 1 (694). – С. 3–11. – https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-3-11.

4 **Bond, F. C.** The third theory of comminution // Mining Engineering. – 1952. – Vol. 4. – P. 33.

5 **Bond, F. C.** Lab equipment and tests help predict metal consumption in crushing and grinding units // Engineering and Mining Journal. – 1964. – Vol. 165. – № 6. – P. 169–176.

6 **Lee, J.** Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method // Journal of Sound and Vibration. – 2007. – Vol. 302. – № 1–2. – P. 185–196.

7 **Yildirim, V.** On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion // Meccanica. – 2012. – Vol. 47. – № 4. – P. 1015–1033.

8 **Yu, A. M., Hao, Y.** Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 74. – P. 65–72.

9 **Yu, A. M., Hao, Y.** Improved Riccati Transfer Matrix Method for Free Vibration of Non-Cylindrical Helical Springs Including Warping // Shock and Vibration. – 2012. – Vol. 19. – № 6. – P. 1167–1180.

10 Effect of water addition on the microstructure, lipid incorporation, and lipid oxidation of corn extrudates / J. Amft [and etc.] // European journal of lipid science and technology. – 2019. – Sci. 121. – № 9. 1800433.

REFERENCES

1 **Ganbat, D., Gavryushin, S. S.** Issledovanie staticheskix i dinamicheskix xarakteristik vintovy`x pruzhinny`x mel`nicz // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. [Investigation of static and dynamic characteristics of screw spring mills] Mashinostroenie. – 2007. – № 8. – P. 10–16. – [Electronic resource]. – https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/685/685.pdf.

2 **Sevost`yanov, V. S., Sivachenko, T. L., Sevost`yanov, M. V., Goryagin, P. Yu., Babukov, V. A.** Nauchno-prakticheskie osnovy` sozdaniya iglofrezerny`x izmel`chitelej mnogocelevogo naznacheniya [Scientific and practical bases of creation of needle milling grinders of multipurpose purpose] // Vestnik BGTU im. V.G. Shuxova. – 2018. – № 3. – P. 107–116. – https://doi.org/10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359.

3 **Sorokin, F. D., Chzhou, Su.** Konechny`j e`lement v vide vitka dlya rascheta chastot i form sobstvenny`x kolebanij pruzhin s uchetom sdviga, i inercii vrashheniya [The final element in the form of a coil for calculating the frequencies and forms of natural vibrations of springs, taking into account the shear and inertia of rotation] // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Mashinostroenie. – 2018. – № 1 (694). – P. 3–11. – https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-3-11.

4 **Bond, F. C.** The third theory of comminution // Mining Engineering. – 1952. – Vol. 4. – P. 33.

5 **Bond, F. C.** Lab equipment and tests help predict metal consumption in crushing and grinding units // Engineering and Mining Journal. – 1964. – Vol. 165. – № 6. – P. 169–176.

6 **Lee, J.** Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method // Journal of Sound and Vibration. – 2007. – Vol. 302. – № 1–2. – P. 185–196.

7 **Yildirim, V.** On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion // Meccanica. – 2012. – Vol. 47. – № 4. – P. 1015–1033.

8 **Yu, A. M., Hao, Y.** Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 74. – P. 65–72.

9 **Yu, A. M., Hao, Y.** Improved Riccati Transfer Matrix Method for Free Vibration of Non-Cylindrical Helical Springs Including Warping // Shock and Vibration. – 2012. – Vol. 19. – № 6. – P. 1167–1180.

10 Effect of water addition on the microstructure, lipid incorporation, and lipid oxidation of corn extrudates / J. Amft [and etc.] // European journal of lipid science and technology. – 2019. – Sci. 121. – № 9. 1800433.

Поступило в редакцию 27.01.26.
Поступило с исправлениями 04.02.26.
Принято в печать 12.02.26.

Б. А. Молдаханов[1], М. В. Дудкин[2], Т. Лешневский[3],
В. С. Яковлев[4], А. Ж. Байгунусов[5]
[1,2]«Европлюс Восток» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[3]Вроцлав ғылым және технологиялар университеті, Польша, Вроцлав қ.;
[4,5]Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
27.01.26 ж. баспаға түсті.
04.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
12.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЕКІНШІ РЕТТІ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ МАТЕРИАЛДАРДЫ ҰСАҚТАУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада екінші ретті математикалық модельдеуді қолдана отырып, серіппелі-роторлы диірмендермен материалдарды ұнтақтау процесінің технологиялық параметрлерін оңтайландыру бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген. Бес түрлі факторлармен экспериментті жоспарлау негізінде бес негізгі шығыс параметрлері үшін екінші ретті полиномдық модельдер алынды: ұнтақтау, өнімділік, жетек қуаты, меншікті энергия сыйымдылығы және меншікті металл сыйымдылығы. Толық факторлық эксперимент арқылы технологиялық параметрлер мен процестің шығыс сипаттамалары арасындағы байланысты сипаттайтын регрессиялық теңдеулер алынады. Модельдердің сәйкестігіне статистикалық талдау жасалды және шығыс параметрлерінің әрқайсысына әсер ететін маңызды факторлар анықталды. Теңдеулер жүйесінің аналитикалық шешімі негізінде минималды энергия шығыны мен өнімнің қажетті сапасымен максималды өнімділікті қамтамасыз ететін технологиялық параметрлердің оңтайлы мәндері табылды. Жабдықты теңшеу бойынша практикалық ұсыныстар әзірленді және технологиялық процестің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін параметрлердің өзгеруінің рұқсат етілген диапазондары анықталды. Зерттеу нәтижелері эмпирикалық түрде орнатылған жұмыс режимдерімен салыстырғанда қуат тұтынуды 8–12 % төмендете отырып, өнімділікті 15–20 % арттыру мүмкіндігін көрсетеді. Алынған модельдер мен оңтайландыру әдістемесі сусымалы материалдарды қайта өңдеу кәсіпорындарындағы технологиялық процестерді жетілдіру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: серіппелі-роторлы диірмендер, материалдарды ұнтақтау, ұнтақтау, математикалық модельдеу, параметрлерді оңтайландыру, экспериментті жоспарлау, энергия тиімділігі.

B. A. Moldakhanov[1], M. V. Doudkin[2], T. Leśniewski[3],
V. S. Yakovlev[4], A. Zh. Baigunussov[5]
[1,2]LLP «EUROPLYUS VOSTOK», Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[3]Wrocław University of Science and Technology, Poland, Wrocław
[4,5]East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk
Received 27.01.26.
Received in revised form 04.02.26.
Accepted for publication 12.02.26.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF FINENESS OF GRINDING OF MATERIALS ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING OF THE SECOND ORDER

The article presents the results of research on optimizing the technological parameters of the grinding process of materials by spring-rotor mills using second-order mathematical modeling. Based on the planning of an experiment with five variable factors, second-order polynomial models were obtained for five key output parameters: fineness of grinding, productivity, drive power, specific energy consumption, and specific metal consumption. Regression equations describing the relationship between the technological parameters and the output characteristics of the process are obtained by the method of a complete factor experiment. A statistical analysis of the adequacy of the models was carried out and the most significant factors influencing each of the output parameters were determined. Based on the analytical solution of systems of equations, optimal values of technological parameters are found that ensure maximum productivity with minimal energy consumption and the required product quality. Practical recommendations on equipment configuration have been developed and acceptable ranges of parameter variation have been determined to ensure the stability of the technological process. The results of the study show the possibility of increasing productivity by 15–20 % while reducing energy consumption by 8–12 % compared to empirically established operating modes. The obtained models and optimization techniques can be used to improve technological processes at bulk material processing plants.

Keywords: spring-rotor mills, grinding of materials, fineness of grinding, mathematical modeling, optimization of parameters, experimental planning, energy efficiency.

SRSTI 55.03.00

https://doi.org/10.48081/BGQF1915

M. Mursalykova[1], M. Kakimov[2], B. Iskakov[3],
A. Mustafayeva[4], A. Shulenova[5]
[1]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey;
[2,3,4,5]S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5904-9544
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1190-2195
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7665-8058
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9627-7543
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2812-075X
*e-mail: maigul_85@mail.ru

DEVELOPMENT OF A CENTRIFUGE WITH A CONICAL ROTOR FOR THE PRIMARY PURIFICATION OF VEGETABLE OILS

The article presents the results of the development and testing of a conical rotor centrifuge for the primary purification of vegetable oils, specifically safflower oil, using flax fibers as a filter material. The design of the installation is described, combining centrifugal separation with barrier filtration through a layer of fibrous material. Experimental studies were conducted to determine the optimal operating parameters: oil temperature (35 °C), mass fraction of impurities (0,1 %), and separation factor (1300). It has been established that the proposed technology allows achieving an oil purification degree of up to 93% and reducing the sludge content to 0,02 %. Using experimental design methods, a regression equation was obtained, describing the influence of the main factors on the process efficiency. The developed centrifuge is an economically efficient solution for small and medium-sized processing enterprises, promotes the implementation of resource-saving technologies and the utilization of secondary raw materials. Furthermore, it demonstrates significant potential for adaptation to other types of oils and production conditions.

Keywords: centrifuge, press, filtration, vegetable oil, flax fibers, mechanical impurities.

Introduction

The development of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan, focused on increasing the depth of processing of agricultural raw materials and producing high value-added products, requires the creation of modern, energy-efficient technologies and equipment. One of the strategically important subsectors is the processing of oilseeds, where a key stage, determining both the quality of the final product and the economic efficiency of production, is the primary purification of vegetable oils from mechanical impurities [1].

After pressing or extraction, the oil contains a significant amount of suspended solid particles (pulp, meal, cellular tissue), which negatively affect its consumer properties,

accelerate oxidation and hydrolysis processes during storage, and create technological difficulties at subsequent refining stages (hydration, neutralization, bleaching). Traditional purification methods, such as gravitational settling, frame or leaf filtration, have significant drawbacks: low productivity, high oil losses with waste, and the need to use expensive disposable filter materials or those requiring complex regeneration (perlite, diatomite, synthetic fabrics) [2].

In global practice, centrifugal equipment—separators, decanters, filtering centrifuges – is widely used to intensify suspension separation processes. However, their use in primary vegetable oil purification lines at small and medium-sized processing enterprises in Kazakhstan is limited by the high cost of imported equipment, maintenance complexity, and, often, suboptimal performance for processing viscous media with a high content of fibrous impurities. Existing centrifuge designs, as a rule, are based on sedimentation or sedimentation-filtration principles and do not provide for the use of loose, fibrous filter materials capable of ensuring fine purification [3;4].

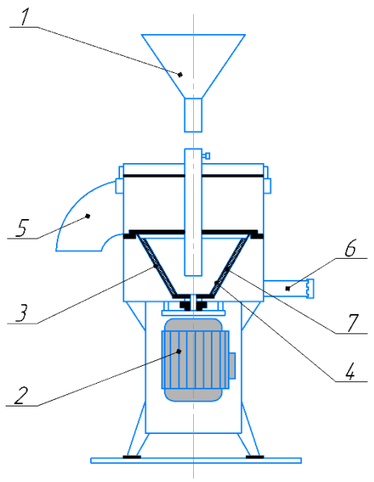
Thus, a technical challenge arises: to develop an affordable and effective centrifuge design that combines the advantages of centrifugal separation (high speed, compactness) with barrier filtration through a layer of inexpensive, ideally secondary, filter material. This will not only improve purification quality but also address the issue of utilizing agricultural processing waste (bast fibers, bran), implementing the principles of a circular economy [5].

The aim of this work is the development, manufacture of a prototype, and comprehensive experimental research of a conical rotor centrifuge, specifically designed for the primary purification of safflower oil using flax fibers as a filter element.

The developed design is of interest both to engineering enterprises producing equipment for the agro-industrial complex and to processing industries interested in modernizing production lines and reducing product costs.

Materials and Methods

The developed centrifuge (Fig. 1) consists of a housing, external and internal perforated conical rotors, an electric drive, and inlet and outlet nozzles. Flax fibers placed between the rotors are used as the filter material. The operating principle is based on phase separation under the action of centrifugal force: oil entering the feed chamber passes through the layer of fibers, where mechanical impurities are retained, and the purified product is discharged through the outlet nozzle.



1 – housing; 2 – electric drive; 3 – external filtering rotor;
4 – internal filtering rotor; 5 – sludge collector (sludge outlet vessel);
6 - purified oil outlet nozzle; 7 – filter material
Figure 1 – Conical rotor centrifuge

Comprehensive experimental studies were conducted to evaluate the technological characteristics of the developed conical rotor centrifuge and determine its optimal operating modes for safflower oil purification. The methodology included several sequential stages covering raw material preparation, equipment setup, a series of experiments, and data analysis.

For the tests, a laboratory-industrial prototype of the centrifuge was manufactured in accordance with the developed design documentation and the invention patent [7;8].

Unrefined cold-pressed safflower oil obtained from seeds of the «Akram» variety on an improved laboratory screw press with a pressure-regulating mechanism was used as the main purification object [9].

The initial oil was characterized by a high content of mechanical impurities (pulp) – 0,45±0,136% by weight, which simulated the worst conditions after pressing. Before each series of experiments, the oil was homogenized.

Four types of secondary raw materials were investigated:

Flax fibers (FF): Technical flax fibers with a length of 10-50 mm, preliminarily degreased and loosened.

Wheat bran (WB).

Rye bran (RB).

Oat bran (OB).

All materials were dried to constant weight at 105°C and sieved to remove the dust fraction prior to use.

A predetermined mass and thickness of filter material was placed on the inner surface of the outer rotor. The centrifuge was started and brought to the specified rotational speed. Oil, heated to the required temperature in a thermostatic vessel, was pumped into the rotating drum via the inlet nozzle. The chamber filling time and the outflow time of purified oil from the outlet nozzle were recorded. After completion of the cycle (determined by a drop in the output flow), the centrifuge was stopped.

Samples were taken: purified oil (from the outlet nozzle) and spent filter material with sludge (from the inter-rotor space). The purified oil was weighed and analyzed for sludge content (Y_3) according to the standard method (GOST 5481-2014). Sludge from the filter material was extracted with hexane to determine irreversible oil losses. The filtration rate (Y_1) and the yield of purified oil (Y_2) were calculated.

Each combination of factors was repeated at least three times to ensure the statistical reliability of the results. To assess hydraulic resistance (Y_4), pressure gauges were installed on the oil supply and discharge lines, with measurements taken under steady-state filtration conditions.

The obtained experimental data underwent statistical processing to determine mean values, standard deviations, and confidence intervals. The following methods were used to analyze the influence of factors and search for the optimum:

The method of plotting dependency graphs (one-factor analysis).

The regression analysis method for deriving empirical equations that link output parameters (Y) with varied factors (X). Model construction and adequacy verification were performed using specialized software (STATISTICA, MS Excel).

The significance of differences between experimental series with different filter materials was tested using analysis of variance (ANOVA).

Thus, the applied methodology provided a systematic approach to studying the centrifuge's operation, allowing not only for the acquisition of quantitative characteristics of its efficiency but also for establishing cause-and-effect relationships between design/operational parameters and the process's technological indicators.

Results and discussion

Coding the intervals and levels of parameter variation is a key stage in constructing a mathematical model. To account for the specific characteristics of the raw material, the ranges and levels of change for the input factors were coded.

To obtain a mathematical model for optimizing the safflower oil filtration process, represented as a regression equation, a rotatable second-order design (Box plan) was used. In this design, the number of factors x is 3, the number of experiments exceeds 20, the number of experiments at the central point is 6, and the number of equation coefficients is 10 [10;11].

The optimization criteria for the technological process of safflower oil filtration (Q, %) are influenced by the following factors: oil temperature (T, °C), mass fraction of defatted impurities and sediment (I, %), and separation factor (Fr). These factors reflect real production conditions.

Table 1 presents the coding of intervals and levels of change for the input factors to optimize oil filtration parameters.

Table 1 – Coding of intervals and levels of change for variable input factors

Factors		Variation Levels					Variation Intervals
Criterion	Coding	-1,68	-1	0	+1	+1,68	
T, ^{0}C	x_1	31,6	33	35	37	38,4	2
I, %	x_2	0,004	0,08	0,1	0,3	0,4	0,2
Fr	x_3	963,6	1100	1300	1500	1636,4	200

The experimental part was carried out in accordance with the compiled design matrix. The experimental design matrix is presented in Table 2.

Table 2 – Matrix of the rotatable planning for experimental studies

№	Coded Values			Natural Values			Experimental Values
	x_1	x_2	x_3	T,^{0}C	I, %	Fr	Q, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	-1	33	0,08	1100	
2	-1	-1	1	33	0,08	1500	
3	-1	1	-1	33	0,3	1100	
4	-1	1	1	33	0,3	1500	
5	1	-1	-1	37	0,08	1100	
6	1	-1	1	37	0,08	1500	
7	1	1	-1	37	0,3	1100	
8	1	1	1	37	0,3	1500	
9	1,68	0	0	38,4	0,19	1300	
10	-1,68	0	0	31,6	0,19	1300	
11	0	1,68	0	35	0,4	1300	
12	0	-1,68	0	35	0,004	1300	
13	0	0	1,68	35	0,19	1636,4	
14	0	0	-1,68	35	0,19	963,6	
15	0	0	0	35	0,19	1300	
16	0	0	0	35	0,19	1300	
17	0	0	0	35	0,19	1300	
18	0	0	0	35	0,19	1300	
19	0	0	0	35	0,19	1300	
20	0	0	0	35	0,19	1300	

Properties of the design matrix. The design matrix possesses properties that, from the perspective of the results obtained from the mathematical model implementation, allow us to consider its construction optimal. When representing the model as a regression equation, it is essential that the coefficients are efficient and the accuracy of predicting the state variable values remains the same in any direction of the factor space. These requirements are formulated as the main conditions of orthogonality and rotatability.

The optimization criterion Q (%) is influenced by the following factors: x_1, x_2, x_3, which reflect real production conditions. Therefore, it is appropriate to organize the system of regression equations in accordance with these factors.

The regression equation has the following form:

$$Q_1=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_3+b_{23}x_2x_3+b_{11}x_1^2+b_{22}x_2^2+b_{33}x^2{}_3 \quad (1)$$

The optimal parameter values ensuring maximum efficiency can be determined by finding the extremum of this function or using optimization methods [12, 13].

Optimization of the safflower oil filtration technology. Experimental studies were conducted to achieve maximum yield of safflower oil. A series of experiments were performed with various ratios of the input parameters x. The results are presented in Table 2.

Table 2 – Results of Experimental Studies

№	Coded Values			Natural Values			Experimental Values
	x_1	x_2	x_3	T,^{0}C	I, %	Fr	Q, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	-1	33	0,08	1100	87
2	-1	-1	1	33	0,08	1500	89
3	-1	1	-1	33	0,3	1100	88
4	-1	1	1	33	0,3	1500	89
5	1	-1	-1	37	0,08	1100	88
6	1	-1	1	37	0,08	1500	89
7	1	1	-1	37	0,3	1100	89
8	1	1	1	37	0,3	1500	90
9	-1,68	0	0	38,4	0,19	1300	91
10	1,68	0	0	31,6	0,19	1300	87
11	0	-1,68	0	35	0,4	1300	88
12	0	1,68	0	35	0,004	1300	87
13	0	0	-1,68	35	0,19	1636,4	91
14	0	0	1,68	35	0,19	963,6	91
15	0	0	0	35	0,19	1300	92
16	0	0	0	35	0,19	1300	92
17	0	0	0	35	0,19	1300	93
18	0	0	0	35	0,19	1300	93
19	0	0	0	35	0,19	1300	93
20	0	0	0	35	0,19	1300	92

From Table 2, it can be seen that 20 experiments were conducted, including: 15 experiments with different percentage ratios of safflower oil temperature parameters, mass fraction of defatted impurities and sediment, and separation factor, and 5 experiments at the central (zero) point of the x values. The scatter of results at the central point is ұ1.

The optimization of the technological process for safflower oil filtration is shown in Figures 2, 3, and 4.

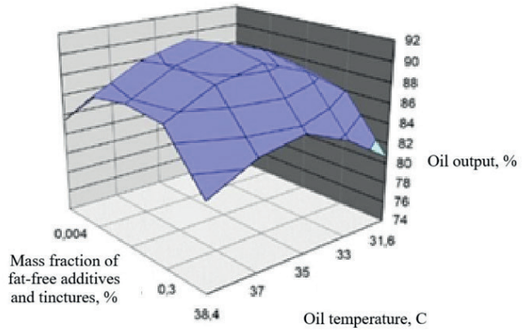


Figure 2 – Dependence of Safflower Oil Yield on Mass Fraction of Defatted Impurities and Sediment, and Oil Temperature

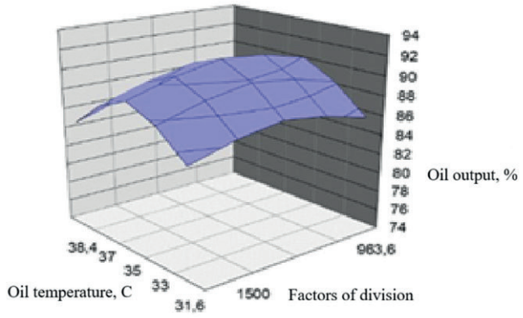


Figure 3 – Dependence of Safflower Oil Yield on Separation Factor and Oil Temperature

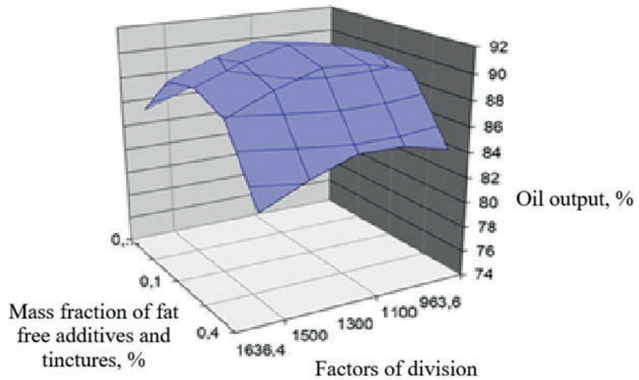


Figure 4 – Dependence of Safflower Oil Yield on the Mass Fraction of Defatted Impurities and Sediment and the Separation Factor

The figures above illustrate how filtration parameters influence safflower oil yield, which ranges from 87 % to 93 %.

The optimal oil temperature is 35 °C, varying within the range of 31,6 °C to 38,4 °C. This provides optimal conditions for the separation of oil components. The mass fraction of defatted impurities and sediment is recommended to be maintained at 0.1%, as this contributes to increased oil purity and improves the quality of the final product.

The optimal separation factor is 1300, varying within the range of 963,6 to 1636,4. Adjusting this parameter is crucial for efficient component separation and achieving the required oil yield.

The oil yield should be targeted within the range of 87–93 %, with the upper limit of 93 % being the most desirable, as it ensures maximum process efficiency and compliance with product quality requirements.

By maintaining these parameters during the filtration process, optimal conditions can be achieved for producing safflower oil with high productivity and superior quality.

The best efficiency value Q is attained through optimization of the safflower oil filtration process using the regression equation, which takes the following form:

$$Q = 92{,}5930088 - 0{,}2723x1 - 0{,}096624x2 + 0{,}366x3 + 0{,}125x1x2 - 0{,}125x3 - 0{,}125x2x3 - 1{,}37631x12 - 1{,}90551x22 - 0{,}67071x23 \quad (2)$$

This equation allows for modeling and predicting the yield of safflower oil based on various process parameters.

The coefficients for the variables and their interactions reflect the significance of each parameter and enable the assessment of its influence on overall efficiency. For example, negative coefficients indicate that an increase in the corresponding parameters reduces efficiency, while positive coefficients demonstrate the opposite effect.

The optimal parameter values for achieving maximum efficiency can be determined by solving the equation or applying optimization methods. These optimal values correspond to conditions that ensure the maximum yield of safflower oil, such as optimal temperature, mass fraction of defatted impurities and sediment, and separation factor.

Table 3 – Levels of Variable Factors Influencing Safflower Oil Yield

Name of indicators	Levels			
Variable factors				
Separation factor	400	800	1300	1800
Sediment thickness, m	0,001	0,05	0,07	0,1
Thickness of flax fibers, m	0,01	0,015	0,020	0,025
Target value				
Oil output, l/hour	300	500	700	900

The processing of the scientific research results, graph construction, and mathematical analysis were carried out using the statistical packages MiniTab, Excel, and SigmaPlot. Based on the levels of the variable factors and target values, a multifactorial experimental plan was developed, and the calculations were performed using the Shapiro-Wilk test.

Conclusions

The conducted research resulted in the development and testing of a conical rotor centrifuge designed for the primary purification of vegetable oils using flax fibers as a filter material. The developed design combines the advantages of centrifugal separation and barrier filtration, which significantly enhances the efficiency of removing mechanical impurities from the oil.

Experimental studies confirmed the high efficiency of the proposed technology. Under the centrifuge's optimal operating parameters (oil temperature of 35°C, mass fraction of impurities 0,1%, separation factor 1300), a purification degree of safflower oil of up to 93% was achieved, with the sludge content reduced to 0,02%. The use of flax fibers as a filter material demonstrated both technological and economic feasibility, ensuring high purification quality and the possibility of utilizing secondary raw materials.

Mathematical modeling of the filtration process based on rotatable experimental design made it possible to derive a regression equation that adequately describes the relationship between key technological parameters and the yield of purified oil.

The developed centrifuge represents an economically viable and technologically efficient solution for small and medium-sized enterprises in Kazakhstan's processing industry. It helps reduce dependence on imported equipment, lower operational costs, and improve the quality of the final product.

Financing information

This study was conducted within the framework of the «Zhas Galym» grant funding program for young researchers under Project AP22685422 «Improvement of Pressing Equipment to Enhance the Efficiency of Mustard Oil Production» for 2024-2026, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

REFERENCES

1 **Ganesan, K., Sukalingam, K., Xu, B.** Impact of consumption and cooking manners of vegetable oils on cardiovascular diseases. – A critical review // Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Vol. 71. – P. 132–154.

2 **Tindall, A. M., et al.** Replacing saturated fat with walnuts or vegetable oils improves central blood pressure and serum lipids in adults at risk for cardiovascular disease: a randomized controlledfeeding trial // Journal of the American Heart Association. – 2019. – Vol. 8. – № 9. – e011512.

3 **Awogbemi, O., Onuh, E. I., Inambao, F. L.** Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils // International Journal of LowCarbon Technologies. – 2019. – Vol. 14. – № 3. – P. 417–425.

4 **Ghouila, Z., Sehailia, M., Chemat, S.** Vegetable oils and fats: Extraction, composition and applications // PlantBased «Green Chemistry 2.0»: Moving from Evolutionary to Revolutionary. – 2019. – P. 339–375.

5 **Chew, S. C., Nyam, K. L.** Refining of edible oils // Lipids and Edible Oils. – Academic Press, 2020. – P. 213–241.

6 **Choriyorovna, E. N., Normuminovich, A. A., Kizi, N. U. U.** Effective technology for cleaning mechanical compounds in vegetable oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2022. – № 1–2. – P. 13–17.

7 **Iskakov, B., et al.** Improving the technology of primary purification of the safflower oil using secondary products of processing on a biological basis // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 17. – Article 3275.

8 **Искаков, Б. М., Какимов, М. М., Тохтаров, Ж. Х., Мурсалыкова, М. Т., Сатаева, Ж. И.** Центрифуга для глубокой очистки растительных масел от механических примесей: пат. 36262 РК. Заявл. 15.09.2023.

9 **Kakimov, M., Mursalykova, M., Gajdzik, B., Wolniak, R., Kokayeva, G., Bembenek, M.** Optimal ways of safflower oil production with improvement of press equipment // Foods. – 2024. – Vol. 13. – Article 1909.

10 **Громыко, Г. Л.** Теория статистики: практикум. – 4е изд., доп. и перераб. – М. : ИНФРАМ, 2010. – 279 с.

11 **Ефимова, М. Р., Петрова, Е. В., Румянцев, В. Н.** Общая теория статистики: учебник. – 2е изд., испр. и перераб. – М. : ИНФРАМ, 2010.

12 **Сокулин, В. Л. [и др.]; под ред. М. Г. Назарова.** Курс социальноэкономической статистики: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Статистика». – 6е изд., испр. и доп. – М. : ОмегаЛ, 2007. – 987 с.: ил., табл. – (Высшее экономическое образование: ВЭО). – ISBN 5365006852.

13 Социальноэкономическая статистика: учебник / под ред. М. Р. Ефимовой. – 2е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 591 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 9785991637718.

REFERENCES

1 **Ganesan K., Sukalingam K., Xu B.** Impact of consumption and cooking manners of vegetable oils on cardiovascular diseases – A critical review. Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Vol. 71. – P. 132–154.

2 **Tindall A. M., KrisEtherton P. M., Petersen K. S., et al.** Replacing saturated fat with walnuts or vegetable oils improves central blood pressure and serum lipids in adults at risk for cardiovascular disease: A randomized controlledfeeding trial. Journal of the American Heart Association, 2019. – Vol. 8, № 9. – e011512.

3 **Awogbemi O., Onuh E. I., Inambao F. L.** Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils. International Journal of LowCarbon Technologies. – 2019. – Vol. 14, № 3. – P. 417–425.

4 **Ghouila, Z., Sehailia, M., Chemat, S.** Vegetable oils and fats: Extraction, composition and applications // PlantBased «Green Chemistry 2.0»: Moving from Evolutionary to Revolutionary. – 2019. – P. 339–375.

5 **Chew, S. C., Nyam, K. L.** Refining of edible oils // Lipids and Edible Oils. – Academic Press, 2020. – P. 213–241.

6 **Choriyorovna, E. N., Normuminovich, A. A., Kizi, N. U. U.** Effective technology for cleaning mechanical compounds in vegetable oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2022. – № 1–2. – P. 13–17.

7 **Iskakov, B., et al.** Improving the technology of primary purification of the safflower oil using secondary products of processing on a biological basis // Foods. – 2023. – Vol. 12, № 17. – Article 3275.

8 **Iskakov B. M., Kakimov M. M., Tokhtarov Zh. Kh., Mursalykova M. T., Sataeva Zh. I.** Tsentritfuga dlya glubokoy ochistki rastitel'nykh masel ot mekhanicheskikh primesey [Centrifuge for deep purification of vegetable oils from mechanical impurities]. Patent № 36262. – 2023. – Republic of Kazakhstan.

9 **Kakimov, M., Mursalykova, M., Gajdzik, B., Wolniak, R., Kokayeva, G., & Bembenek, M.** Optimal ways of safflower oil production with improvement of press equipment. Foods. – 2024. – Vol. 13. – Article 1909.

10 **Gromyko, G. L.** Teoriya statistiki: praktikum [Theory of statistics: Workbook] (4th ed.). Moscow: INFRAM., 2010. 279 p.

11 **Yefimova, M. R., Petrova, E. V., Rumyantsev, V. N.** Obshchaya teoriya statistiki [General theory of statistics] (2nd ed.). Moscow: INFRAM. 2010.

12 **Sokolin V. L., Nazarov M. G. (ed.all).** Kurs otsial'no Kurs sotsial'noekonomicheskoy statistiki [Course of socioeconomic statistics] (6th ed.). Moscow: OmegaL. ISBN 5365006852.

13 **Yefimova M. R. (ed.all)**. Sotsial'noekonomicheskaya statistika [Socioeconomicstatistics] (2nd ed.). Moscow: Yurayt Publishing. ISBN 9785991637718. – 2017.

Received 14.01.26.
Received in revised form 25.01.26.
Accepted for publication 17.02.26.

***М. Т. Мурсалыкова[1], М. М. Какимов[2], Б. М. Искаков[3],**
***А. К. Мустафаева[4], А. М. Шуленова[5]**
[1]Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.
[2,3,4,5]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы Астана қ.
14.01.26 ж. баспаға түсті.
25.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
17.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӨСІМДІК МАЙЛАРЫН АЛҒАШҚЫ ТАЗАЛАУҒА АРНАЛҒАН КОНУСТЫ РОТОРЛЫ ЦЕНТРИФУГАНЫ ӘЗІРЛЕУ

Мақалада мақсары майын алғашқы тазалау үшін зығыр талшықтарын сүзгіш материал ретінде пайдаланып жасалған конусты роторлы центрифуганың әзірлену және сынау нәтижелері келтірілген. Қондырғының құрылымы сипатталған, ол орталықтан тепкіш бөлуді талшықты материал қабаты арқылы өтетін тосқауылды сүзгішемен біріктіреді.

Жұмыстың оңтайлы режимдерін анықтау үшін тәжірибелік зерттеулер жүргізілді: май температурасы (35°С), қоспалардың массалық үлесі (0,1%) және бөлу коэффициенті (1300). Ұсынылған технологияның майды 93% дейін тазалауға және шламаның құрамын 0,02% дейін төмендетуге мүмкіндік беретіні анықталды. Тәжірибені жоспарлау әдістері арқылы процестің тиімділігіне негізгі факторлардың әсерін сипаттайтын регрессиялық теңдеу алынды. Әзірленген центрифуга шағын және орта өңдеу кәсіпорындары үшін экономикалық тиімді шешім болып табылады, ресурстарды үнемдейтін технологияларды енгізуге және қайта өңделген шикізатты пайдалануға ықпал етеді. Сонымен қатар, ол басқа түрлі майлар мен өндірістік жағдайларға бейімделу үшін айтарлықтай әлеуетке ие.

Кілтті сөздер: центрифуга, пресс, сүзу, өсімдік майы, зығыр талшықтары, механикалық қоспалар.

***М. Т. Мурсалыкова[1], М. М. Какимов[2], Б. М. Искаков[3],**
***А. К. Мустафаева[4], А. М. Шуленова[5]**
[1]университет Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей;
[2,3,4,5]Казахский аротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана
Поступило в редакцию 14.01.26.
Поступило с исправлениями 25.01.26.
Принято в печать 17.02.26.

РАЗРАБОТКА ЦЕНТРИФУГИ С КОНИЧЕСКИМ РОТОРОМ ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ ОЧИСТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

В статье представлены результаты разработки и испытаний конической роторной центрифуги для первичной очистки растительных масел, в частности сафлорового, с применением льняных волокон в качестве фильтрующего материала. Описана конструкция установки, сочетающей центробежное разделение с барьерной фильтрацией через слой волокнистого материала.

Проведены экспериментальные исследования для определения оптимальных режимов работы: температуры масла (35 °С), массовой доли примесей (0,1 %) и фактора разделения (1300). Установлено, что предложенная технология позволяет достичь степени очистки масла до 93 % и снизить содержание шлама до 0,02 %. Методами планирования эксперимента получено регрессионное уравнение, описывающее влияние основных факторов на

эффективность процесса. Разработанная центрифуга является экономически эффективным решением для малых и средних перерабатывающих предприятий, способствует внедрению ресурсосберегающих технологий и утилизации вторичного сырья. Кроме того, она обладает значительным потенциалом для адаптации к другим видам масел и производственным условиям.

Ключевые слова: центрифуга, пресс, фильтрация, растительное масло, льняные волокна, механические примеси.

FTAMP 55.03.05

https://doi.org/10.48081/BGQF1916

Д. А. Сарбаев[1], *Т. М. Бузауова[2]

[1,2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8014-6823

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

*e-mail: t.buzauova@ktu.edu.kz

ІРІМОДУЛЬДЫ ҚҰРАСТЫРМАЛЫ ТІСТІ ДӨҢГЕЛЕК ҚАҚПАҒЫНЫҢ ЖӘНЕ БЕКІТУ ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУ ЖӘНЕ НЕГІЗДЕУ

Жұмыста ірі модульді тістері енгізілетін және дискінің екі жағынан орнатылған қақпақтары бар құрастырмалы тісті дөңгелектің конструкциясы қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі құрастырмалы конструкцияларды қолдану арқылы тісті беріліcтердің жөндеуге жарамдылығын және қызмет ету мерзімін арттыру қажеттілігімен, сонымен қатар олардың беріктік сенімділігін сақтау талаптарымен негізделеді. Қарастырылып отырған конструкцияның ерекшелігі – тістер қақпақтар арқылы күшпен қысылмайды: тістер корпус ойықтарына отырғызу арқылы бекітіледі, ал қақпақтар тістердің осьтік ығысуын шектейтін көмекші элемент қызметін атқарады.

Қақпақтарды бекітетін элементтердің аналитикалық есебі ілінісу күшінің осьтік құрамдас бөлігінің әсерін және бір мезгілде жұмыс істейтін тістер арасындағы жүктеменің таралуын ескере отырып орындалды. Бұрамалардың беріктігі қиылу шарттары және рұқсат етілген кернеулер бойынша тексерілді, бұл олардың типоөлшемі мен санын негіздеуге мүмкіндік берді. Қақпақтардың қалыңдығын таңдауға ерекше назар аударылды, ол ілінісу процесіне әсер етпеу үшін және тісті дөңгелектің салмағын ауырлатпау мақсатында ең аз мәнде қабылданды.

Аналитикалық есеп нәтижелерін растау үшін ANSYS бағдарламалық кешенінде соңғы элементтер әдісімен қақпақтар мен бекіткіш элементтердің кернеулі-деформацияланған күйіне сандық модельдеу жүргізілді. Модельдеу нәтижесінде қақпақтарда да, бұрамаларда да кернеулі күйдің төмен деңгейін көрсететін негізгі кернеулер өрістері алынды. Қабылданған қақпақ қалыңдығы мен бекіткіш параметрлері беріктіктің елеулі қорын қамтамасыз ететіні және қауіпті кернеулердің пайда болуына әкелмейтіні анықталды. Аналитикалық және сандық нәтижелерді салыстыру қабылданған есептік схеманың дұрыстығын және ұсынылған конструктивтік шешімді ірі модульді тістері бар құрастырмалы тісті дөңгелектерді жобалау кезінде қолдану мүмкіндігін растады.

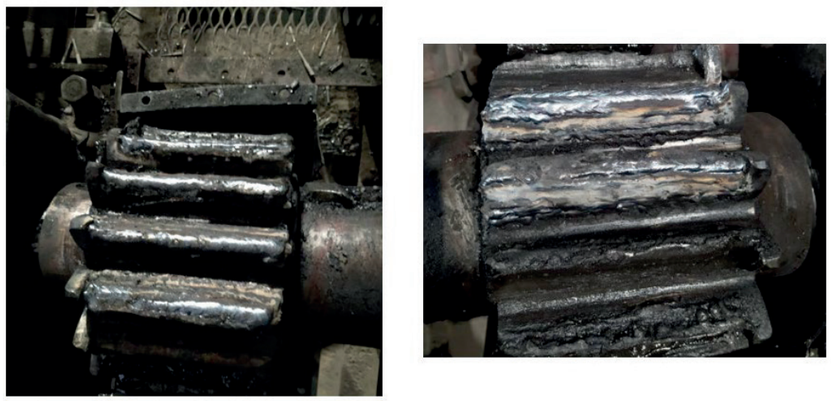
Кілтті сөздер: құрастырмалы тісті дөңгелек, қақпақ, бекітетін элементтер, беріктік есептері, сандық модельдеу, соңғы элементтер әдісі.

Кіріспе

Балшыққа арналған пластиналық қоректендіргіш сусымалы және ірі кесектерді, оның ішінде ылғалды және сазды материалдарды бункерлерден ұсатқыштарға басқа технологиялық жабдыққа біркелкі беруге арналған.

Жұмыс кезінде пластиналық қоректендіргіштің жеке жетек түйіндері тозады және жұмыс қабілеттілігін жоғалтады. «Central Asia Cement» АҚ кәсіпорнында тозған тісті дөңгелектер қалпына келтірілмейді және балқытуға жіберіледі. Жабдықты одан әрі пайдалануды қамтамасыз ету үшін кәсіпорын шетел жеткізушілерінен жаңа тісті дөңгелектер сатып алады.

Тісті дөңгелектер тозғанда (1-сурет) олардың көбіне тістерінің жұмыс беттері мен шыңдары тозады, ал дөңгелектің денесі мен қондыратын тесігі қанағаттанарлық техникалық күйді сақтайды.



1-сурет – «Central Asia Cement АҚ кәсіпорнында тозған тісті дөңгелектер

Жұмыс жөндеуді жақсартуға және техникалық қызмет көрсетуді жеңілдетуге бағытталған ауыстырылатын тістер дөңгелектекті жүйесі бар беріліс құрылымын қарастырады [1]. Ауыстырылатын тістерді жүзеге асырудың сындарлы аспектілеріне назар аударылады. Бұл ретте беріліс модулі, пайдалану шарттары, тістердің кернеулі-деформацияланған жай-күйі туралы мәселелер қаралмайды, бұл оның ауыр жүктемелі жетектер үшін қолданылуын шектейді.

Бір тіс сынған кезде берілістің ақауларға төзімділігін арттыру мақсатында ауыстырылатын тістер жүйесі келесі жұмыста қарастырылған [2] . Алайда, бұл жұмыста кірістірілген тістің доңғалақ корпусымен түйісу аймағындағы кернеу күйі талданбайды, сонымен қатар пластиналық жетектердің ауыр жағдайында жұмыс істейтін үлкен модульді берілістердің ерекшеліктері ескерілмейді. Осыған байланысты алынған нәтижелер ауыр жүктелген механизмдердің үлкен модульдік берілістері үшін шектеулі қолданысқа ие.

Радиалды қозғалмалы тістері бар ішкі тісті беріліс мына жұмыста қарастырылған [3]. Бұл жұмыс сырғануды домалауға айналдыру арқылы

салыстырмалы сырғанауды азайтуға бағытталған. Жұмыс конструктивті идея ретінде қызығушылық тудырады, бірақ тістерд бекітетін элементтердің қалай таңдалғаны қарастырылмаған.

Корпусқа алынбалы қосылыстармен (бұрандалар) бекітілген ауыстырылатын тістері бар тісті дөңгелектің конструкциясын ұсынады, бұл жөндеуді жеңілдетеді және қондырғының бос уақытын азайтады [4]. Патент сонымен қатар сегменттерді бөлу нұсқаларын, материалдарды және тұрақтылықты жақсарту жолдарын ұсынады. Алайда, патент тістердің шиеленіскен күйін талдаумен тікелей байланысты мәселелерді шешпейді-бұл сипатталған өнертабыстан тыс техникалық мәселелер болып қала береді.

Соңғы жылдары зерттеушілерді жөндеу шығындарын азайтуға және жабдықтың тоқтап қалуын азайтуға мүмкіндік беретін ауыстырылатын тістері бар құрастырмалы тісті дөңгелектер қызығушылығын тудырып отыр. Бірқатар жұмыстарда [2; 3; 4] ауыстырылатын тістерді қолдану дөңгелектің корпусын сақтай отырып, тек тозған элементтерді ауыстыруға немесе қалпына келтіруге мүмкіндік беретіндігін атап өтеді.

Материалдар мен әдістері

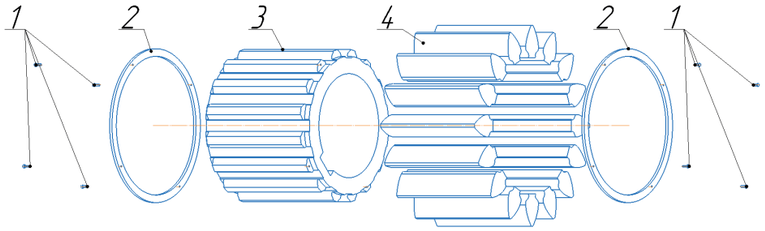
Зерттеудің мақсаты құрастырмалы тісті дөңгелектің қақпағы мен бекітетін элементтерінің параметрлерін негіздеу болып табылады.

Зерттеу әдістемесі: қақпақ пен бекітетін элементтерінің параметрлерін, беріктік есептеулерін әзірлеу және негіздеу, сондай-ақ конструкция элементтерінің кернеулі-деформацияланған күйін сандық модельдеу.

Зерттеу әдістері: патенттік және әдеби талдау, аналитикалық әдіс, ақырғы элементтер әдісімен сандық модельдеу.

Бұл жағдай бүкіл дөңгелекті бөлшектемей, тек тозған элементтерді қалпына келтіруге немесе ауыстыруға мүмкіндік беретін орнатылатын тістері бар құрастырылатын тісті дөңгелектер конструкциясының дамуын негіздейді.

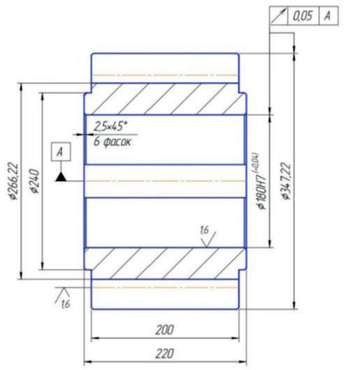
Әзірленген құрастырмалы тісті дөңгелек 3 корпустан, 4 ауыстырылатын тістерден және 2 қақпақтардан тұрады. Қақпақтар ірі модульді тістердің осьтік бекітілуін қамтамасыз етеді. Ауыстырылатын тістер корпустың радиалды ойықтарына орнатылады және дөңгелектің жұмыс тәжін құрайды. Ауыстырылатын тістердің осьтік жылжуын болдырмау үшін тәждің екі жағында 1 – бұрандалармен дөңгелек корпусына бекітілген қақпақтар бар. Құрастырмалы тісті дөңгелектің жалпы көрінісі 2-суретте көрсетілген.



2-сурет – Құрастырмалы тісті дөңгелек

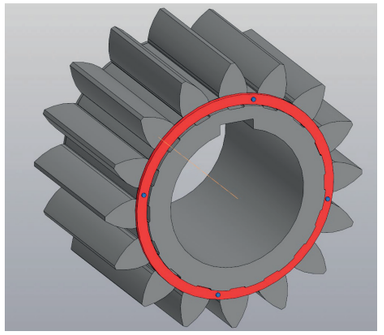
Ұсынылған конструкцияның ерекшелігі ауыстырылатын тістердің күшпен қысылмауы. Тістер көрпуста арнайы пішінмен орындалған ойықтарына орнатылады, ал қақпақтар орнатылған тістерді осьтік жылжытпайды.

Құрастырмалы тісті дөңгелек сенімділігі көбінесе қақпақтың беріктігі мен қаттылығымен, сондай-ақ қақпақты бекітетін элементтерді дұрыс таңдаумен анықталады. Қақпақтың диаметрі 240 мм (сурет 3). Бұл диаметрдің таңдалған себебі қақпақтың жетектегі дөңгелекпен байланысын болдырмау, ауыстырылатын тістердің негізін сенімді түрде жабу қажеттілігіне байланысты.



3-сурет – Тісті дөңгелек сызбасының бөлігі

Қақпақтың қалыңдығы 5 мм тең деп қабылданған. Ең аз мүмкін болатын қалыңдықты таңдау себебі, конструкцияда қақпақ айналу моментін қабылдамайды және тістерді күшпен қыспайды. Қақпақтың негізгі функциясы ауыстырылатын тістердің осьтік қозғалысын шектеу, сондықтан оған әсер ететін күштердің шамасы аз (4-сурет).



4-сурет – Құрастырмалы тісті дөңгелектің қақпағы

Қақпақтың қалыңдығы мен сыртқы диаметрінің шамасын үлкейту тиімсіз, өйткені бұл тісті дөңгелектің салмағын ауырлатады және тісті дөңгелектің жұмысы кезінде қақпақтың жетектік тісті дөңгелекке тиіп кету қаупін тудырады. Сондықтан, қақпақтың геометриялық параметрлері конструктивтік және пайдалану шектеулерін ескере отырып, барынша азайтылды.

Бекітетін элементтерді есептеу. Қақпақты тісті дөңгелектің корпусына бекіту шеңбер бойынша біркелкі орналасқан бұрамалардың көмегімен жүзеге асырылады. Осы конструкциядағы бұрамалар қақпақты бекітуге және дөңгелек корпусына осьтік жүктемені беруге арналған.

Ауыстырылатын тістерге әсер ететін осьтік күш анықталады [5, 6]. Тік тісті берілістер үшін:

$$F = (0{,}05 .. .0{,}1) F_t$$

Іліністегі шеңберлік күш:

$$F = \frac{2T}{d} = \frac{2 \cdot 204794}{288} = 1442{,}18 H$$

Онда: $F_a = 0 .1 \quad 1442.18 = 144.218$Н

Қақпаққа әсер ететін осьтік есептеуші күшті жүктеменің бірдей таралмауын ескере отырып қабылданды:

$$F k_{расч} = F_a = 1.5 \cdot 144.218 = 216{,}327 H$$

Мұндағы k =1.2…1.5 жүктеменің біркелкі таралмауын ескеретін коэффициент.
Бұрамадағы мүмкін кернеу:

$$\sigma_{доп} = \frac{\sigma_{0,2}}{n} = \frac{640}{2} = \quad 320 МПа \ ,$$

мұндағы n = 1,5 …2 – қор коэффициенті.

σ0,2 – бұраманың беріктік класы бойынша ағу шегі [6]. Беріктік шегінің класын 8.8 қабылданды.

Бір бұрамаға әсер ететін мүмкін күш анықталады::

$$F_в = \sigma_{доп} \cdot A = 3\ 20 \cdot 20.1 = 6\ 432 H$$

мұндағы А – бұрама ауданы: $A = 2\ 0.1 мм^2$ [6] [6] бойынша.

Бұраманың беріктік шарты [6]:

$$\frac{\pi d_1^2}{4}[\sigma]_p = F,$$

Осы формуладан:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma]_p}},$$

Мұндағы F – бұраманың осі бойынша әсер ететін күш, Н;
d_1 – бұаманың ішкі диаметрі, мм;
[σ] – созылу кезіндегі мүмкін кернеу, МПа.

F күші тістердің санын ескере отырып ауырлық күш ретінде қабылданады:

$$F = mgz,$$

мұндағы m – ауыстырылатын тістердің салмағы, кг;
g – еркін түсу үдеуі, 9.8 м/с²;
z – ауыстырылатын тістердің саны.

Пластиналы қоректендіргіштің ауыстырылатын тістері бар дөңгелек үшін бұрама материалы болат 3, оның $[\sigma_p] = 90$ МПа, ауыстырылатын бір тістің салмағы m=2.366 кг:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4mgz}{\pi[\sigma_p]}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.366 \cdot 9,8 \cdot 16}{3,14 \cdot 90}} = 2.29 мм.$$

Есептелген ішкі диаметр бойынша М3 бұрамасы қабылданды.
Ең аз бұрамалардың саны келесі формуламен анықталады [6, 7]:

$$z = \frac{F}{[\sigma_p]A},$$

мұндағы z – ең аз бұрамалардың саны;
F – салмақ күші, Н;
А – бұраманың көлденең қимасының ауданы, мм².

$$z = \frac{2,366 \cdot 9,8 \cdot 16}{90 \cdot 20,1} = 0,20$$

Есептеулер бойынша бекітетін бұраманың саны кем дегенде біреу болуы керек. Беріктік шарты есебінің қорытындысында z<1 алынды, яғни беріктік шарты бойынша бір бұрама жеткілікті. Жүктеменің бірдей таралауы, қақпақтың қатаңдығын және конструктивті ұсыныстарды ескере отырып бұрамалардың саны z = 4 қабылданды.

Созу кернеуін аналитикалық есептеуді орындаймыз [6]:

$$\sigma_{mw} = \frac{F_w}{A_w},$$

мұндағы F_w – бұрамаға әсер ететін осьтік күш, ауыстырылатын тістердің салмағымен (ауыстырылатын төрт тістің салмағы m=9,49 кг) және тартылу күшінен қабылданады 9806,6 мм/с ²;
A_w – бұраманың қимасының ауданы.

Бұраманың қимасының ауданы A_w мына формуламен анықталады:

$$A_w = 0,785 d^2$$

мұндағы d –бұраманың бұранда диаметрі.
Кернеуді есептейміз:

$$\sigma_{mw} = \frac{9,49 \cdot 9,8}{0,785 \cdot 3^2} = \frac{93,06}{7,065} = 13,17 МПа.$$

Есептелген кернеу болат 3 материалы үшін жіберілетін созылу кернеуін қанағаттандырады (13,17<90) [1].
Беріктік қор коэффициенті есептеледі:

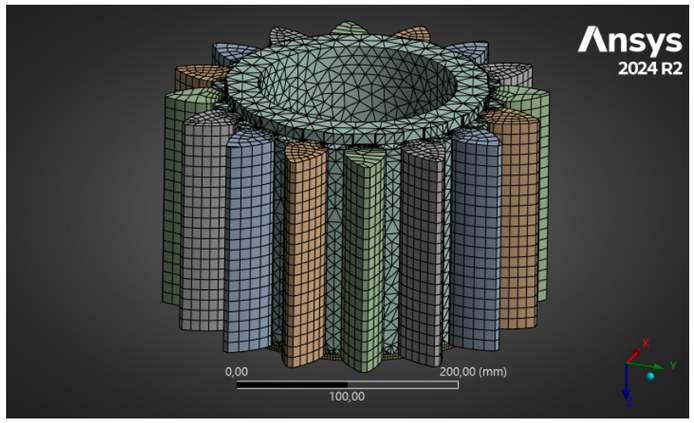
$$n = \frac{[\sigma_p]}{\sigma_{mw}}.$$

Есептелген кернеудің мәні бойынша беріктіктің қор коэффициенті анықталады:

$$n = \frac{90}{13,17} = 6.83.$$

Аналитикалық есептердегі қабылданған конструктивті шешімдерді тексеру мақсатымен қақпақты және бекітетін элементтерді сандық модельдеп, олардың кернеулері қарастырылады.

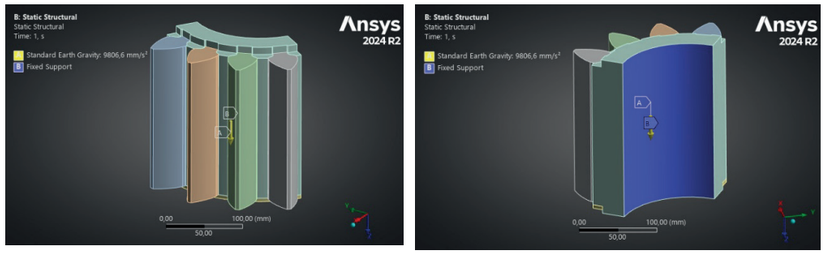
ANSYS бағдарламасында сандық модельдеу. Модельдеу ANSYS бағдарламалық кешенінде соңғы элементтер әдісімен (СЭӘ) орындалды. СЭӘ-де тор автоматты түрде құрылды, сондай-ақ нақтыланған нәтижені алу үшін осы аймақтардағы элементтер санын ұлғайту үшін Sizing командасы қолданылды: тістер мен диск арасындағы 2,5 мм; бұранда денесі 1 мм; қақпақ денесі 2,5 мм. Тордың СЭӘ нүктелерінің жиынтық саны - 61017, элементтер - 23012 (5-сурет).



5-сурет – Сараптау үшін құрылған соңғы элементтер әдісінің сеткасы

Конструкцияның кернеу-деформацияланған жай-күйін сандық зерттеу шеңберінде ANSYS бағдарламалық кешенінің Static Structural модулінде CAE-талдау орындалды [8, 9]. М3 типтік өлшемді бұранда геометриялық үлгісі қарапайым үш өлшемді түрде жасалған, бұранда кескіні егжей-тегжейлі зерттелмеген. Мұндай оңайлату есептеу шығындарын және жалпы қатаңдықты және бұрандалы қосылыс элементтерінің күшпен өзара әрекеттесуін барабар сипаттау кезінде торлы модельдің көлемін төмендету қажеттілігіне байланысты, бұл ұқсас түрдегі есептеулер кезінде стандартты практика болып табылады [10].

Шекті шарттарды модельдеу үшін дискінің қондыру тесігіне барлық еркіндік дәрежелері бойынша тиісті бетті толық бекітуді қамтамасыз ететін Fixed Support түріндегі қатты бекітпе орнатылды (6-сурет). Бұл шарт шынайы конструкцияда дискінің қозғалмайтын бекітілуі туралы болжамға баламалы және бекіту аймағында туындайтын реакциялық күштерді дұрыс ескеруге мүмкіндік береді.



6-сурет – Есептеу үшін бекітуді орнату

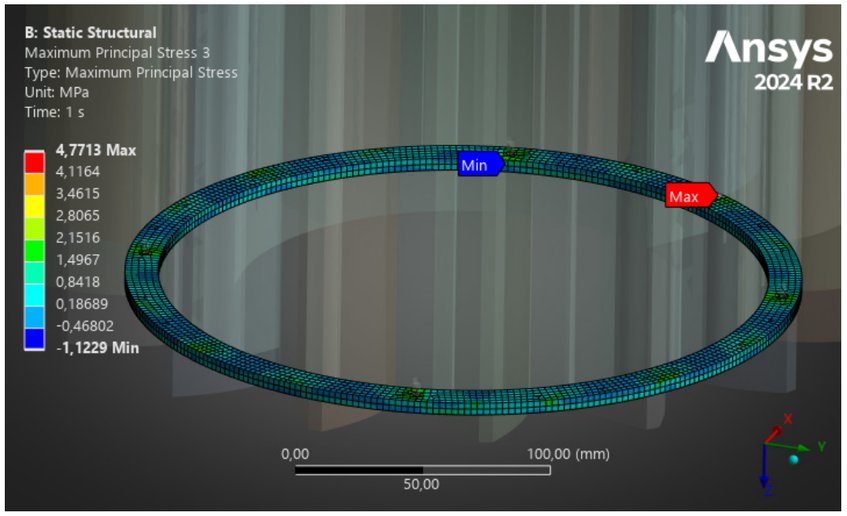
Бұрандалы қосылыс элементтерінің арасындағы түйіспелі өзара әрекеттері олардың функционалдық мақсатына байланысты түйіспелердің әртүрлі түрлерін пайдалана отырып берілген. Бұранда мен қақпақ арасындағы, сондай-ақ бұранда мен диск арасындағы байланыстар Bonded байланыс түрін қолдана отырып үлгіленді, бұл қосылатын бөлшектер арасында салыстырмалы орын ауыстырулар мен сырғанаудың жоқтығы туралы болжамға сәйкес келеді. Бұл тәсіл элементтердің қатты қосылысын елестетеді және байланыстың әлсіреуі ескерілмей жүктемелерді мінсіз беру шартымен конструкцияның кернеу жағдайын бағалау үшін пайдаланылады [11].

Барлық басқа түйісетін беттер үшін үйкеліс күштері болмаған кезде жанама жазықтықта салыстырмалы орын ауыстыруға мүмкіндік беретін Frictionless түйісу түрі қабылданды. Контактінің осы түрін пайдалану есептеу моделін жеңілдетуге және зерттелетін тораптың нәтижелі кернеу жағдайына елеулі әсер етпей, үйкеліс коэффициентін белгілеумен байланысты қосымша сызықсыздықтарды болдырмауға мүмкіндік береді.

Есептеу моделіндегі көлемдік жүктеме ретінде стандартты гравитациялық жүктеме (Standard Earth Gravity) үлгінің барлық денелеріне қоса берілген 9806,6 мм/с² тең еркін түсу үдеуі ескерілді. Ауырлық күшін есепке алу есептеудің шынайылығын арттыруға және сыртқы пайдалану жүктемелері болмаған кезде кернеулер мен деформациялардың бөлінуін дұрыс бағалауға мүмкіндік береді.

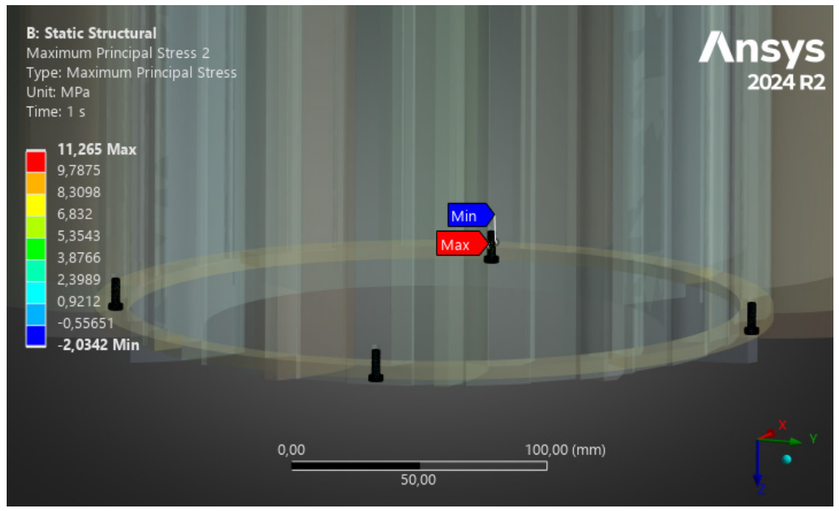
Нәтижелер және талқылау

Қақпақтағы ең жоғарғы басты кернеу – 4,7713 МПа (7-сурет), бұл кернеулер бұрандалы қосылыстар арасындағы шеңбер ортасында шоғырланған.

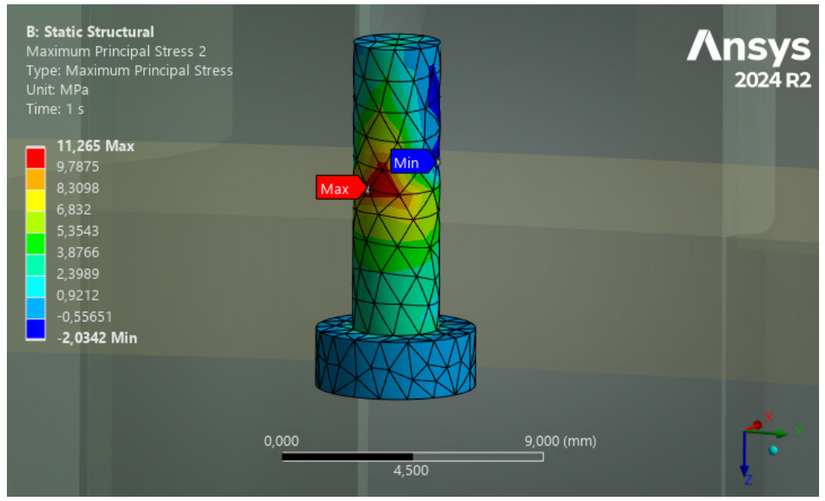


7-сурет – Қақпақтағы негізгі кернеулер

Бұрандалы қосылыстардағы ең жоғарғы басты кернеу – 11,265 МПа, кернеу шоғырлануы бұраманың бұрандасында орналасқан (8, 9-суреттер).



8-сурет



9-сурет. Бұрамадағы негізгі кернеулер

Диск пен бұрандалы қосылыс ауыстырмалы тісті элементтердің салмағынан жүктемені қабылдайды, нәтижесінде бұранданың бұрандалы бөлігінде созылу кернеуі пайда болады. Ауыстырмалы тістердің ауырлық күшінің әсерінен дисктен бұрандалы қосылысқа берілетін осьтік созылу жүктемесі пайда болады, бұл бұранданың өзегінде және бұрандалы ілінісу аймағында қалыпты созылу кернеулеріне әкеледі. Диск 4,77 МПа кернеуді қабылдайды. Бұл кернеу күйінің қалыптасуы ауыстырмалы тісті элементтерді ұстау кезінде пайда болатын жүктемеге байланысты. Алынған кернеу мәндері аз және қолданылатын материал (болат3) үшін рұқсат етілген шектен едәуір төмен, бұл құрылымның беріктігінің жеткілікті қорын көрсетеді. Бұл кернеу күйі CAE-талдау нәтижелерімен расталады, оған сәйкес эквивалентті кернеулердің максималды мәндері бұранданың алғашқы бұрылыстары аймағында шоғырланған, бұл кернеулердің концентрациясына және бұрандалы қосылыстағы жүктеменің таралу ерекшеліктеріне байланысты.

CAE-талдау нәтижелері бойынша бұрандадағы ең жоғарғы созылу кернеулері болат 3 материалы үшін рұқсат етілген мәннен аспайтыны және рұқсат етілген кернеу 90 МПа (11,265 < 90) кезінде 11,265 МПа құрайтыны анықталды, бұл созылу беріктігі шартының орындалғанын көрсетеді. Аналитикалық есептеу мен сандық модельдеу нәтижелерін салыстыру 15,59 % деңгейінде алшақтықты көрсетті, бұл инженерлік дәлдік шегінде және есептеу схемасының қабылданған болжамдары мен ақырғы элемент моделінің ерекшеліктеріне байланысты болуы мүмкін.

Алынған нәтижелер бойынша бұранданың қауіпсіздік коэффициенті анықталады:

$$n = \frac{90}{11,265} = 7.98.$$

Алынған нәтижелер қабылданған конструктивтік шешімдердің дұрыстығын және құрастырылған тісті тістегершіктің құрамында әзірленген қақпақты қолдану мүмкіндігін растайды.

Қорытынды

1 Ауыстырылатын ірі модульді тістердің жұмысы кезінде пайда болатын ілінісу күшінің осьтік құрамдас бөлігін ескере отырып қақпақтардың, бекіту элементтерінің талдау есебі орындалды. Бұрамаларға түсетін қолданыстағы жүктемелердің шамасы аз және беріктік тұрғысынан айқындаушы болып табылмайтыны көрсетілді.

2 Қию шарттары және рұқсат етілетін кернеулер бойынша бұрандалардың беріктігін тексеру жүргізілді, нәтижесінде таңдалған типтік өлшем және бекіту элементтерінің беріктік класы пайдалану кезінде талап етілетін беріктік қорын қамтамасыз ететіні анықталды.

3 Соңғы элементтер әдісімен қақпақтар мен бұрамалардың кернеу-деформацияланған жай-күйін сандық модельдеу конструкцияның элементтеріндегі ең жоғары басты кернеулер қолданылатын материалдар үшін шекті рұқсат етілген мәндерден едәуір төмен.

4 Қақпақтар төмен кернеу жағдайында жұмыс істейді және аз жүктелген элементтер ретінде қарастырылуы мүмкін, бұл олардың қалыңдығын конструкцияның сенімділігін төмендетпей азайтуға мүмкіндік береді.

5 Екі жағынан қақпақпен және оны бекітетін бұрамалардың ұсынылған конструктивті шешімді ауыр жүктелген шарттарда пайдаланылатын тораптарда қолдануға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Khan, I. R., Shrikant, B. R., Choudhary, F., Jadhav, R., Shirbhate, S.** Detachable Gear Tooth [Text]. International journal for research & development intechnology, 2019.

2 **Patel, D., Virdi, G. S. T., Dhass, A. D.** Modeling and Analysis of Gear Tooth Replacement System Against Breaking of Single Tooth [Text] // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – American Society of Mechanical Engineers, 2021. – Т. 85567. – С. V02BT02A026.

3 **Ayatollahi, M. R., Ghafoori-Ahangar, R., Ekhtiari, A.** Conceptual design of a gear with radially movable teeth [Text]. International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering 2012 (ICADME 2012).

4 **Eben, T., Reimers, J. D.** CN102654185A – Gear wheel with replaceable teeth (China). – 2012. – [Электронный ресурс]. – https://patents.google.com/patent/CN102654185A/en (дата обращения 01.02.2026).

5 **Арсланов, И. Г., Хабибуллин, М. Я.** Расчеты при проектировании деталей и узлов машин. [Текст] –Уфа : РИЦ УГНТУ, 2014. -126 с.

6 **Анурьев, В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Том 2, изд. 8., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой [Текст]. – М. : Машиностроение. – 2001. – 912 с.

7 **Устюгов, И. И.** Детали машин: Учебное пособие для учащихся техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] – М. : Высш. школа, 1981. – 399 с.

8 **Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G.** Mechanical Engineering Design. 9th ed. [Text] – McGraw-Hill, 2010. – 1080 p.

9 **Lee, H. H.** Finite element simulations with ANSYS Workbench 2023: Theory, applications, case studies [Text]. – Mission, KS : SDC Publications, 2023. – 614 p.

10 **Montgomery, J.** Methods for modeling bolts in the bolted joint [Text]. // ANSYS User's Conference. – 2002. – Vol. 5. – P. 1–12.

11 **Kim, J., Yoon, J. C., Kang, B. S.** Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints [Text]. // Applied mathematical modelling. – 2007. – Т. 31. – №. 5. – P. 895–911.

REFERENCES

1 **Khan, I.R., Shrikant, B. R., Choudhary, F., Jadhav, R., Shirbhate, S.** Detachable Gear Tooth [Text]. International journal for research & development intechnology, 2019.

2 **Patel, D., Virdi, G. S. T., Dhass, A. D.** Modeling and Analysis of Gear Tooth Replacement System Against Breaking of Single Tooth [Text] // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – American Society of Mechanical Engineers, 2021. – V. 85567. – P. V02BT02A026.

3 **Ayatollahi, M. R., Ghafoori-Ahangar, R., Ekhtiari, A.** Conceptual design of a gear with radially movable teeth [Text]. International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering 2012 (ICADME 2012).

4 **Eben, T., Reimers, J. D.** CN102654185A – Gear wheel with replaceable teeth (China). – 2012. – [Electronic resource]. – https://patents.google.com/patent/CN102654185A/en (Date of access 01.02.2026).

5 **Arslanov, I. G., Xabibullin, M. Ya.** Raschety` pri proektirovanii detalej i uzlov mashin [Calculations in the design of machine parts and assemblies]. [Text] –Ufa : RICz UGNTU, 2014. – 126 p.

6 **Anur`ev, V. I.** Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya [Handbook of a mechanical engineering designer]: v 3-x t.: Vol. 2, izd. 8., pererab. i dop. Pod red. I.N. Zhestkovoj [Text]. – M. : Mashinostroenie. – 2001. – 912 p.

7 **Ustyugov, I. I.** Detali mashin [Machine Parts]: Uchebnoe posobie dlya uchashhixsya texnikumov. – 2-e izd., pererab. i dop. [Text] – M. : Vy`ssh. shkola, 1981. – 399 p.

8 **Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G.** Mechanical Engineering Design. 9th ed. [Text] – McGraw-Hill, 2010. – 1080 p.

9 **Lee, H. H.** Finite element simulations with ANSYS Workbench 2023: Theory, applications, case studies [Text]. – Mission, KS : SDC Publications, 2023. – 614 p.

10 **Montgomery, J.** Methods for modeling bolts in the bolted joint [Text]. // ANSYS User's Conference. – 2002. – Vol. 5. – P. 1–12.

11 **Kim, J., Yoon, J. C., Kang, B. S.** Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints [Text]. // Applied mathematical modelling. – 2007. – Т. 31. – №. 5. – P. 895–911.

01.02.26 ж. баспаға түсті.
04.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
23.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Д. А. Сарбаев[1], *Т. М. Бузауова[2]
[1,2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда
Поступило в редакцию 01.02.26.
Поступило с исправлениями 04.02.26.
Принято в печать 23.02.26.

РАСЧЁТ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРЫШКИ И КРЕПЁЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СБОРНОЙ КРУПНОМОДУЛЬНОЙ ШЕСТЕРНИ

В работе рассмотрена конструкция сборной крупномодульной шестерни с вставляемыми зубьями и крышками, установленными с обеих сторон венца и предназначенными для ограничения осевого смещения зубьев. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения ремонтопригодности и ресурса зубчатых передач за счёт применения сборных конструкций при сохранении их прочностной надёжности. Особенностью рассматриваемой конструкции является отсутствие силового зажима зубьев со стороны крышек: фиксация зубьев осуществляется за счёт их посадки в пазы корпуса, а крышки выполняют вспомогательную ограничительную функцию.

Выполнен аналитический расчёт крепёжных элементов крышек с учётом действия осевой составляющей силы зацепления, а также распределения нагрузки между одновременно работающими зубьями. Проведена проверка прочности винтов по условиям среза и по допускаемым напряжениям, что позволило обосновать выбор их типоразмера и количества. Отдельное внимание уделено выбору толщины крышек, которая принята минимально возможной с целью исключения влияния на процесс зацепления и увеличения массы шестерни.

Для подтверждения результатов аналитического расчёта выполнено численное моделирование напряжённо-деформированного состояния крышек и крепёжных элементов методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. В результате моделирования получены поля главных напряжений, показавшие низкий уровень напряжённого состояния как в крышках, так и в винтах. Установлено, что принятая толщина крышек и выбранные параметры крепежа обеспечивают значительный запас прочности и не приводят к возникновению опасных напряжений. Сопоставление аналитических и численных результатов подтвердило корректность принятой расчётной схемы и возможность применения предложенного конструктивного решения при проектировании сборных шестерён с вставляемыми крупномодульными зубьями.

Ключевые слова: сборная шестерня, крышка, крепёжные элементы, прочностной расчёт, численное моделирование, метод конечных элементов.

D. Sarbayev[1], *T. Buzauova[2]
[1,2]Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda
Received 01.02.26.
Received in revised form 04.02.26.
Accepted for publication 23.02.26.

CALCULATION AND JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE COVER AND FASTENING ELEMENTS OF A BUILT-UP LARGE-MODULE GEAR

The paper considers the design of a built-up large-module gear with inserted teeth and covers installed on both sides of the rim. The relevance of the study is obusловлена the need to increase the maintainability and service life of gear transmissions through the use of built-up designs while maintaining their structural strength and reliability. A distinctive feature of the proposed design is the absence of force clamping of the teeth by the covers: the teeth are fixed by seating them in the grooves of the gear body, while the covers perform an auxiliary function of limiting axial displacement.

An analytical calculation of the fastening elements of the covers was carried out taking into account the action of the axial component of the meshing force as well as the load distribution among simultaneously operating teeth. The strength of the bolts was verified under shear conditions and allowable stress criteria, which made it possible to substantiate their size and quantity. Special attention was paid to the selection of the cover thickness, which was chosen to be minimal in order to avoid interference with the meshing process and to prevent an increase in the gear mass.

To validate the results of the analytical calculations, numerical modeling of the stress–strain state of the covers and fastening elements was performed using the finite element method in the ANSYS software package. As a result of the simulation, fields of principal stresses were obtained, demonstrating a low level of stress in both the covers and the bolts. It was established that the adopted cover thickness and selected fastening parameters provide a significant safety margin and do not lead to the occurrence of dangerous stresses. A comparison of analytical and numerical results confirmed the correctness of the adopted calculation scheme and the feasibility of applying the proposed design solution in the design of built-up gears with inserted large-module teeth.

Keywords: built-up gear, cover, fastening elements, strength calculation, numerical modeling, finite element method.

SRSTI 55.19.03

https://doi.org/10.48081/BGQF1917

А. Ж. Таскарина[1], *Ж. К. Мусина[2], А. Ж. Касенов[3], Р. Б. Муканов[4], Д. А. Искакова[5]

[1,2,3,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[3]Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации, Республика Казахстан, г. Тараз;
[4]Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2613-8799
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2233-4947
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1439
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-0513
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3104-4818
*e-mail: musina.zh@tou.edu.kz

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗЦОВОЙ СБОРНОЙ РАЗВЁРТКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ БЕЗВЕРШИННЫМИ ЗУБЬЯМИ ПО ВИНТОВОЙ ЛИНИИ

Данная статья посвящена разработанному новому металлорежущему инструменту – резцовой сборной развёртке с регулируемыми безвершинными зубьями по винтовой линии и грязевыми канавками обеспечивающей более высокую точность, стойкость и качество обрабатываемой поверхности, новизна конструкции подтверждена патентом на полезную модель.

В новом инструменте предусмотрены: регулирование зубьев-резцов перемещением в осевом направлении Δ – величина смещения зубьев-резцов для увеличения диаметра под заточку и грязевые канавки на корпусе развёртки для предотвращения усиленного износа и задиров направляющих; зубья-резцы развёртки, установленные в пазы со смещением, друг относительно друга вдоль оси, где первый зуб-резец развёртки работает как расточной резец, а остальные зубья-резцы по винтовой линии калибруют отверстие; с целью увеличения срока службы зубьев-резцов их основание и пазы выполняют под некоторым углом ε и θ, для возможности компенсации потери размера резца по высоте, настройка на заданный размер выполняется микрометрической гайкой-лимбом. Для исключения сдвига зубьев-резцов в осевом направлении от сил резания предусмотрены: разрезное кольцо, состоящее из двух частей, передние и задние продольные упорные пластины. За счёт изменения условий работы направляющих элементов и конструкции путём выполнения грязевых канавок и регулирования зубьев-резцов увеличивается износостойкость, улучшается качество обработанной поверхности как следствие улучшения центрирования развёртки в отверстии, продлевают срок службы резцов и снижают себестоимость обработки.

Ключевые слова: развёртка, металлорежущий инструмент, безвершинные зубья, точность, стойкость, шероховатость.

Введение

В прецизионном производстве изготовление отверстий точного размера, округлости, прямолинейности и качества обработки часто представляет собой сложную задачу. Сверление или растачивание само по себе часто оставляет на поверхности следы, заусенцы или допуски, превышающие допустимые. Именно здесь вступает в дело развёртывание. При правильном выполнении развёртывание позволяет получать отверстия стабильного размера с жёсткими допусками и превосходной чистотой поверхности.

Во многих отраслях промышленности применяются различные операции чистовой обработки отверстий, обусловленные функциональными требованиями и требованиями к допускам [1].

Развёртывание – это операция чистовой обработки, используемая для доведения предварительно просверленного или расточенного отверстия для улучшения качества поверхности, округлости, точности диаметра, а иногда и прямолинейности.

Режущим инструментом развёртывания является развёртка, правильный выбор которой с учётом особенностей заготовки, материала, объёма и настроек станка повлияет на качество, скорость, срок службы инструмента и стоимость операции [2].

Ежегодно проводятся исследования направленных на разработку и усовершенствование конструкций режущего инструмента [3–7], что подтверждается многочисленными патентами и регулярными представленными новыми разработками на отраслевых выставках.

Научно-технический прогресс в этой сфере обеспечивается совместной работой научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и промышленных предприятий.

Использование компьютерного анализа при разработке новых продуктов позволяет моделировать их работу и оперативно сравнивать проектные варианты. Это минимизирует нужду в натурных испытаниях, улучшает качество изделия, а также сокращает сроки и бюджет проектирования.

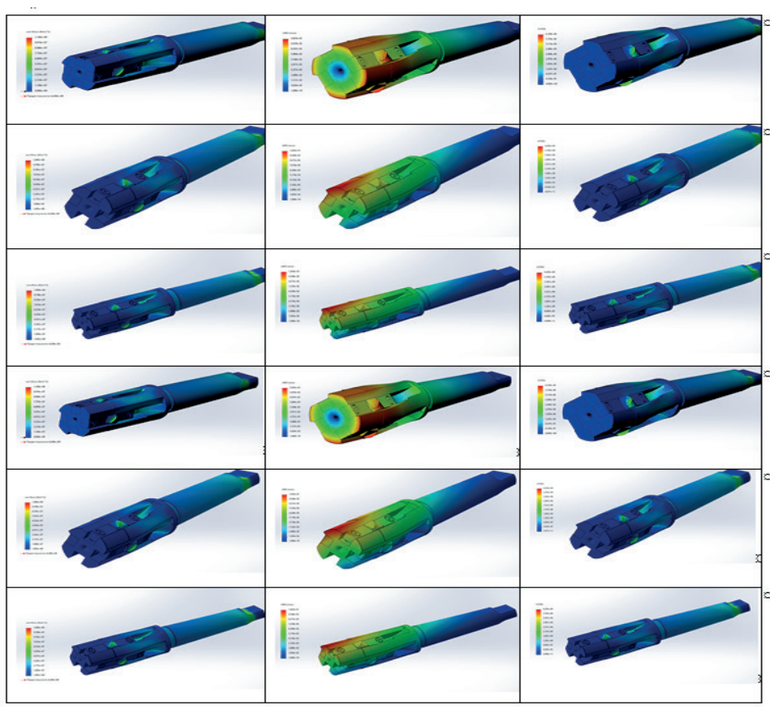
Современный софт дает возможность не просто создавать чертежи, но и виртуально испытывать работу механизмов, проводя расчеты на прочность и износостойкость в цифровой среде используя такие программы, как ANSYS, CATIA, SolidWorks и др., которые позволяют в кратчайшие сроки проводить конструкторскую подготовку производства, включая промышленный дизайн и анализ технологичности на этапе проектирования; технологическую подготовку производства от проектирования оснастки до разработки управляющих программ изготовления изделий [8].

Материалы и методы

Методологической основой для разработки и проектирования новой конструкции металлорежущего инструмента – сборной развёртки послужил комплексный подход, включающий обзор и систематизацию информации, полученной в ходе информационного поиска в сети Интернет, статистического

анализа эмпирических данных и критического обзора профильной научной и технической литературы.

Патентные исследования позволили выявить и систематизировать уязвимые места в конструкциях аналоговых инструментов, предназначенных для обработки отверстий. Проектирование и анализ различных конструкций резцовых сборных развёрток: 1) резцовая сборная развёртка с регулируемыми безвершинными зубьями и грязевыми канавками; 2) резцовая сборная развёртка с жестким креплением безвершинных зубьев, грязевыми канавками и сменными компенсационными пластинами; 3) резцовой сборной развёртки с регулируемыми безвершинными зубьями по винтовой линии и грязевыми канавками осуществлялся с использованием 3D-твердотельного моделирования в программном комплексе САПР КОМПАС-3D и SOLIDWORKS Simulation 2020 (рисунок 1, таблица 1) при следующих нагрузках: P_z = 918Н и Р = 2000Н, что позволило повысить производительность проектирования и исследовать многовариантность инструментов.



а) б) в)

а) Эквивалентное напряжение по Мизесу, МПа;
б) Суммарное линейное перемещение, мм; в) Деформация, Па

Рисунок 1 – Результаты расчётов конструкций резцовых сборных развёрток

Таблица 1 – Результаты статического расчёта

Инс-тру-мент	P_z, Н	Эквивалентное напряжение по Мизесу, МПа	Суммарное линейное перемещение, мм	Деформация, Па
		Максимальное значение	Максимальное значение	Максимальное значение
1	918	110.8	0.05634	414.9
	2000	172.2	0.119	570.0
2	918	108.8	0.1034	420.2
	2000	171.4	0.2201	581.4
3	918	108.8	0.1034	420.2
	2000	198.4	0.1415	733.8

Результаты и обсуждение

Анализ результатов проведенных исследований привел к выбору наиболее оптимальной конструкции развёртки – резцовой сборной развёртки с регулируемыми безвершинными зубьями по винтовой линии и грязевыми канавками.

Новая конструкция металлорежущего инструмента (рисунок 2) обеспечивает более высокую точность, стойкость и качество обрабатываемой поверхности, которая подтверждается патентом на полезную модель.

Во время подготовки к работе с новым металлорежущим инструментом – разверткой, четыре регулируемые безвершинные зуба-резца устанавливаются в пазы типа «ласточкин хвост» со смещением на величину Δ друг относительно друга вдоль оси по винтовой линии, настраиваются на один диаметр обработки при помощи микрометрической гайки-лимба.

Плоскость режущих кромок вставных зубьев, имеющих форму окружности, располагают под углом λ к оси отверстия (оси развёртки).

Первый зуб-резец развёртки работает как расточной резец, а остальные зубья-резцы по винтовой линии калибруют отверстие. С помощью микрометрической гайки-лимба осуществляется регулирование зубьев-резцов на заданный диаметр для обработки отверстия, что обеспечивает стабильность положения развёртки в отверстии заготовки и точность обработки.

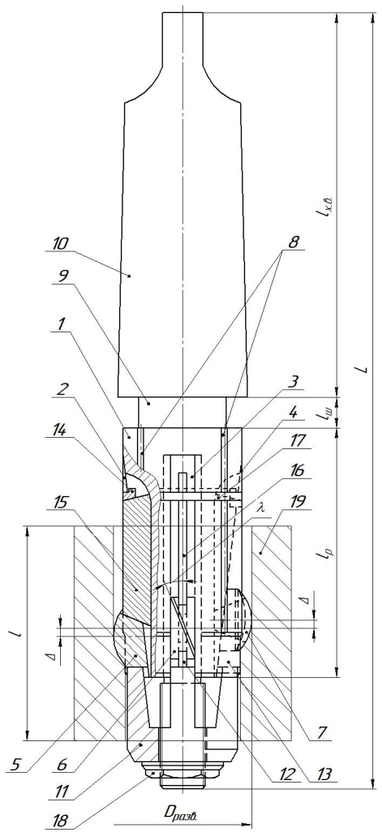
Кроме того, расположение зубьев-резцов развёртки (кроме первого) по винтовой линии обеспечивает калибрование обрабатываемого отверстия заготовки и увеличивает время до переточки инструмента, что повышает стойкость развёртки и уменьшение себестоимости обработки.

Высокая точность направляющей и регулировка на требуемый диаметр обработки повышают точность обработки отверстия.

Разрезное упорное кольцо, передние и задние продольные упорные пластины, установленные в пазы, исключают сдвиг зубьев-резцов в осевом направлении от сил резания.

Выполнение грязевых канавок на корпусе развёртки обеспечивает более высокую точность направления тем самым улучшает шероховатость и точность обработки отверстия за счёт удаления абразивных частиц.

Таким образом, конструктивные особенности резцовой сборной развёртки с регулируемыми безвершинными зубьями по винтовой линии и грязевыми канавками обеспечивают высокую эффективность чистовой операции развёртывания, повышение точности обработки и снижение шероховатости обрабатываемого отверстия, а также стойкость инструмента.



1 – корпус; 2, 3, 4 – пазы типа «ласточкин хвост»; 5, 6, 7 – безвершинные зубья-резцы; 8 – грязевые канавки; 9 – шейка; 10 – хвостовик с конусом Морзе; 11 – разрезная втулка; 12, 13 – передние продольные пластины; 14 – разрезное упорное кольцо; 15, 16, 17 – задние продольные пластины; 18 – микрометрическая гайка-лимб; 19 – заготовка; $D_{разв.}$ – диаметр развёртки; L – длина развёрки; $l_{р}$ – длина рабочей части; $l_{ш}$ –длина шейки; $l_{хв.}$– длина хвостовика; l – длина заготовки; Δ – величина смещения безвершинных зубьев-резцов относительно друга в осевом направлении их основания

Рисунок 2 – Общий вид нового металлорежущего инструмента [9]

По мнению авторов [10–11], основная проблема при обработке глубоких отверстий – это выполнение требований по прямолинейности и минимальные отклонения по форме отверстия. Сочетание предварительной и калибрующей обработки в одном инструменте за одну технологическую операцию решено новым разработанным металлорежущим инструментом [9].

Информация о финансировании

Исследования выполнены в рамках планово-целевого финансирования на 2024–2026 годы по программе: ИРН BR24993003 «Разработка комплекса мероприятий инструментального обеспечения обрабатывающих отраслей экономики РК», финансируемой Комитетом Науки МНиВО РК.

Выводы

Таким образом, анализ полученных исследований позволяет сделать вывод, что новая конструкция металлорежущего инструмента – резцовая сборная развёртка с регулируемыми безвершинными зубьями по винтовой линии и грязевыми канавками обеспечивает стабильность положения развёртки в отверстии (заготовки) и уменьшение износа направляющих, что сказывается на точности обработки.

Выполнение основания зубьев-резцов и направляющих элементов корпуса развёртки под углом θ в диапазоне от 1° до 15° компенсирует потери размера резца по высоте, настройка на заданный размер выполняется микрометрической гайкой-лимбом, обеспечивает сохранение длительное время заданного диаметра обработки отверстия, т.е. повышает ресурс развёртки.

Новая конструкция металлорежущего инструмента позволяет получать детали с высокими эксплуатационными показателями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Butler Bros. Using Reamers in the Manufacturing Space: A Practical Guide [Электронный ресурс]. – https://www.butlerbros.com/post/using-reamers-in-the-manufacturing-space-a-practical-guide

2 **Кожевников, Д. В., Гречишников, В. А., Кирсанов, С. В., Григорьев, С. Н., Схиртладзе, А. Г.** Режущий инструмент : учебник для вузов / под общ. ред. С. В. Кирсанова. – М. : Инновационное машиностроение, 2022. – 520 с.

3 **Гольбрайх, Д. М.** Разработка конструкции регулируемой развертки // Сборник научных статей 2-й международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 5-ти томах. «Наука молодых – Будущее России» – Курск: ЗАО «Университетская книга». – Т. 5. – 2017. – С. 39–42.

4 **Zheleznov, G. S., Shirokov, A. V.** Adjustable reamer ensuring scratch-free extraction from the machined hole // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38. – № 6. – P. 485–487. – https://doi.org/10.3103/S1068798X18060217

5 **Tei, K., Ryu, T., Nakae, T., Matsuzaki, K., Tsukamoto, K., Hirata, N.** Study on reamer tools to suppress spiral marks // The Proceedings of the Dynamics & Design Conference. – 2022. – Vol. 2022. – P. 121. – https://doi.org/10.1299/jsmedmc.2022.121

6 **Пожарская О. С., Лебедев В. А.** Обоснование конструкции сборной развертки // Сборник докладов IX научно-практической конференции с международным участием «Новые горизонты». – Брянск, 2022. – С. 45–48.

7 **Kairolla, B., Itybaeva, G., Kairolla, M.** The use of combined tools for hole processing // Интернаука. – 2024. – № 45-6(362) – С. 40–42.

8 **Янюшкин, А. С., Каирканов, А. М.** Исследование и моделирование технологической подготовки производства [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2023. – № 2. С. 57–66. – https://doi.org/10.48081/KJEL1272

9 **Касенов, А. Ж., Таскарина, А. Ж, Итыбаева, Г. Т, Мусина, Ж. К., Абишев, К. К., Муканов, Р. Б., Маздубай, А. В., Искакова, Д. А.** Резцовая сборная развёртка с регулируемыми безвершинными зубьями по винтовой линии и грязевыми канавками // Патент на полезную модель. – KZ № 11177; Опубл. 19.09.2025 г.

10 **Голдобина, В. Г.** Точность обработки отверстий комбинированным инструментом // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 6. – С. 80–86. – https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-6-80-86

11 **Берикбаева М. А., Мухамадеева Р. М, Касымжанова К. С.** Использование комбинированных инструментов при обработке глубоких отверстий // Труды университета. – 2023. – № 2(91) – С. 12–18. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_2_12.

REFERENCES

1 Butler Bros. Using Reamers in the Manufacturing Space: A Practical Guide [Electronic resource]. – https://www.butlerbros.com/post/using-reamers-in-the-manufacturing-space-a-practical-guide

2 **Kozhevnikov, D. V., Grechishnikov, V. A., Kirsanov, S. V., Grigor`ev, S. N., Sxirtladze, A. G.** Rezhushhij instrument : uchebnik dlya vuzov / pod obshh. red. S. V. Kirsanova. [Cutting tools : textbook for universities / under the general editorship of S. V. Kirsanov] – M. : Innovacionnoe mashinostroenie, 2022. – 520 p.

3 **Gol`brajx, D. M.** Razrabotka konstrukcii reguliruemoj razvertki [Development of an adjustable sweep design]// Sbornik nauchny`x statej 2-j mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii perspektivny`x razrabotok molody`x ucheny`x. V 5-ti tomax. «Nauka molody`x – Budushhee Rossii» – Kursk: ZAO «Universitetskaya kniga». – T. 5. – 2017. – P. 39–42.

4 **Zheleznov, G. S., Shirokov, A. V.** Adjustable reamer ensuring scratch-free extraction from the machined hole // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38. – № 6. – P. 485–487. – https://doi.org/10.3103/S1068798X18060217

5 **Tei, K., Ryu, T., Nakae, T., Matsuzaki, K., Tsukamoto, K., Hirata, N.** Study on reamer tools to suppress spiral marks // The Proceedings of the Dynamics & Design Conference. – 2022. – Vol. 2022. – P. 121. – https://doi.org/10.1299/jsmedmc.2022.121

6 **Pozharskaya O. S., Lebedev V. A.** Obosnovanie konstrukcii sbornoj razvertki [Justification of the design of the combined sweep] // Sbornik dokladov IX nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem «Novy`e gorizonty`». – Bryansk, 2022. – P. 45–48.

7 **Kairolla, B., Itybaeva, G., Kairolla, M.** The use of combined tools for hole processing // Internauka. – 2024. – № 45-6(362) – P. 40–42.

8 **Yanyushkin, A. S., Kairkanov, A. M.** Issledovanie i modelirovanie texnologicheskoj podgotovki proizvodstva [Tekst] [Research and modeling of technological preparation of production] [Text] // Nauka i texnika Kazaxstana. – 2023. – № 2. – P. 57–66. – https://doi.org/10.48081/KJEL1272

9 **Kasenov, A. Zh., Taskarina, A. Zh, Ity`baeva, G. T, Musina, Zh. K., Abishev, K. K., Mukanov, R. B., Mazdubaj, A. V., Iskakova, D. A.** Rezczovaya sbornaya razvyortka s reguliruemy`mi bezvershinny`mi zub`yami po vintovoj linii i gryazevy`mi kanavkami [Chisel assembly with adjustable topless teeth in a helical line and mud grooves ] // Patent na poleznuyu model`. – KZ № 11177; Opubl. 19.09.2025 g.

10 **Goldobina V. G.** Precision of hole processing with a combined tool [Precision of hole processing with a combined tool] // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2021. – № 6. – P. 80–86. – https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-6-80-86

11 **Berikbaeva M. A., Muxamadeeva R. M, Kasy`mzhanova K. S.** Ispol`zovanie kombinirovanny`x instrumentov pri obrabotke glubokix otverstij [The use of combined tools for processing deep holes] // Trudy` universiteta. – 2023. – № 2(91) – P. 12–18. – https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_2_12.

Поступило в редакцию 09.02.26.
Поступило с исправлениями 14.02.26.
Принято в печать 17.02.26.

***А. Ж. Таскарина*[1], **Ж. К. Мусина*[2], *А. Ж. Касенов*[3], *Р. Б. Муканов*[4], *Д. А. Искакова*[5]**
[1,2,3,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[3]Қазақ Ұлттық Су Шаруашылығы және Ирригация университеті, Қазақстан Республикасы, Тараз қ.;
[4]Сатпаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
09.02.26 ж. баспаға түсті.
14.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
17.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БҰРАНДАЛЫ СЫЗЫҚ БОЙЫМЕН РЕТТЕЛЕТІН ШЫҢСЫЗ ТІСТЕРІ БАР ЖАҢА БУЫН КЕСКІШ ҚҰРАМА ҰҢҒЫЛАҒЫШТЫ ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Бұл мақала әзірленген жаңа металл кесетін құралға – бұрандалы сызық бойымен реттелетін шыңсыз тістері бар және балшық ойықтары бар кескіш құрама ұңғылағышқа арналған, ол өңделетін беттің жоғары дәлдігін, беріктігі мен сапасын қамтамасыз етеді, дизайнның жаңалығы пайдалы модельге патентпен расталады.

Жаңа құралда мыналар қарастырылған: осьтік бағытта қозғалу арқылы тістердің тістерінің Δ ысуын реттеу Δ-бірінші міс ось бойымен бір-біріне қатысты усилысуы бар ойықтарға орнатылған тістердің-тістердің қайрау үшін диаметрін ұлғайту және бағыттағыштардың тозуы мен бұзылуын болдырмау үшін ұңғылағыш корпусындағы балшық ойықтары; тістер-ұңғылағыштың азу тістері - ұңғылағыш кескіш бұрғылау кескіші сияқты жұмыс істейді, ал қалған бұрандалы кескіш тістер тесікті калибрлейді; азу тістердің қызмет ету мерзімін ұзарту үшін олардың негізі мен ойықтары белгілі бір бұрышпен орындалады ε және θ, азу тістің биіктігінің жоғалуын өтеу мүмкіндігі үшін берілген өлшемді реттеу микрометриялық гайка-лимбоммен орындалады. Кесу күштерінен осьтік бағытта тістердің сдысуын болдырмау үшін: екі бөліктен тұратын бөлінген сақина, алдыңғы және артқы бойлық табақшалар. Балшық ойықтарын орындау және тістердің азу тістерін реттеу арқылы бағыттаушы элементтер мен құрылымның жұмыс жағдайларын өзгерту арқылы тозуға төзімділік артады, өңделген беттің сапасы жақсарады, саңылаудағы тазартудың жақсаруы нәтижесінде кескіштердің қызмет ету мерзімі ұзартылады және өңдеу құны төмендейді.

Кілтті сөздер: ұңғылағыш, беріктік, дәлдік, қаттылық, кедір-бұдыр.

A. Zh. Taskarina[1], *Zh. K. Mussina[2], A. Zh. Kasenov[3], R. B. Mukanov[4], D. A. Iskakova[5]
[1,2,3,5]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[3]Kazakh National University of Water Management and Irrigation, Republic of Kazakhstan, Taraz;
[4]Satpayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 09.02.26.
Received in revised form 14.02.26.
Accepted for publication 17.02.26.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A NEW GENERATION CHISEL ASSEMBLY WITH ADJUSTABLE TOPLESS TEETH ALONG A HELICAL LINE

This article is devoted to a new metal–cutting tool developed – a chisel assembly with adjustable topless teeth along a helical line and mud grooves, which provides

higher accuracy, durability and quality of the treated surface, the novelty of the design is confirmed by a utility model patent.

The new tool provides for: adjustment of the teeth-cutters by moving in the axial direction, Δ is the amount of displacement of the teeth–cutters to increase the diameter for sharpening and mud grooves on the body of the reamer to prevent increased wear and scuffing of the guides; the teeth-cutters of the reamer installed in the grooves with an offset relative to each other along the axis where the first tooth isThe reamer cutter works as a boring cutter, and the remaining chisel teeth calibrate the hole along the helical line.; in order to increase the service life of the incisor teeth, their base and grooves are made at a certain angle ε and θ, in order to compensate for the loss of the size of the incisor in height, the adjustment to a given size is performed with a micrometer nut-limb. To prevent the teeth-cutters from shifting axially from the cutting forces, the following are provided: a split ring consisting of two parts, front and rear longitudinal thrust plates. By changing the working conditions of the guide elements and the structure by making mud grooves and adjusting the teeth of the cutters, wear resistance increases, the quality of the treated surface improves as a result of improved centering of the sweep in the hole, prolong the service life of the cutters and reduce the cost of processing.

Keywords: sweep, metal cutting tool, topless teeth, precision, durability, roughness.

МРНТИ 55.03.35

https://doi.org/10.48081/BGQF1918

Г. Таттимбек[1], Б. Т. Мардонов[2], А. В. Маздубай[3],
****А. Е. Ержанова[4], Б. О. Жумагалиев[5]***

[1,4,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[2]Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан, г. Навои;
[3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8242-5800
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8386-0182
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3396-1716
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6826-8965
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7688-471X
*e-mail: a.erzhanova@kazatu.edu.kz

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВПАДИН ЗУБЬЕВ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ПРЯМОЗУБЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Проведенные исследования по изучению состояния вопроса изготовления зубчатых колес в условиях отечественных машиностроительных производств показали, что существуют проблемы связанные с обеспечением качества при нарезании зубьев и с высокой себестоимостью из-за большого расхода металлорежущего инструмента. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования процесса термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес. Способ термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением является ресурсерегающим, фреза трения изготовливается из конструкционных сталей, что существенно снижает себестоимость механической обработки. Результаты экспериментального исследования показали, что на оптимальных режимах резания можно достичь высокие значения показателей качества обработанной поверхности. Установлено, что увеличение частоты вращения шпинделя оказывает положительное влияние на шероховатость и твердость обработанной поверхности. При этом влияние подачи получается неоднозначным. С увеличением подачи повышается твердость обработанной поверхности и достигает НВ 380. Однако увеличение подачи положительно сказывается на шероховатости обработанной поверхности и обеспечивает R_z=40–18 мкм. Исходя из этого были определены следующие оптимальные значения режимов резания: nшп=1250 об/мин; $S_{пр}$=100 мм/мин; t=22,5 мм.

Предлагаемая дисковая модульная фреза трения заменяет дисковую модульную фрезу, изготовляемую из быстрорежущей стали Р6М5 на зуборезной операции.

Ключевые слова. Термофрикционная обработка, импульсное охлаждение, фреза трения, зубчатое колесо, зуборезание, впадины зубьев, шероховатость, твердость.

Введение

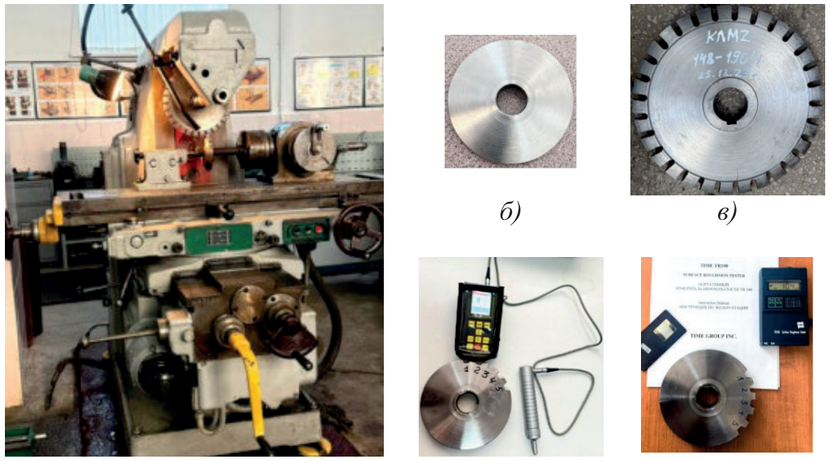
Большую роль в развитии машиностроения имеет производство зубчатых колес. Зубчатые колеса составляют основу многих современных машин и механизмов (автомобили, сельхозмашины, металлорежущие станки, редукторы, тяговые передачи электропоездов и др.) [1; 2]. Во многих случаях зубчатые колеса определяют технические показатели изделий машиностроения: вес, габариты, надежность и долговечность. Проведенные исследования по изучению состояния вопроса изготовления зубчатых колес в условиях отечественных машиностроительных производств показали, что существует проблема связанные с обеспечением точности и качества при нарезании зубьев [3; 4; 5]. Также выявлены высокая трудоемкость и себестоимость механической операции зубонарезания. Известно, что в автомобильной, сельскохозяйственной, авиационной и других отраслях промышленности, где применяются зубчатые колеса небольших модулей, имеется много технических решений повышения надежности и долговечности зубчатых колес при высокой производительности [6; 7]. Однако, при изготовлении крупномодульных цилиндрических зубчатых колес распространение их опыта в современных рыночных отношениях затруднительно. Трудоемкость изготовления крупномодульных прямозубых цилиндрических зубчатых колес высокая. А также традиционные способы обработки крупномодульных цилиндрических зубчатых колес не всегда обеспечивает требуемую точность и качества изготовления. В связи с этим разработки ресурсосберегающих способов обработки обеспечивающие повышение точности, надежности и долговечности при снижении себестоимости изготовления крупномодульных цилиндрических зубчатых колес являются актуальной.

На кафедре «Технологические машины и оборудования» Казахского агротехнического исследовательского университета имени С. Сейфуллина под руководством профессора К. Т. Шерова проводятся научные исследования, направленные на разработку ресурсосберегающих технологий механической обработки на основе термофрикционного резания. Одним из научных направлений является разработка способа термофрикционной обработки с импульсным охлаждением впадин прямозубых цилиндрических зубчатых колёс.

Материалы и методы

Исследование процесса термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес основано на положении технологии машиностроения и теории резания. Экспериментальные исследования выполнены на горизонтально фрезерном станке 6М82. Показатели качества обработанной поверхности, в частности шероховатость измерялось портативным электронным прибором TR 100 и твердость измерялось портативным ультразвуковым электронным прибором ТКМ-459.

На рисунке 1 показаны оборудование и приборы, использованные при экспериментальном исследовании процесса термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес.



а) *б)* *в)* *г)* *д)*

а – общий вид горизонтально-фрезерного станка 6М82;
б – заготовка из стали 40Х для обработки; в-специальная дисковая модульная фреза трения из стали 45; г – твердомер портативный ультразвуковой ТКМ-459; д – портативный измеритель шероховатости TR 100

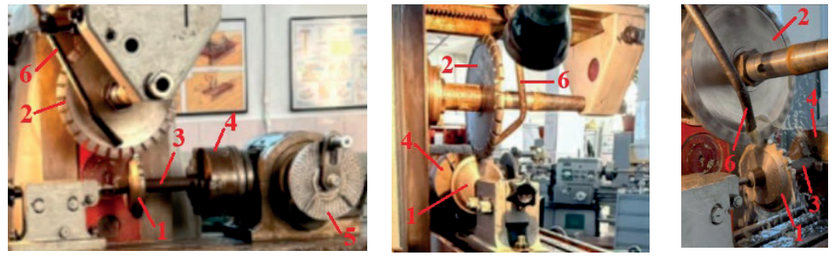
Рисунок 1 – Оборудование и приборы, использованные при экспериментальном исследовании

Результаты и обсуждения

Экспериментальные исследования проводились на следующих режимах резания: $n_{шп}$ = 400, 630, 1000, 1250, 1600 об/мин; $S_{пр}$ =40, 63, 100, 160, 250 мм/мин; t = 22,5 мм. Материал термофрикционной дисковой модульной фрезы трения – сталь 45. Материал обрабатываемой заготовки – сталь 40Х. Модуль нарезаемого зубчатого колеса m = 10 мм.

На рисунке 2 показаны фотографии процесса термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес.

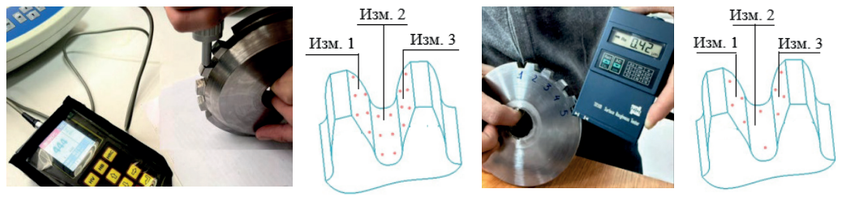
а - после остановки процесса обработки, вид спереди; б - после остановки процесса обработки, вид сбоку; в - в процессе обработки; 1-заготовка; 2 - дисковая модульная фреза трения; 3 - оправка; 4 - трехкулачковый патрон; 5 - делительная головка; 6 - трубка для подачи смазочно-охлаждающей жидкости



а) *б)* *в)*

Рисунок 2 – Процесс термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес

На рисунке 3 показаны процесс контроля показателей качества обработанных поверхностей после термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес.



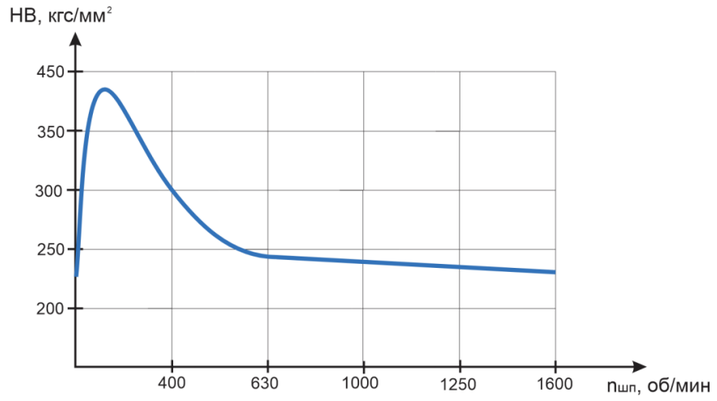
а) *б)* *в)* *г)*

а – измерение твердости; б – схема измерения твердости;
в – измерение шероховатости; г – схема измерения шероховатости

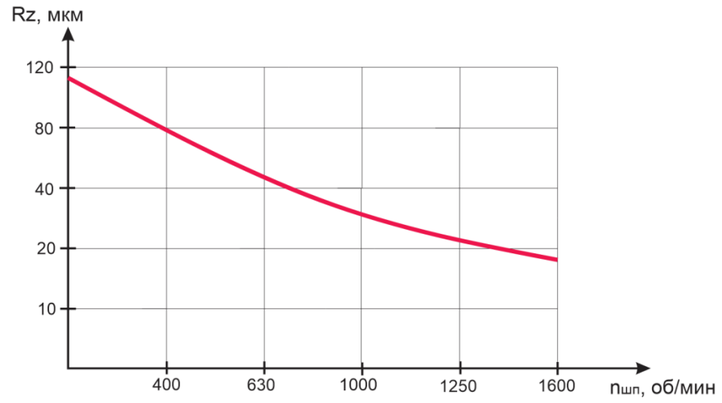
Рисунок 3 – Процесс контроля показателей качества обработанных поверхностей

По результатам полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости показателей качества от режимов резания.

На рисунке 4 показаны графики зависимости показателей качества от частоты вращения шпинделя.



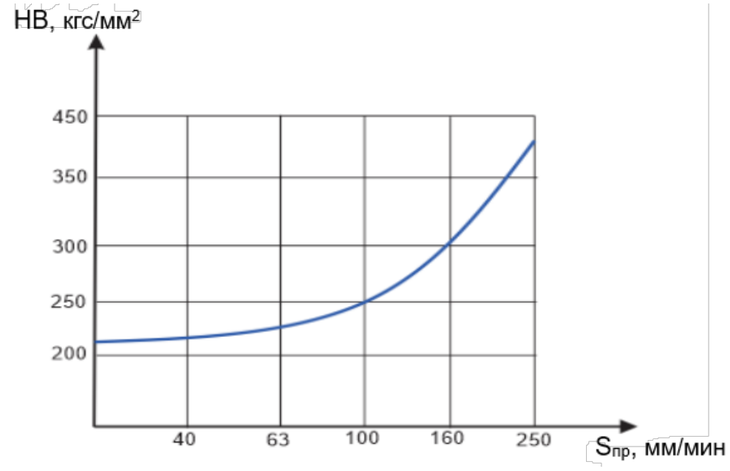
а)



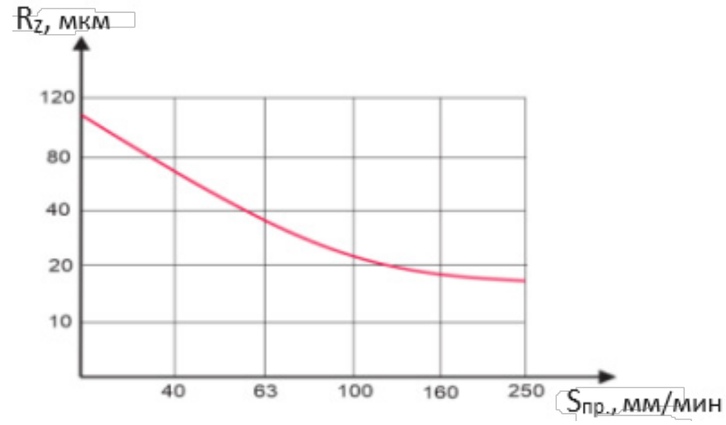
б)

а – график влияния частоты вращения шпинделя на твердость обработанной поверхности; б – график влияния частоты вращения шпинделя на шероховатость обработанной поверхности
Рисунок 4 – Графики зависимости показателей качества от частоты вращения шпинделя

На рисунке 5 показаны графики зависимости показателей качества от скорости подачи.



а)



б)

а – график влияния подачи на твердость обработанной поверхности;
б – график влияния подачи на шероховатость обработанной поверхности
Рисунок 5 – Графики зависимости показателей качества от подачи

Экспериментальные исследования процесса термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес показали положительные результаты. Установлено, что увеличение частоты вращения шпинделя оказывает положительное влияние на шероховатость и твердость обработанной поверхности (см.рис. 4,а,б и 5,а,б). При

этом влияние подачи получается двоякой. С увеличением подачи повышается твердость обработанной поверхности и при $S_{пр}$ = 250 мм/мин достигает НВ 380 (см. рис. 5,а,б). Известно, что твердость стали 40Х находится в диапазоне НВ≤217–248 [8; 9]. Чрезмерное повышение твердости обработанной поверхности нежелательно, так как поверхность подвергается последующей механической обработке. Однако увеличение подачи положительно сказывается на шероховатость обработанной поверхности и при $S_{пр}$ = 63–250 мм/мин обеспечивает R_z=40–18 мкм (см.рис. 5,б), что вполне удовлетворяет требованиям по качеству. Исходя из этого были определены следующие оптимальные значения режимов резания: $n_{шп}$=1250 об/мин; $S_{пр}$=100 мм/мин; t=22,5 мм. Согласно технологии изготовления прямозубых цилиндрических зубчатых колес механическая обработка впадин зубьев состоит из двух переходов [10; 11; 12]. Первый переход - черновая обработка (нарезание зубьев), которая в зависимости от оснащенности производства может быть выполнена методом обкатки червячной фрезой или методом копирования дисковой (или пальцевой) модульной фрезой. Второй переход – чистовая обработка, которая в зависимости от требования может быть выполнена шлифованием, шевингованием, а также при необходимости применяется отделочная операция притирка или обкатка (хонингование). Предлагаемая дисковая модульная фреза трения заменяет дисковую модульную фрезу, изготовляемую из быстрорежущей стали Р6М5 на зуборезной операции.

Выводы

Результаты экспериментального исследования способа термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением впадин зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых колес показали, что можно обеспечить удовлетворительные значение шероховатости (R_z=40–18 мкм) и твердости (НВ≤ 217–248).

Установлено, что увеличение частоты вращения шпинделя оказывает положительное влияние на шероховатость и твердость обработанной поверхности. Также установлено, что увеличение подачи повышает твердость, но при этом шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Исходя из этого были определены оптимальные значения режимов резания: $n_{шп}$=1250 об/мин; $S_{пр}$=100 мм/мин; t=22,5 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Пегашкин, В.** Обработка зубчатых колес [Текст] // учебн. пособие. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с.

2 **Калашников, С.Н., Калашников, А.С.** Изготовление зубчатых колес [Текст]. – М. : Высшая школа, 1980. – 303 с.

3 **Жиганов, В. И., Сахно, Ю. А., Демидов, В. В., Сахно, Е. Ю.** Механическая обработка зубчатых колес [Текст]. Ульяновск: УлГТУ, 2011.-164 с.

4 **Tattimbek, G., Sherov, K. T., Absadykov, B. N., Sikhimbaev, M. R.** Study of the method of thermo-frictional treatment of tooth root fillets of large-module cylindrical gears [Text] // Sustainable Development of Mountain Territories. Vladikavkaz, 2025. № 1 (63). – P. 350–361. – https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-1-350-361

5 **Шеров, К. Т., Бузауова, Т. М., Таттимбек, Г., Альжанова, А. Г.** Проблемы обеспечения качества изготовления зубчатых колес [Текст] / Наука и техника Казахстана. – Павлодар: Изд-во «КЕРЕКУ» ПГУ им. С. Торайгырова, 2019. – № 1. – С. 33–43.

6 **Калашников, С. Н., Калашников, А. С., Коган, Г. И.** Производство зубчатых колес [Текст]: Справочник / Под общ. Ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд., перераб. И дополн. – М. : Машиностроение, 1990. – 464 с.

7 **Черепахин, А. А., Виноградов, В. М., Клепиков, В. В.** Параметрическая оптимизация обработки зубчатых колес [Текст]. Монография: / Deutschland, Saarbrucken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012. – 230 с.

8 **Усова, Л. Ф.** Технология металлов и материаловедение [Текст] – М. : Металлургия, 1987. – 799 с.

9 **Сергеев, Н. Н., Гвоздев, А. Е., Стариков, Н. Е., Золотухин, В. И., Сергеев, А. Н.** [и др.] Технология металлов и сплавов [Текст]: учебник - Тула: Издательство ТулГУ, 2017. – 195 с.

10 **Калашников, А. С., Моргунов, Ю. А., Калашников, П. А.** Современные методы обработки зубчатых колес. Учебное пособие. Издательский дом «Спектр», 2012. – 238 с.

11 **Новиков, В. Ю., Ильянков, А. И.** Технология машиностроения [Текст]: в 2ч. – Ч.1 : учебник. – 2-е изд., перераб. – М. : Издательский центр «Академия», 2012. – 352 с.

12 **Ковшов, А. Н.** Технология машиностроения [Текст] : учебник / А. Н. Ковшов. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2016. – 320 с.

REFERENCES

1 **Pegashkin, V.** Obrabotka zubchatykh koles [Gear Processing], [Text]: uchebn. posobiye. – Nizhniy Tagil : NTI (filial) UrFU, 2016. –132 p.

2 **Kalashnikov, S. N., Kalashnikov, A. C.** Izgotovleniye zubchatykh koles [Gear Manufacturing], [Tekst]. – M. : Vysshaya shkola, 1980. – 303 p.

3 **Zhiganov, V. I., Sakhno, Yu. A., Demidov, V. V., Sakhno, Ye. Yu.** Mekhanicheskaya obrabotka zubchatykh koles [Mechanical Processing of Gear Wheels], [Tekst]. Ul'yanovsk: UlGTU, 2011. – 164 p.

4 **Tattimbek, G., Sherov, K. T., Absadykov, B. N., Sikhimbaev, M. R.** Study of the method of thermo-frictional treatment of tooth root fillets of large-module cylindrical gears [Text] // Sustainable Development of Mountain Territories. Vladikavkaz, 2025. № 1 (63). – P. 350–361. – https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-1-350-361

5 **Sherov, K. T., Buzauova, T. M., Tattimbek, G., Al'zhanova, A. G.** Problemy obespecheniya kachestva izgotovleniya zubchatykh koles [Problems of Ensuring the Quality of Gear Manufacturing], [Tekst] / Nauka i tekhnika Kazakhstana. – Pavlodar: Izd-vo «KEREKU» PGU im. S. Toraighyrova, 2019. – № 1 – P. 33–43.

6 **Tayts, B. A., Kalashnikov, S. N., Kalashnikov, A. S., Kogan, G. I.** Proizvodstvo zubchatykh koles [Gear Manufacturing], [Tekst]: Spravochnik – 3-ye izd., pererab. i dopoln. – M. : Mashinostroyeniye, 1990. – 464 p.

7 **Cherepakhin, A. A., Vinogradov, V. M., Klepikov, V. V.** Parametricheskaya optimizatsiya obrabotki zubchatykh koles [Parametric Optimization of Gear Machining], [Text]. Monografiya: / Deutschland, Saarbrucken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012. – 230 p.

8 **Usova, L. F.** Tekhnologiya metallov i materialovedeniye [Technology of Metals and Materials Science], [Tekst] – M. : Metallurgiya, 1987. – 799 p.

9 **Sergeyev, N. N., Gvozdev, A. Ye., Starikov, N. Ye., Zolotukhin, V. I., Sergeyev, A.N. [i dr].** Tekhnologiya metallov i splavov [Technology of Metals and Alloys]: uchebnik - Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2017. – 195 p.

10 **Kalashnikov, A. S., Morgunov, Yu. A., Kalashnikov, P. A.** Sovremennyye metody obrabotki zubchatykh koles [Modern Methods of Gear Processing], [Text]. Uchebnoye posobiye. Izdatel'skiy dom «Spektr», 2012. – 238 p.

11 **Novikov, V. Yu., Il'yankov, A. I.** Tekhnologiya mashinostroyeniya [Mechanical Engineering Technology], [Text]: v 2ch. – CH.1: uchebnik. – 2-ye izd., pererab. – M. : Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2012. – 352 p.

12 **Kovshov, A. N.** Tekhnologiya mashinostroyeniya [Mechanical Engineering Technology],[Tekst]: uchebnik / A. N. Kovshov. – 3-ye izd., ster. – Sankt-Peterburg: Lan', 2016. – 320 p.

Поступило в редакцию 04.02.26.
Поступило с исправлениями 09.02.26.
Принято в печать 13.02.26.

Г. Таттимбек[1], Б. Т. Мардонов[2], А. В. Маздубай[3],
****А. Е. Ержанова[4], Б. О. Жумагалиев[5]***
[1,4,5]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2]Науайы тау-кен технологиялар университеті,
Өзбекістан Республикасы, Науайы қ.;
[3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
04.02.26 ж. баспаға түсті.
09.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
13.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҮЛКЕН МОДУЛЬДІ ТІК ТІСТІ ЦИЛИНДРЛІК ТІСТІ ДОҢҒАЛАҚТАРДЫҢ ТІС ОЙЫМДАРЫН ТЕРМИЯЛЫҚ ҮЙКЕЛІСТІ ӨҢДЕУДІ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Отандық машина жасау өндірістері жағдайында тісті доңғалақтарды өндіру мәселесінің жай-күйін зерттеу бойынша жүргізілген зерттеулер тістерді кесу кезінде сапаны қамтамасыз етуге, сондай-ақ металл кескіш құралдың көп тұтынылуына байланысты жоғары өзіндік құнға байланысты мәселе бар екенін көрсетті.

Бұл мақалада тік тісті цилиндрлік тісті доңғалақтарының тістерінің ойымдарын импульстік салқындату арқылы термиялық үйкелісті жонғылау процесін эксперименттік зерттеу нәтижелері ұсынылған. Импульсті салқындату арқылы термиялық үйкелісті жонғылау әдісі ресурстарды үнемдейді, үйкеліс жонғышы құрылмалық болаттан жасалған, бұл механикалық өңдеу құнын айтарлықтай төмендетеді. Эксперименттік зерттеудің нәтижелері оңтайлы кесу режимдерінде өңделген беттің сапа көрсеткіштерінің жоғары мәндеріне қол жеткізуге болатындығын көрсетті. Айналдырықтың айналу жиілігінің жоғарылауы өңделген беттің кедір-бұдырлығы мен қаттылығына оң әсер ететіні анықталды. Бұл жағдайда берістің әсері екі түрлі болады. Берістің артуымен өңделген беттің қаттылығы артады және НВ 380-ге жетеді. Алайда, берістің жоғарылауы өңделген беттің кедір-бұдырына оң әсер етеді және R_z = 40–18 мкм қамтамасыз етеді. Осыған сүйене отырып, кесу режимдерінің келесі оңтайлы мәндері анықталды: $n_{шп}$=1250 об/мин; $S_{пр}$=100 мм/мин; t = 22,5 мм. Ұсынылған дискілі модульдік үйкеліс жонғышы тіс кесу операциясында Р6М5 жоғары жылдамдықты болаттан жасалған дискілі модульдік жонғышты ауыстырады.

Кілтті сөздер: Термофрикциялық өңдеу, импульсті салқындату, үйкеліс жонғышы, тісті доңғалақ, тісті кесу, тіс ойымдары, кедір-бұдырлық, қаттылық.

G. Tattimbek[1], B. T. Mardonov[2], A. V. Mazdubai[3],
****A. E. Erzhanova[4], B. O. Zhumagaliyev[5]***
[1,4,5]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[2]Navoi State Mining and Technological University, Republic of Uzbekistan, Navoi;
[3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
Received 04.02.26.
Received in revised form 09.02.26.
Accepted for publication 13.02.26.

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMOFRICTIONAL MACHINING OF TOOTH ROOTS OF LARGE-MODULE SPUR CYLINDRICAL GEARS

The studies carried out to analyze the current state of gear manufacturing in domestic machine-building enterprises have shown that there are problems associated with ensuring quality during gear cutting, as well as high production costs caused by significant consumption of cutting tools. This paper presents the results of an experimental study of the thermofriction milling process with pulsed cooling applied to the tooth roots of spur cylindrical gears. The thermofriction milling method with pulsed cooling is a resource-saving technology, since the friction milling cutter is manufactured from structural steels, which significantly reduces the cost of mechanical machining. The experimental results demonstrated that high surface quality parameters can be achieved at optimal cutting conditions. It was established that an increase in spindle rotational speed has a positive effect on the roughness and hardness of the machined surface. At the same time, the influence of feed rate is dual in nature. With an increase in feed rate, the hardness of the machined surface increases and reaches HB 380. However, an increase in feed rate also positively affects surface roughness, providing values of R_z = 40–18 μm. Based on the obtained results, the following optimal cutting parameters were determined: spindle speed n $n_{шп}$ = 1250 rpm; feed rate $S_{пр}$ = 100 mm/min; depth of cut t = 22.5 mm.

The proposed disc-type module friction milling cutter replaces the conventional disc-type module cutter made of high-speed steel R6M5 in the gear cutting operation.

Keywords: thermofrictional machining, pulsed cooling, friction milling cutter, gear, gear cutting, tooth roots, surface roughness, hardness.

SRSTI 55.03.35

https://doi.org/10.48081/BGQF1919

G. M. Tussupbekova[1], J. Cieślik[2], N. B. Tulieva[3], G. D. Tazhenova[4], G. Zh. Oryntaeva[5]

[1,3]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan Astana;

[2]AGH University, Poland, Krakow;

[4,5]A. Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda;

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3373-9541

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0203-5149

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6625-9545

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5512-2724

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0682-3983

*e-mail: gulim.tus@gmail.com

STUDY OF THE FORMATION OF SECONDARY CONTACT STRUCTURE

Research conducted in the conditions of domestic machine-building industries has shown that one of the main factors leading to an increase in the cost of machining parts is the excessive consumption of metal-cutting tools due to their premature wear. The solution to this problem may be the development of a method to increase the wear resistance and durability of a metal-cutting tool, as newly acquired before it is used in mechanical processing, as the after overworking the restored one.

This article presents the results of a study on the formation of a hardened secondary contact structure on the working surface of a tool after running-in, which is recommended as a way to increase the wear resistance and durability of a metal-cutting tool. It was found that the optimal pre-working modes of the tools provide the best deformation and thermal conditions for hardening the cutting part of the tools. The results of the study showed that, indeed, after running-in, a hardened layer forms on the cutting part of metal-cutting tools. It was found that the thickness of the hardened layer of the cutting part of the disk modular milling cutter is 0.41 mm, the cup cutter is 0.33 mm and the end milling cutter is 0.37 mm.

A comparison of the results of experimental, computer and metallographic studies confirmed that after running-in, the cutting part of the tool hardens.

Keywords: Running-in, metal cutting tool, wear, hardened layer, secondary contact structure, microstructure, temperature.

Introduction

Increasing the wear resistance and durability of metal-cutting tools and thereby reducing the consumption of expensive tools, as well as increasing labor productivity, is an urgent task.

The wear resistance of a metal cutting tool depends on a large number of factors. The main factors are: the material of the tool, the shape of the cutting edges, the cutting mode, the state of the crystal structure of the material and the presence of residual

stress nodes caused by heat treatment. [1; 2]. There are many ways to increase the wear resistance of a cutting tool by changing the internal structure of the material, the state of magnetization, as well as by changing the chemical composition and condition of the surface layer. These methods include: quenching, mechanical hardening, chemical and thermal treatment, application of wear-resistant coatings, magnetic abrasive treatment, magnetic pulse treatment.

The formation of secondary structures on the working surfaces of a tool is one of the manifestations of a fundamental pattern – self-organization. The optimal variant of self-organization or structural adaptability is the process of formation of secondary contact structures with strength properties significantly superior to the initial one. This phenomenon is the result of complex physico-chemical and mechanical emission processes associated with friction during cutting and manifests itself in a relatively narrow framework of the functioning of frictional contact. [3; 4; 5; 6]. The properties of secondary structures are determined by two competing factors acting simultaneously: hardening and softening, or, what is the same thing, deformation hardening and thermal rest.

Materials and methods

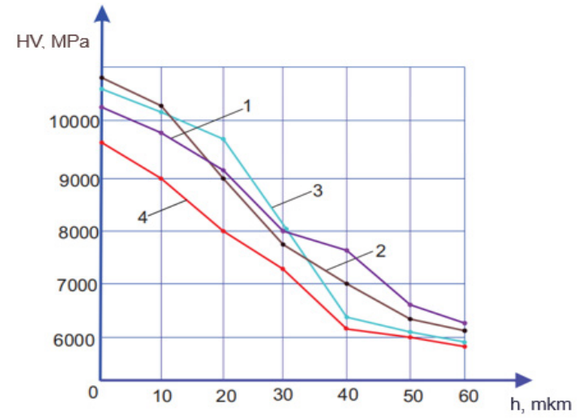
Structural adaptability in the applied version is successfully used in the practice of operating friction pairs and is realized through their running-in or breaking-in [7; 8; 9; 10]. The fundamental patterns of running-in of friction pairs are also applicable to cutting tools, the preliminary running-in of which in cutting modes optimal from the point of view of hardening their working surfaces can be considered as an effective and one of the cheapest ways to increase durability. The extreme nature of the dependence of the effect of the pre-run-in rate on the wear resistance of the contact surfaces of the tool, as well as the presence of a cutting speed limit above which there is no run-in effect, confirms the dominant role in the process of the secondary structure of the adaptability of deformation hardening. The extreme nature of the dependence of the wear resistance of the secondary structure on the cutting speed can be explained as follows. As the cutting speed increases, the sliding speed in the frictional contact zone increases, leading to an increase in the speed and degree of plastic deformation of the contact layers of the tool. This, in turn, leads to an increase in the density of defects in the crystal structure, which determine the amount of hardening. As the cutting speed increases, the process temperature increases, which facilitates deformation to a certain level, stimulating more hardening. However, when the temperature reaches a certain value equal to the recrystallization temperature, defects in the crystalline structure become active. By moving to the surface or anihylating with each other, they reduce the overall density of defects, reducing the amount of hardening. In addition, as the temperature increases, the stability of the defect decreases and its “dissolution” in the main crystal increases [11]. Thus, the presence of an extreme wear resistance from the cutting speed is the result of two competing processes of deformation hardening and thermal rest.

The depth of the transformed structure of the tool’s working surface is a thin layer of several tens of micrometers, which seriously complicates the study of its strength properties. The nature of the change in microhardness in depth has a typical type, similar

to the planned ones, the change takes place in the surface layers of hardened machine parts, and the thickness of the transformed structure averages 30-50 microns.

Results and discussion

Figure 1 shows similar dependences obtained in the study of the hardening of the teeth of a modular circular milling cutter made of steel P6M5 when milling gears m = 6mm.



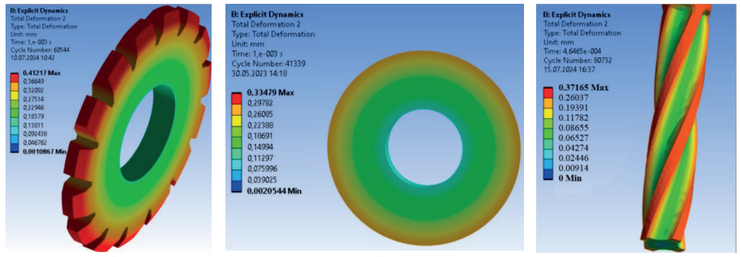
1 – in the starting position; 2 – after 10 minutes of operation at V =0.2 m/s;
3 – after 10 minutes of operation at V=0.5 m/s;
4 – after 10 minutes of operation at V=0.7 m/s.
Figure 1 – Distribution of microhardness in the
contact layer of a disk modular milling cutter from P6M5

The pattern of the curves in different modes can be explained by the presence of impact processes associated with milling and periodic thermal cycling on the contact pads of the cutting teeth. The amount of hardening depends on the cutting modes and becomes more important in the presence of impact processes. However, the large size of the spread and the insignificant numerical difference in their average values make it difficult to perform a serious quantitative analysis to establish a relationship between the parameters of cutting and contact interaction with the degree of hardening of secondary structures. Taking into account the above, one of the objectives and sufficiently informative methods for analyzing the properties of secondary structures of a tool is to determine its wear resistance in cutting modes exceeding those under which it was formed.

It can be assumed that the modes of initial cutting or pre-running-in, corresponding to the maximum durability of the tool, will determine the conditions of contact interaction, which stimulate the formation of the most wear-resistant, and therefore more hardened structure.

The ANSYS software package was used to simulate the run-in process and study the run-in layer of the cutting part of metal-cutting tools [12; 13; 14].

Figure 2 shows the hardening models of the cutting part of metal-cutting tools.



a) *b)* *c)*

a – the hardening model of the cutting part of a disk modular milling cutter;
b – the hardening model of the cutting part of the cup cutter;
c – the hardening model of the cutting part of the end mill
Figure 2 – Models of hardening of the cutting part of metal-cutting tools

The spatial processing dynamics model includes 3D models of the tool and the workpiece. In the ANSYS program, tool materials and workpieces are represented as linearly elastic materials. When modeling the chip removal process, Johnson–Cook models are used to set the mechanical properties of the workpiece material [15].

Optimal pre-working modes of tools ensure the best deformation and thermal conditions for hardening the cutting part of the tools. The results of the study showed that, indeed, after running-in, a hardened layer forms on the cutting part of metal-cutting tools (see Fig.2a, b, c). The thickness of the hardened layer of the cutting part of the circular modular milling cutter is 0.41 mm (see Fig.2a), the cup cutter is 0.33 mm (see Fig.2b) and the end mill is 0.37 mm (see Fig.2b). To compare the microstructure of the cutting part of modular circular cutters (made of P6M5 steel), a metallographic study was performed before and after running-in according to the method [16; 17]. The image was viewed using a Biomed MMP-1 microscope, which is excellent for studying the microstructure of opaque objects such as metals and alloys. The metallographic microscope allows you to make accurate measurements of various products, analyze the topological structures of the elements.

Figure 3 shows the structure of the samples obtained at 6 different points from the tip of the cutting edge to the middle.

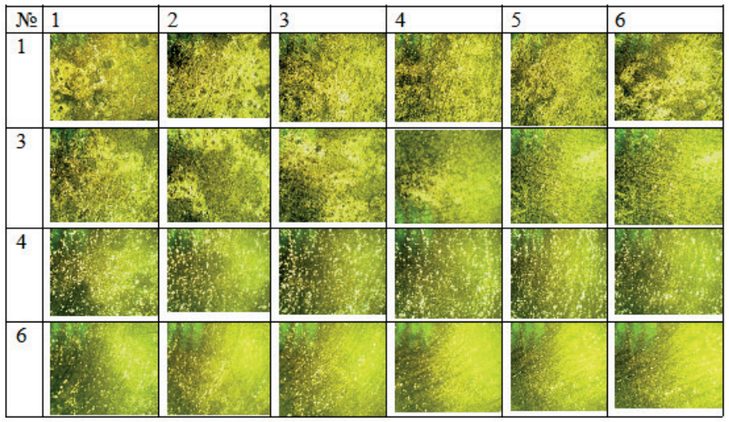


Figure 3 – The structure of the samples obtained at 6 different points from the tip of the cutting edge to the middle

Figure 4 – shows the initial microstructure of the cutting part of a circular modular milling cutter

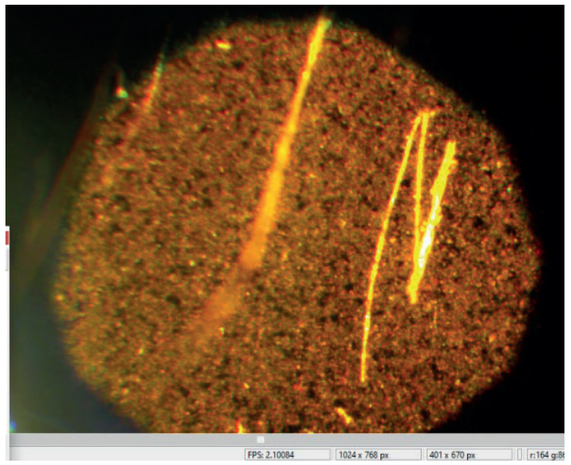
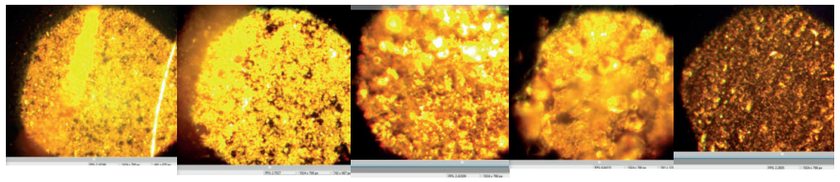


Figure 4 – Initial microstructure of the cutting part of a disk modular milling cutter

Figure 5 shows the microstructure of the P6M5 steel samples after running-in. The microstructure was obtained using an Altami microscope.



a – 30 rp/m; b – 65 rp/m; c – 80 rp/m; d – 100 rp/m; e – 125 rp/m
Figure 5 – Microstructure of P6M5 steel at different product rotation speeds

As can be seen from Figure 4, the initial sample after the quenching process consists of martensite and residual austenite of the order of up to 30 % and primary carbides. It is known that residual austenite can reduce the cutting properties of a tool.

Cutting of metals and other non-metallic surfaces involves various thermal transformations. When running-in, there is a certain specificity of converting the mechanical work of the tool into heat. This has a strong effect on the tool, in particular on the microstructure of the cutting part of the tool. At certain operating speeds, the temperature of the cutting part of the tool can reach 560–600 °C. At this temperature, a condition arises when steel can be tempered. This leads to a decrease in the amount of residual austenite. A decrease in the amount of residual austenite leads to an increase in the hardness of the alloy in question (Figure 5a, b). The cooling process of steel after running-in takes place at room temperature. It is known that controlling the cooling process of steel makes it possible to control the formation of microstructures, increase their reliability and operational stability. When the run-in process is implemented at higher speeds (Figure 5 c, d), the cutting part of the tool can heat up to higher temperatures of the order of up to 950 °C. In addition to the martensitic base, the steel structure contains a significant number of large carbides. With an increase in temperature to 1150 and 12500 °C (Figure 5 d), a condition is created that leads to a greater degree of dissolution of molybdenum carbides. At the same time, it is observed that the number and size of carbides is decreasing. This process confirms an increase in the hardness of the cutting part of the tool after running-in.

Conclusion

As a result of the research, the formation of a hardened secondary contact structure on the working surface of the tool after running-in has been established that the optimal pre-running conditions of the tool provide the best deformation and thermal conditions for strengthening the cutting part of the tool. The results of the study showed that, indeed, after running-in, a hardened layer forms on the cutting part of metal-cutting tools. It was found that the thickness of the hardened layer of the cutting part of the disk modular milling cutter is 0.41 mm, the cup cutter is 0.33 mm and the end milling cutter is 0.37 mm. A comparison of the results of experimental, computer and metallographic studies confirmed that after running-in, the cutting part of the tool hardens.

REFERENCES

1 **Ким, В. А.** Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента. - Владивосток: Дальнаука, 2001. – 203 с.

2 **Мокрицкий, Б. Я.** Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путём управления свойствами инструментального материала. - Владивосток : Дальнаука, 2010. – 232 с.

3 **Kim, V. A., Aung, N. T., Belova, I. V., Turkmenov, H. I., Shakirova, O. G., Bashkov, O. V., Khusainov, A. A.** Dissipative structures of laser-hardened structural steels // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies: proc. conf. – Cham: Springer, 2021. – Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 200. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_49.

4 **Шеров, К. Т., Мардонов, Б. Т., Ирзаев, А., Каримов, Ш. А.** Способ повышения износостойкости и надёжности червячных фрез // Проблемы механики. - Ташкент, 2005. – № 3. – С. 100–103.

5 **Пагин, М. П.** Повышение стойкости режущих инструментов изменением трибологических параметров ювенильных поверхностей направленным воздействием активированных газовых сред: автореф. дис. канд. техн. наук. – Иваново, 2010. – 20 с.

6 **Богданович, П. Н., Прушак, В. Я., Богданович, С. П.** Трение, смазка и износ в машинах. – Минск : Тэхналогія, 2011. – 527 с.

7 **Ким, В. А., Якубов, Ф. Я.** Гипотеза термодинамического механизма износа // Технология прогрессивной механической обработки и сборки: сб. науч. тр. – Ташкент, 1981. – Вып. 323. – С. 25–34.

8 **Мардонов, Б. Т., Шеров, К. Т., Равшанов, Ж. Р.** Анализ интенсивности предварительно приработанного инструмента, а также его надёжности, стойкости и стабильности // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2021. – № 2(4). – С. 33–39.

9 **Ким, В. А., Якубов, Ф. Я.** Влияние структурной приспосабливаемости инструмента на его стойкость // Оптимизация процессов резания жарко и особопрочных материалов: сб. науч. тр. – Уфа, 1983. – С. 92–96.

10 **Шеров, К. Т., Мардонов, Б. Т., Ирзаев, А.** Влияние режимов предварительной приработки на повышение стойкости режущего инструмента // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2005. – № 4. – С. 68–71.

11 **Клебанов, Ю. Д., Григорьев, С. Н.** Концентрированные потоки энергии в процессах обработки материалов. – М. : ИЦ МГТУ «Станкин», 2004. – 224 с.

12 **Sherov, K., Sagitov, A., Tusupbekova, G., Sherov, A., Kokayeva, G., Kossatbekova, D., Abdugaliyeva, G., Karsakova, N.** Experimental study of wear resistance improvement of modular disk milling cutter by preliminary pre-processing method // Designs. – 2025. – Vol. 9. – № 30. – https://doi.org/10.3390/designs9020030.

13 **Sagitov, A. A., Sherov, K. T., Mardonov, B., Akhmetov, Y., Ramazanova, Z., Ainabekova, S., Tattimbek, G., Tussupbekova, G., Esirkepov A.** Experimental study of improving the durability of a cup cutter by pre-processing // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7. – № 146. – https://doi.org/10.3390/jmmp7040146.

14 **Сагитов, А. А., Шеров, А. К., Косатбекова, Д. Ш., Есиркепова, А. Б.** Саусақты фрезаның тозуға төзімділігін арттыру // Наука и техника Казахстана. – Павлодар, 2024. – № 3. – С. 75–86. – https://doi.org/10.48081/UAET1531.

15 **Johnson, G. R., Cook, W. H.** Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engineering Fracture Mechanics. – 1985. – Vol. 21. – № 1. – P. 31–48.

16 **Кушнер, В. С., Верещака, А. С., Схиртладзе, А. Г., Негров, Д. А., Бургонова, О. Ю.** Материаловедение. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 232 с.

17 **Заплатин, В. Н., Сапожников, Ю. И., Дубов, А. В.** Основы материаловедения (металлообработка). – 8-е изд., стер. – М. : Академия, 2017. – 272 с.

REFERENCES

1 **Kim, V. A.** Samoorganizatsiya v protsessakh uprochneniya, treniya i iznashivaniya rezhushchego instrumenta [Self-organization in processes of strengthening, friction and wear of cutting tools]. Vladivostok, Dalnauka Publ, 2001. – 203 p.

2 **Mokritskii, B. Ya.** Povyshenie rabotosposobnosti metallorezhushchego instrumenta putem upravleniya svoistvami instrumental'nogo materiala [Improving the performance of cutting tools by controlling tool material properties]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2010. – 232 p.

3 **Kim, V. A., Aung, N. T., Belova, I. V., Turkmenov, H. I., Shakirova, O. G., Bashkov, O. V., Khusainov, A. A.** Dissipative structures of laser-hardened structural steels // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies: proc. conf. – Cham: Springer, 2021. – Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 200. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_49.

4 **Sherov, K.T., Mardonov, B.T., Irzaev, A., Karimov, Sh.A.** Sposob povysheniya iznosostoikosti i nadezhnosti chervyachnykh frez [Method for improving wear resistance and reliability of hob cutters]. Problemy Mekhaniki, 2005. – № 3. – P. 100–103.

5 **Pagin, M. P.** Povyshenie stoikosti rezhushchikh instrumentov izmeneniem tribologicheskikh parametrov yuvenil'nykh poverkhnostei napravlennym vozdeistviem aktivirovannykh gazovykh sred [Improving cutting tool durability by changing tribological parameters of juvenile surfaces using activated gas environments]. Abstract of PhD thesis. Ivanovo, 2010. – 20 p.

6 **Bogdanovich, P. N., Prushak, V. Ya., Bogdanovich, S. P.** Trenie, smazka i iznos v mashinakh [Friction, lubrication and wear in machines]. Minsk, Tekhnalogiya Publ., 2011, 527 p.

7 **Kim, V. A., Yakubov, F. Ya.** Gipoteza termodinamicheskogo mekhanizma iznosa [Hypothesis of the thermodynamic mechanism of wear].

8 Tekhnologiya Progressivnoi Mekhanicheskoi Obrabotki i Sborki, 1981, Issue 323. – P. 25–34.

9 **Mardonov, B. T., Sherov, K. T., Ravshanov, Zh. R.** Analiz intensivnosti predvaritel'no prirabotannogo instrumenta, a takzhe ego nadezhnosti, stoikosti i stabil'nosti [Analysis of intensity, reliability, durability and stability of preliminarily run-in tools]. Journal of Advances in Engineering Technology, 2021. – № 2(4). – P. 33–39.

10 **Kim, V. A., Yakubov, F. Ya.** Vliyanie strukturnoi prisposablivaemosti instrumenta na ego stoikost' [Influence of structural adaptability of tools on their durability]. Optimizatsiya Protsessov Rezaniya Zharkoi Osoboprochnykh Materialov, 1983. – P. 92–96.

11 **Sherov, K. T., Mardonov, B. T., Irzaev, A.** Vliyanie rezhimov predvaritel'noi prirabotki na povyshenie stoikosti rezhushchego instrumenta [Influence of preliminary running-in regimes on cutting tool durability]. Vestnik TashGTU, 2005. – № 4. – P. 68–71.

12 **Sherov, K., Sagitov, A., Tusupbekova, G., Sherov, A., Kokayeva, G., Kossatbekova, D., Abdugaliyeva, G., Karsakova, N.** Experimental study of wear resistance improvement of modular disk milling cutter by preliminary pre-processing method // Designs. – 2025. – Vol. 9. – № 30. – https://doi.org/10.3390/designs9020030.

13 **Sagitov, A. A., Sherov, K. T., Mardonov, B., Akhmetov, Y., Ramazanova, Z., Ainabekova, S., Tattimbek, G., Tussupbekova, G., Esirkepov A.** Experimental study of improving the durability of a cup cutter by pre-processing // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7. – № 146. – https://doi.org/10.3390/jmmp7040146.

14 **Sagitov, A. A., Sherov, K. T., Mardonov, B., Akhmetov, Y., Ramazanova, Z., Ainabekova, S., Tattimbek, G., Tussupbekova, G., Esirkepov A.** Experimental study of improving the durability of a cup cutter by pre-processing. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2023. – Vol. 7. – № 146. – https://doi.org/10.3390/jmmp7040146.

15 **Johnson, G. R., Cook, W. H.** Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engineering Fracture Mechanics. – 1985. – Vol. 21. – № 1. – P. 31–48.

16 **Johnson, G. R., Cook, W. H.** Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering Fracture Mechanics, 1985. – Vol. 21. – № 1. – P. 31–48.

17 **Kushner, V. S., Vereshchaka, A. S., Skhirtladze, A. G., Negrov, D. A., Burgonova, O. Yu.** Materialovedenie [Materials science]. Omsk, OmSTU Publ., 2008, 232 p.

18 **Zaplatin, V. N., Sapozhnikov, Yu. I., Dubov, A. V.** Osnovy materialovedeniya (metalloobrabotka) [Fundamentals of materials science (metalworking)].8th ed. Moscow, Akademiya Publ., 2017, 272 p.

Received 23.02.26.
Received in revised form 26.02.26.
Accepted for publication 28.02.26.

Г. М. Тусупбекова[1], Я. Циеслик[2], Н. Б. Тулиева[3],
Г. Д. Таженова[4], Г. Ж. Орынтаева[5]
[1,3]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[2]AGH университеті, Краков қ., Польша
[4,5]А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Казахстан Республикасы, Қарағанды қ.,
23.02.26 ж. баспаға түсті.
26.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
28.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЕКІНШІЛІК БАЙЛАНЫС ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫН ЗЕРТТЕУ

Отандық машина жасау өндірістері жағдайында жүргізілген зерттеулер бөлшектерді механикалық өңдеу құнының жоғарылауына әкелетін негізгі факторлардың бірі олардың мерзімінен бұрын тозуына байланысты металл кесетін құралды шамадан тыс тұтыну екенін көрсетті. Бұл мәселенің шешімі металл кескіш құралдың тозуға төзімділігі мен беріктігін жоғарылатуды қамтамасыз ету және оны қалпына келтірілгеннен кейін де жаңадан сатып алынған ретінде механикалық өңдеуге қолдануға мүмкіндік беретін әдісті әзірлеу болуы мүмкін.

Бұл мақалада металл кесетін құралдың тозуға төзімділігі мен беріктігін арттыру әдісі ретінде ұсынылатын үйкелісіп өңдеуден кейінгі құралдың жұмыс бетінде күшейтілген қайталама байланыс құрылымын қалыптастыру бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген.

Құралдарды алдын ала үйкелісіп өңдеудің оңтайлы режимдері құралдардың кесу бөлігін қатайту үшін ең тиімді деформациялық-жылу жағдайларын қамтамасыз ететіні анықталды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, өңдеуден кейін металл кесетін құралдардың кесу бөлігінде қатайтылған қабат пайда болады. Дискілі модульдік кескіштің кесу бөлігінің қатайтылған қабатының қалыңдығы 0,41 мм, табақшалы кескіштікі 0,33 мм және саусақты фрезанікі 0,37 мм болатындығы анықталды.

Эксперименттік, компьютерлік және металлографиялық зерттеулердің нәтижелерін салыстыру кезінде үйкелісіп өңдеуден кейін құралдың кесу бөлігінде қатаю болатыны расталды.

Кілтті сөздер: Үйкелісіп өңдеу, металл кесетін құрал, тозу, қатайтылған қабат, екінші байланысты құрылым, микроқұрылым, температура.

Г. М. Тусупбекова[1], Я. Циеслик[2], Н. Б. Тулиева[3],
Г. Д. Таженова[4], Г. Ж. Орынтаева[5]
[1,3]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[2]университет AGH, Польша, г. Краков;
[4,5]Карагандинский технический университет имени А. Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;
Поступило в редакцию 23.02.26.
Поступило с исправлениями 26.02.26.
Принято в печать 28.02.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СТРУКТУРЫ

Исследованиепроведенныевусловияхотечественныхмашиностроительных производств показали, что одним из основных факторов приводящие к повышению себестоимости механической обработки деталей является чрезмерный расход металлорежущего инструмента из-за преждевременного их износа. Решением данной проблемы может быть разработка способа позволяющий обеспечить повышения износостойкости и стойкости металлорежущего инструмента как ново приобретенного до его использования в механической обработке, так и после переточки восстановленного.

В данной статье приводятся результаты исследования формирование упрочненной вторичной контактной структуры на рабочей поверхности инструмента после приработки, который рекомендуется как способ повышения износостойкости и стойкости металлорежущего инструмента.

Было установлено, что оптимальные режимы предварительной приработки инструментов обеспечивают наилучшие деформационно-тепловые условия упрочнения режущей части инструментов. Результаты исследования показали, что действительно после приработки на режущей части металлорежущих инструментов образуется упрочненный слой. Было установлено, что толщина упрочненного слоя режущей части дисковой модульной фрезы составляет 0,41 мм, чашечнего резца составляет 0,33 мм и концевой фрезы составляет 0,37 мм.

Сравнение результатов экспериментальных, компьютерных и металлографических исследований подтвердили, что после приработки происходит упрочнение режущей части инструмента.

Ключевые слова: Приработка, металлорежущий инструмент, износ, упрочненный слой, вторичная контактная структура, микроструктура, температура.

МЕТАЛЛУРГИЯ

МРНТИ 53.01.05

https://doi.org/10.48081/BGQF1920

Л. С. Баймолданова[1], Б. К. Рахадилов[2],
Р. Е. Сакенова[3], М. А. Ажибаева[4]
[1,3,4]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[2]ТОО «PlasmaScience», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3533-242X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5990-7123
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6095-0129
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6095-0129
*e-mail: baimoldals@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ TISICN ПРИ РЕАКТИВНОМ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

В данной работе исследованы закономерности формирования нанокомпозитной структуры покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления с использованием механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si. Основное внимание уделено влиянию параметров плазменного процесса, в частности силы дугового тока, на фазовый состав, микроструктуру и плотность формируемых покрытий. С использованием методов рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии установлено, что повышение силы дугового тока приводит к интенсификации процессов расплавления и реакционного взаимодействия частиц в плазменной струе, снижению пористости и формированию более плотной и структурно однородной нанокомпозитной структуры. Также, показано, что покрытия состоят из нанокристаллитов Ti(C,N), распределённых в аморфной кремнийсодержащей матрице на основе Si_3N_4/SiC. Установлена ключевая роль механической активации порошков в повышении фазовой однородности, интенсификации реакционных процессов и подавлении роста зёрен. Полученные результаты расширяют представления о механизмах структурообразования покрытий TiSiCN и подтверждают перспективность реактивного плазменного напыления для получения износо- и термостойких защитных покрытий промышленного назначения, применяемых в энергетике и машиностроении, обеспечивающих повышение эксплуатационной надёжности деталей оборудования.

Ключевые слова: реактивное плазменное напыление, TiSiCN, нанокомпозитная структура, механическая активация, фазовый состав, микроструктура, трибологические свойства.

Введение

Нанокомпозитные покрытия на основе системы Ti–Si–C–N в последние годы привлекают значительное внимание исследователей благодаря сочетанию высокой твёрдости, термической стабильности и коррозионной стойкости, что делает их перспективными для применения в энергетике, машиностроении и других отраслях, работающих в условиях высоких температур и агрессивных сред [1; 2]. Структурная особенность таких покрытий заключается в формировании нанокристаллических зёрен твёрдого раствора Ti(C,N), внедрённых в аморфную кремнийсодержащую матрицу, преимущественно на основе Si_3N_4 и SiC, что обеспечивает подавление роста зёрен и повышение эксплуатационной стабильности материала [3; 4; 5].

Большинство опубликованных исследований по покрытиям TiSiCN посвящено тонким плёнкам, полученным методами физического и химического осаждения из газовой фазы (PVD, CVD, PECVD, дуговое ионное осаждение) [6; 7; 8]. Для таких систем показано, что введение кремния и азота способствует формированию аморфно-нанокристаллической структуры, приводящей к повышению твёрдости, улучшению трибологических характеристик и росту окислительной стойкости [9]. Однако толщина подобных покрытий, как правило, не превышает нескольких микрометров, что существенно ограничивает их применение в узлах, испытывающих высокие механические и тепловые нагрузки.

В этом контексте особый интерес представляет реактивное плазменное напыление (RPS), которое позволяет формировать толстые покрытия с высокой плотностью и хорошей адгезией к подложке. В отличие от методов вакуумного осаждения, RPS обеспечивает протекание in situ химических реакций между компонентами порошковой смеси в плазменной струе и на поверхности подложки, что способствует образованию фаз Ti(C,N), Si_3N_4 и SiC непосредственно в процессе напыления [3;4;8]. Ряд работ показал, что изменение параметров плазмы, таких как сила дугового тока и газовый режим, оказывает решающее влияние на фазовый состав и микроструктуру плазменно-напылённых покрытий [3;10;11].

Дополнительным фактором, существенно влияющим на процессы структурообразования при реактивном плазменном напылении, является механическая активация исходных порошковых смесей. Высокоэнергетический помол приводит к уменьшению размеров частиц, накоплению дефектов кристаллической решётки и увеличению реакционной способности компонентов, что интенсифицирует фазовые превращения в условиях плазменного воздействия [12]. В предыдущих исследованиях показано, что механическая активация порошков системы Ti–Si–C–N способствует более полному формированию твёрдых растворов Ti(C,N) и стабилизации аморфной кремнийсодержащей фазы, что создаёт предпосылки для формирования нанокомпозитной структуры покрытий [9; 13].

Несмотря на значительный прогресс в изучении тонкоплёночных систем TiSiCN, вопросы формирования нанокомпозитной структуры толстых покрытий, полученных методом реактивного плазменного напыления с использованием

механически активированных порошков, остаются недостаточно изученными. В частности, отсутствуют систематические данные о взаимосвязи параметров плазменного процесса, фазового состава и микроструктуры покрытий TiSiCN, что затрудняет целенаправленную оптимизацию их свойств.

В отличие от ранее опубликованных работ, посвящённых преимущественно тонкоплёночным покрытиям, в настоящем исследовании рассматриваются особенности формирования нанокомпозитной структуры толстых покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления с использованием механически активированных порошков. Особое внимание уделено установлению взаимосвязи между параметрами плазменного процесса и структурной однородностью формируемых покрытий, что имеет важное значение для последующей оптимизации эксплуатационных свойств защитных слоёв.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования нанокомпозитной структуры покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления из механически активированных порошковых смесей TiCN–SiC–Si, при варьировании силы дугового тока. Основное внимание уделено анализу фазового состава и микроструктурных особенностей покрытий, определяющих их структурную однородность и потенциал для дальнейших функциональных применений

Материалы и методы

В качестве исходных материалов для получения покрытий TiSiCN использовались порошковые смеси системы TiCN–SiC–Si. Состав смесей подбирался исходя из стехиометрических соотношений элементов, необходимых для формирования твёрдого раствора Ti(C,N) и кремнийсодержащих фаз, стабилизирующих нанокомпозитную структуру покрытия.

Механическая активация порошковых смесей осуществлялась в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице Emax (Retsch, Германия). Помол проводился при скорости вращения 1100 об/мин в течение 90 мин при массовом соотношении шаров к порошку 10:1. В процессе механической активации происходило измельчение частиц, формирование агломератов субмикронного размера и накопление дефектов кристаллической решётки, что повышало реакционную способность порошков при последующем плазменном напылении.

Осаждение покрытий TiSiCN выполнялось методом реактивного плазменного напыления с использованием прямоточного плазмотрона мощностью до 40 кВт. В качестве подложек применялась нержавеющая сталь марки 12Х18Н9Т, образцы которой имели размеры 20×20×3 мм. Перед напылением подложки подвергались ультразвуковой очистке в этаноле и ацетоне для удаления поверхностных загрязнений и улучшения адгезии покрытия.

Параметры плазменного процесса варьировались за счёт изменения силы дугового тока в диапазоне 400–600 А при фиксированном расстоянии напыления 110 мм. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, водород применялся для стабилизации плазмы и снижения степени окисления частиц, а

азот выполнял роль реакционно-активного газа, обеспечивающего формирование нитридных фаз. Основные параметры реактивного плазменного напыления приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры реактивного плазменного напыления покрытий TiSiCN

Обозначение образца	Сила тока, А	Расход водорода, л/мин	Расход аргона, л/мин	Расход азота, л/мин	Напряжение, В	Расстояние напыления, мм
TiSiCN-1	400	1,3	30	40	30	110
TiSiCN-2	500	1,5	35	40	30	110
TiSiCN-3	600	1,7	40	40	30	110

Фазовый состав полученных покрытий исследовался методом рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра Bruker D8 Advance с Cu Kα-излучением (λ=1,5406 Å). Съёмка проводилась в диапазоне углов 2θ=20–80° при стандартных условиях. Идентификация фаз выполнялась на основе анализа положения и интенсивности дифракционных максимумов.

Микроструктура покрытий и элементный состав анализировались методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа SEM3200 (CIQTEK, Китай), оснащённого энергодисперсионным анализатором. Исследования проводились при ускоряющем напряжении 15 кВ в режимах вторичных и обратнорассеянных электронов. Для выявления микроструктурных особенностей поверхности и поперечных сечений покрытия образцы предварительно подвергались кратковременному химическому травлению в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этаноле. Элементный состав оценивался методом EDS в нескольких характерных зонах покрытия для повышения репрезентативности результатов.

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 представлены микрофотографии, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (РЭМ), механически активированных порошковых смесей, используемых для реактивного плазменного напыления системы TiCN+SiC+Si.

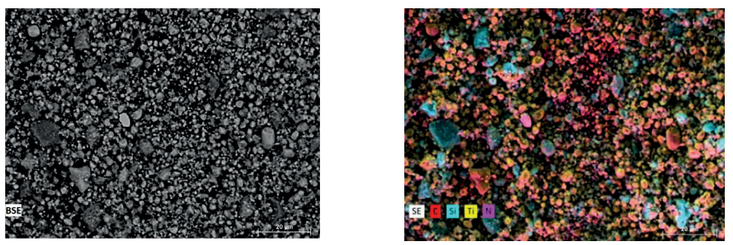


Рисунок 1 – РЭМ-изображения механически активированных порошковых смесей, применяемых для реактивного плазменного напыления: смесь порошков TiCN+SiC+Si

Порошковые смеси характеризуются относительно равномерным распределением частиц и развитой шероховатой поверхностью, типичной для высокоэнергетического шарового помола. Наличие микро- и субмикронных агломератов свидетельствует об эффективной механической активации и частичной адгезии между частицами различного состава. Элементный контраст, наблюдаемый на изображениях в режиме обратнорассеянных электронов (BSE), подтверждает однородное распределение Ti, Si, C и N в объёме порошковых смесей, что согласуется с ранее опубликованными данными для систем Ti–Si–C–N, полученных методом механической активации [10;13].

Подобные морфологические особенности являются благоприятными для последующего плазменного напыления, поскольку способствуют улучшению расплавления частиц, межфазного взаимодействия и фазовой однородности формируемых покрытий. Механически активированные порошки в дальнейшем использовались для нанесения покрытий.

На рисунке 2 приведены рентгеновские дифрактограммы (РФА) покрытий TiSiCN-1, TiSiCN-2 и TiSiCN-3, полученных методом реактивного плазменного напыления при значениях силы дугового тока 400, 500 и 600 А соответственно.

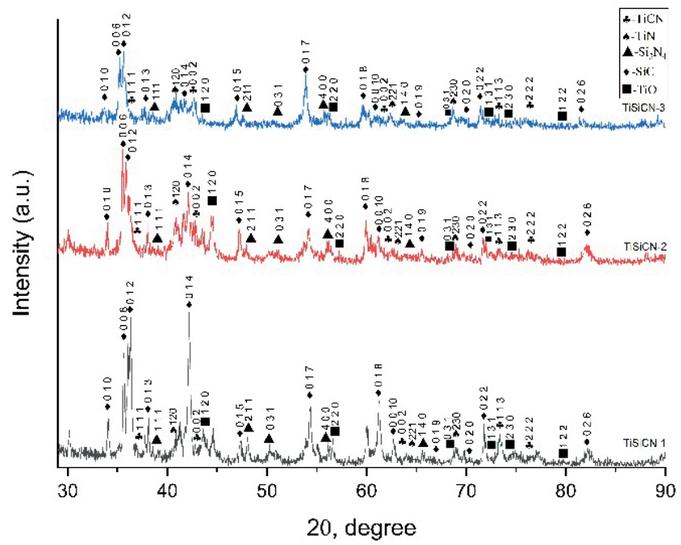


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы покрытий TiSiCN, полученных при различных значениях силы дугового тока: (a) TiSiCN-1 (400 А), (b) TiSiCN-2 (500 А), (c) TiSiCN-3 (600 А)

Дифракционные пики на представленных дифрактограммах в основном соответствуют фазе твёрдого раствора Ti(C,N) с пространственной группой Fm-3m и характерными отражениями при $2\theta \approx 36{,}0°$, 41,7°, 60,4° и 71,8°, что подтверждает

внедрение атомов азота в кристаллическую решётку TiC. Дополнительно выявлены отражения, относящиеся к фазам TiN (43,6°, 63,6°) и Si_3N_4 (34,2°, 44,2°, 57,6°), что указывает на частичное нитридирование титана и кремния в процессе реактивного плазменного напыления. Слабые сигналы фаз SiC (35,6°, 75,3°) и TiO_2 (27,4°, 54,3°) соответствуют вторичным фазам, сформировавшимся вследствие незначительного окисления в условиях плазменной струи.

При увеличении силы дугового тока с 400 до 600 А пики фазы Ti(C,N) становятся более узкими и интенсивными, что свидетельствует об улучшении кристалличности и формировании более совершенного твёрдого раствора. Увеличение силы дугового тока приводит к повышению силы дугового тока, что интенсифицирует расплавление частиц и способствует формированию более плотной ламеллярной структуры покрытия.

Наличие фаз Si_3N_4 и SiC согласуется с результатами исследований работ [14;15;16], подтверждая роль кремния как стеклообразующего элемента, приводящего к частичной аморфизации границ зёрен и подавлению роста кристаллитов Ti(C,N). Слабые пики TiO_2, характерные для плазменно-напылённых покрытий, обусловлены остаточным окислением при высоких температурах, что также отмечено в работах Чжоу и соавт. [17] и Чжана и соавт. [18], посвящённых реактивным плазменным и дуговым процессам.

Смещение основных отражений Ti(C,N) в область больших дифракционных углов указывает на сжатие кристаллической решётки, обусловленное замещением атомов углерода большего атомного радиуса атомами азота меньшего размера. Подобная тенденция согласуется с результатами, представленными в работах Погребняка и соавт. [19] и Чена и соавт. [20], где показано, что введение Si и N в системы TiN/TiC способствует формированию аморфно-нанокристаллических структур TiSiCN с повышенной твёрдостью и термической стабильностью.

Среди всех исследованных образцов покрытие TiSiCN-3, полученное при силе тока 600 А, характеризуется наиболее чётко выраженными и интенсивными отражениями фаз Ti(C,N) и Si_3N_4 при минимальном содержании оксидных включений, что свидетельствует о формировании плотной нанокомпозитной структуры, состоящей из кристаллитов Ti(C,N), внедрённых в аморфную матрицу Si_3N_4/SiC. Подобная микроструктурная конфигурация обеспечивает высокую твёрдость, термическую стабильность и окислительную стойкость покрытий, что полностью согласуется с нанокомпозитной моделью, предложенной в работе [19] и позднее подтверждённой для систем TiSiCN в исследовании [10].

После анализа фазового состава методом РФА было выполнено детальное исследование микроструктуры покрытий с использованием РЭМ в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDS). Репрезентативные РЭМ-изображения и карты распределения элементов для всех трёх покрытий представлены на рисунке 3. Для серии покрытий TiSiCN (a–c) карты элементного распределения также указывают на присутствие азота, однако его детектирование ограничено чувствительностью метода EDS. Полученные результаты согласуются с количественными данными EDS-анализа (таблица 2) и подтверждают влияние

исходного состава порошков и величины тока напыления на степень элементной однородности покрытий.

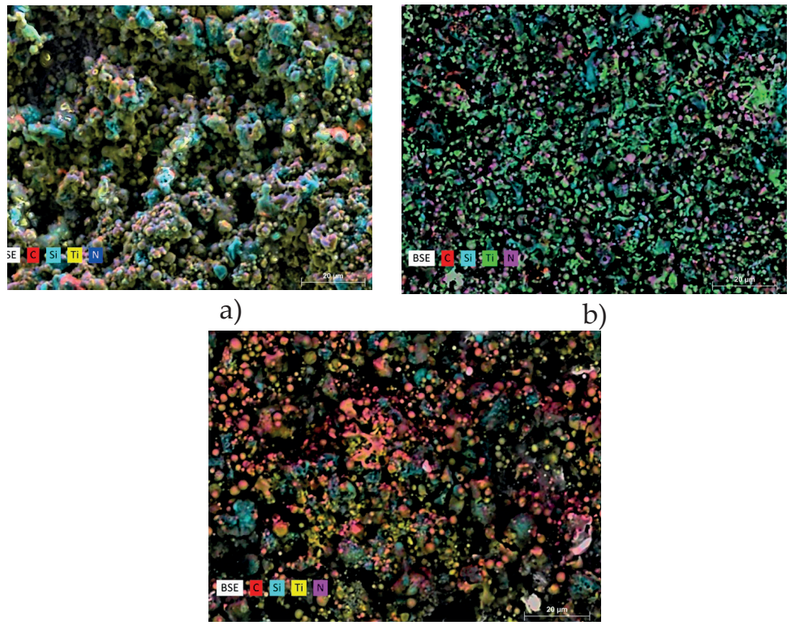


Рисунок 3 – РЭМ-микрофотографии и карты распределения элементов покрытий: (a) TiSiCN-1, (b) TiSiCN-2, (c) TiSiCN-3

Дополнительно установлено, что полученные покрытия характеризуются равномерной толщиной, составляющей в среднем – мкм в зависимости от режима напыления. Повышение силы дугового тока приводит к формированию структурно однородного покрытия, что свидетельствует об улучшении условий расплавления и уплотнения частиц при осаждении. Полученные данные подтверждают, что увеличение тепловложения в плазменной струе способствует формированию покрытий с более низкой пористостью и лучшей структурной однородностью.

Среди всех исследованных покрытий TiSiCN-3 демонстрирует наиболее однородное распределение элементов, плотную микроструктуру и минимальную пористость, что согласуется с улучшенными механическими характеристиками этих покрытий. Данная тенденция согласуется с результатами исследований Погребняка и соавт. [19] и авторы [20], которые показали, что введение Si и N способствует структурной гомогенизации и уменьшению размера зёрен покрытий на основе Ti(C,N). Для более детального сравнения количественные результаты EDS для всех образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Количественный состав покрытий TiSiC и TiSiCN по данным EDS (атом. %)

Обозначение образца	Ti (at.%)	Si (at.%)	C (at.%)	N (at.%)
TiSiCN-1	41.94	24.06	32.30	1.70
TiSiCN-2	30.95	27.38	41.66	0.00
TiSiCN-3	33.93	30.32	35.74	0.00

На рисунке 4 представлены РЭМ-микрофотографии и соответствующие карты распределения элементов покрытий TiSiCN. В качестве представительного образца системы показан TiSiCN-3, осаждённый при силе дугового тока 600 А. Покрытие демонстрирует плотную ламеллярную структуру с равномерной толщиной и хорошей адгезией к подложке. Карты распределения элементов подтверждают элементную однородность покрытия Ti, Si, C и N по всему объёму покрытия, что свидетельствует о равномерном формировании фаз и прочном межламеллярном сцеплении, достигнутом при оптимизированных условиях плазменного напыления.

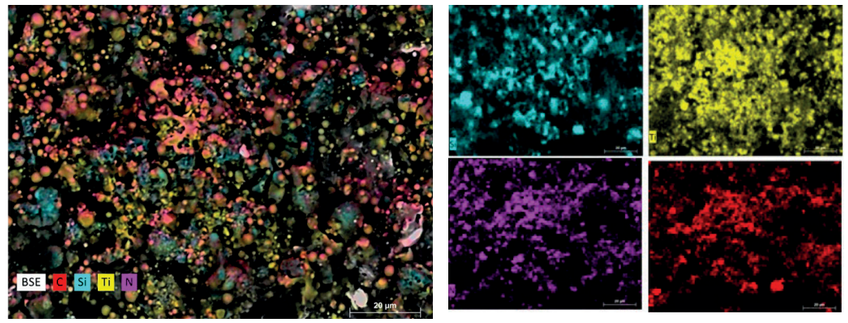


Рисунок 4 – РЭМ-микрофотографии и карты распределения элементов покрытия TiSiCN-3

Микроструктура и распределение элементов покрытия TiSiCN-3, представленные на рисунке 5, демонстрируют выраженный сигнал азота, подтверждающий образование твёрдого раствора Ti(C,N), что согласуется с сдвигом дифракционных пиков РФА в область больших углов.

Анализ РЭМ показал, что механическая активация обеспечила формирование мелких частиц TiCN–SiC–Si с высокой плотностью дефектов и равномерным распределением. Такая морфология усиливала реакционную способность и расплавление частиц в процессе плазменного напыления. В результате покрытия TiSiCN приобрели плотную ламеллярную структуру с прочным межламеллярным сцеплением и хорошей адгезией к подложке, что подтверждает положительное влияние механической активации порошков на формирование покрытий.

Картирование элементов показало равномерное распределение Ti, Si, C и N, формирующих матрицу на основе Ti(C,N) с дисперсными фазами SiC и Si_3N_4,

способствующими повышению твёрдости и термической стабильности. Образец TiSiCN-3 демонстрирует наиболее однородную морфологию и оптимальный фазовый состав, подтверждая, что выбранные параметры напыления обеспечили формирование плотных наноструктурированных покрытий с улучшенными механическими и термическими свойствами.

Комплексный анализ результатов рентгенофазовых и микроструктурных исследований показывает, что при реактивном плазменном напылении механически активированных порошков реализуется механизм формирования нанокомпозитной структуры, основанный на образовании нанокристаллитов Ti(C,N), распределённых в аморфной кремнийсодержащей матрице. Повышение силы дугового тока способствует интенсификации процессов расплавления частиц и формированию более плотного и структурно однородного покрытия.

Выводы

В работе показано, что реактивное плазменное напыление механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si обеспечивает формирование покрытий TiSiCN с выраженной нанокомпозитной структурой.

Установлено, что основой фазового состава покрытий является твёрдый раствор Ti(C,N), формирующийся в результате реакционного взаимодействия компонентов порошковой смеси с азотом плазменной струи при одновременном образовании кремнийсодержащих фаз Si_3N_4 и SiC, стабилизирующих структуру покрытия.

Рентгенофазовый анализ выявил смещение дифракционных пиков фазы Ti(C,N) в область больших углов при увеличении силы дугового тока, что свидетельствует об интенсификации процессов нитридообразования и совершенствовании кристаллической структуры покрытия.

Микроструктурные исследования показали, что полученные покрытия обладают характерной для плазменно-напылённых материалов ламеллярной структурой, при этом увеличение силы дугового тока в диапазоне 400–600 А способствует снижению пористости, повышению плотности и формированию более однородной микроструктуры.

Данные энергодисперсионного анализа подтверждают равномерное распределение элементов Ti, Si, C и N по объёму покрытия, что указывает на эффективное протекание реакционных процессов и высокую степень фазовой гомогенизации. Установлено, что механическая активация исходных порошков играет ключевую роль в формировании нанокомпозитной структуры за счёт повышения реакционной способности частиц и подавления роста кристаллитов Ti(C,N).

Полученные результаты подтверждают эффективность реактивного плазменного напыления как перспективного метода получения толстых наноструктурированных защитных покрытий, обладающих потенциалом применения в энергетическом и машиностроительном оборудовании.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение трибологических, коррозионных и высокотемпературных характеристик покрытий TiSiCN, а

также на оптимизацию параметров напыления для расширения промышленного применения данной технологии.

REFERENCES

1 **Mirzayev, M. N., Parau, A. C., Slavov, L.** TiSiCN as Coatings Resistant to Corrosion and Neutron Activation // Materials. – 2023. – Vol. 16. – 1835. – https://doi.org/10.3390/ma16051835.

2 **Endler, I., Höhn, M., Schmidt, J.** Ternary and quaternary TiSiN and TiSiCN nanocomposite coatings obtained by CVD // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 215. – P. 133–140. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.085.

3 **Qin, Y., Zhu, L., He, J., Chen, C., Wang, J., Fan, J.** Microstructure evolution and reaction mechanism of Ti–C–N coatings fabricated by reactive plasma spraying // Vacuum. – 2024. – Vol. 213. – 112123. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112123.

4 **Deng, J., Li, R., Chen, C.** Plasma-sprayed Ti–Si–C coatings and their crystallization behavior // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49(1). – P. 623–631. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.185.

5 **He, J., Liu, J., Zhao, H., Qin, Y., Fan, J.** In situ nanostructured (TiCr)CN coating by reactive plasma spraying // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 433. – P. 865–873. – https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.213.

6 **Panjan, P., Drnovšek, A., Gselman, P., Čekada, M., Panjan, M.** Review of growth defects in thin films prepared by PVD // Coatings. – 2020. – Vol. 10(5). – 447. – https://doi.org/10.3390/coatings10050447.

7 **Ma, S., Xu, K.** Influence of Si content on nano-structured Ti–Si–N films by PECVD // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 184(2–3). – P. 182–187. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.12.032.

8 **Pogrebnjak, A. D., Yakushchenko, I. V., Beresnev, V. M.** Structure and properties of nanocomposite coatings TiN/Si–N and Ti–Al–Si–N // Surface and Coatings Technology. – 2019. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125121.

9 **Chen, X., Wang, L., Liu, Y.** Microstructure and properties of Ti–Si–C–N coatings // Ceramics International. – 2018. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.033.

10 **Baimoldanova, L., Rakhadilov, B., Kengesbekov, A., Kuanyshbai, R.** Influence of Mechanical Activation on the Evolution of TiSiCN Powders for Reactive Plasma Spraying // Crystals. – 2024. – Vol. 14(11). – 1005. – https://doi.org/10.3390/cryst14101005.

11 **Sun, X.** Microstructure evolution and reaction mechanism of in-flight Ti–Si–C agglomerates during reactive plasma spraying // Ceramics International. – 2022. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.XXX.

12 **Zhou, Y., Sun, J., Zhang, J.** Effect of arc current on TiN coatings prepared by arc ion plating // Vacuum. – 2020. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109369.

13 **Zhang, Y., Li, W., Wang, H.** Influence of H_2 addition on plasma-sprayed coatings // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.146.

14 **Singh, S., Ghosh, M.** Effect of argon flow rate on structure and adhesion of hard coatings // Vacuum. – 2016. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.04.005.

15 **Sun, X.** Microstructure evolution of Ti–Si–C agglomerates during RPS (in-situ water-quenched) // Ceramics International. – 2022. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.XXX.

16 **Wu, Z., Li, S., Zhou, F.** Electrochemical and tribological properties of TiSiCN coatings in coolant // Materials Science (Medžiagotyra). – 2019. – Vol. 25(4). – P. 548–553. – https://doi.org/10.5755/j01.ms.25.4.19252.

17 **Zhou, Y.** Effect of arc current on TiN coatings prepared by arc ion plating // Vacuum. – 2020. – https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109369.

18 **Zhang, Y.** Influence of H_2 addition on plasma-sprayed coatings // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.146.

19 **Pogrebnjak, A. D.** Structure and properties of nanocomposite coatings TiN/Si–N and Ti–Al–Si–N // Surface and Coatings Technology. – 2019. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125121.

20 **Chen, X.** Microstructure and properties of Ti–Si–C–N coatings // Ceramics International. – 2018. – https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.033.

Поступило в редакцию 03.02.26.
Поступило с исправлениями 05.02.26.
Принято в печать 17.02.26.

Л. С. Баймолданова[1], Б. К. Рахадилов[2], Р. Е. Сакенова[3], М. А. Ажибаева[4]
[1,3,4]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[2]«PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
03.02.26 ж. баспаға түсті.
05.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
17.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

РЕАКТИВТІ ПЛАЗМАЛЫҚ БҮРКУ КЕЗІНДЕ TISICN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ НАНОКОМПОЗИТТІК ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫ

Бұл жұмыста механикалық активтендірілген TiCN–SiC–Si жүйесінің ұнтақ қоспаларын пайдалану арқылы реактивті плазмалық бүрку әдісімен алынған TiSiCN жабындарының нанокомпозиттік құрылымының қалыптасу заңдылықтары зерттелді. Негізгі назар плазмалық процестің параметрлерінің, әсіресе доғалық ток күшінің, алынатын жабындардың фазалық құрамы, микроструктурасы және тығыздығына әсеріне аударылды. Рентгенфазалық талдау және сканерлеуші электрондық микроскопия әдістерін қолдану нәтижесінде доғалық ток күшінің артуы плазмалық ағын ішіндегі бөлшектердің балқуы мен реакциялық өзара әрекеттесу процестерінің қарқындануына, кеуектіліктің төмендеуіне және құрылымы біртекті, тығыз нанокомпозиттік құрылымның қалыптасуына ықпал ететіні анықталды. Жабын құрылымы Si_3N_4/SiC негізіндегі аморфты кремнийқұрамды матрицада біркелкі таралған Ti(C,N) нанокристаллиттерінен тұратыны көрсетілді. Ұнтақтарды механикалық активтендіру фазалық біртектілікті арттыруда, реакциялық процестерді күшейтуде және дәндердің өсуін тежеуде шешуші рөл атқаратыны анықталды. Алынған нәтижелер қалың TiSiCN жабындарындағы құрылым түзілу механизмдерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді және реактивті плазмалық бүрку әдісінің энергетика мен машина жасау салаларында қолданылатын бөлшектердің пайдалану сенімділігін арттыратын тозуға және жоғары температураға төзімді қорғаныш жабындарын алудағы тиімділігін растайды.

Кілтті сөздер: реактивті плазмалық бүрку, TiSiCN, нанокомпозиттік құрылым, механикалық активация, фазалық құрам, микроқұрылым, трибологиялық қасиеттер.

L. S. Baimoldanova[1], B. K. Rakhadilov[2], R. E. Sakenova[3], M. A. Azhibaeva[4]
[1,3,4]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk
[2]«PlasmaScience» LLP, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk
Received 03.02.26.
Received in revised form 05.02.26.
Accepted for publication 17.02.26.

FORMATION OF THE NANOCOMPOSITE STRUCTURE OF TISICN COATINGS DURING REACTIVE PLASMA SPRAYING

This study investigates the formation mechanisms of the nanocomposite structure of TiSiCN coatings produced by reactive plasma spraying using mechanically activated TiCN–SiC–Si powder mixtures. Particular attention is given to the influence of plasma process parameters, especially arc current, on the phase composition, microstructure, and density of the resulting coatings. X-ray diffraction and scanning electron microscopy analyses reveal that increasing arc current intensifies particle melting and reactive interactions within the plasma jet, leading to reduced porosity and formation of a dense and structurally homogeneous nanocomposite structure. The coatings are shown to consist of Ti(C,N) nanocrystallites uniformly distributed within an amorphous silicon-containing Si_3N_4/SiC matrix. Mechanical activation of powders plays a crucial role in enhancing phase homogeneity, intensifying reaction processes, and suppressing grain growth. The obtained results expand the understanding of structure formation mechanisms in thick TiSiCN coatings and confirm the effectiveness of reactive plasma spraying for producing wear- and heat-resistant protective coatings used in energy and mechanical engineering applications, ensuring improved operational reliability of industrial components.

Keywords: reactive plasma spraying, TiSiCN, nanocomposite structure, mechanical activation, phase composition, microstructure, tribological properties.

ҒТАМР 53.31.23

https://doi.org/10.48081/BGQF1921

***А. В. Богомолов[1], С. С. Спанов[2],**
Р. А. Бегалиев[3], П. О. Быков[4], А. А. Каменов[5]
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4926-0925
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2679-247X
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1112-6322
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7540-7882
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0023-5419
* e-mail: bogomolov71@mail.ru

ҚАСИЕТТЕР ДЕҢГЕЙІ ЖОҒАРЫ ТӨМЕН ҚОСПАЛАНҒАН БОЛАТТАРДЫ АЛУДЫ ЖӘНЕ ӨНДІРІСТІҢ ЭКОЛОГИЯЛЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Пайдалану қасиеттерінің деңгейі жоғары және өндірісі экологиялық таза төмен легирленген болаттарды алудың технологиялық процесін жетілдіру бойынша модельдеу мен эксперименттік зерттеулердің нәтижелері ұсынылған.

Тұтынушылық қасиеттердің жоғары деңгейіне металды пештен тыс өңдеу кезінде болаттағы бейметалл қосындыларды азайту есебінен қол жеткізілді.

Өндірістің экологиялылығы Al_2O_3 құрамы бар отқатөзімдіматериалдардың қалдықтары негізіндегі флюс түзетін қоспаны пайдалану есебінен қамтамасыз етілді. Бұл материал рафинирлеуші қождарды тұрақтандыруға, болат өндіру шығындарын азайтуға мүмкіндік берді, сондай-ақ балқытқыш шпаттың CaF_2 алмастырғышына айналды.

Пештен тыс өңдеу агрегаттарында флюс түзетін қоспаны пайдалану мүмкіндігін зерттеу үшін бірқатар металлургиялық кәсіпорындардың қож үлгілеріне талдау жасалды. Сынамалар шөміш-пеш агрегатында металды өңдеу процесі барысында алынды.

Іріктелген қож үлгілерінің рафинирлеуші және физика-химиялық қасиеттерін бағалау қождар құрылымының полимерлік моделін пайдалана отырып, есептеу жолымен жүргізілді.

Al_2O_3 құрамы бар отқа төзімді материалдардың қалдықтары негізіндегі қоспаның көмегімен рафинирлеуші қождарды тұрақтандыру мүмкіндігі расталды. Қождарға Al_2O_3 енгізу жоғары негізді қождарда жұмыс істеуге мүмкіндік беретіні, қождардың беттік қасиеттерін жақсартатыны, отқа төзімді материалдардың беріктігін арттыратыны, металдың түйіршіктер (корольки) түріндегі шығынын және бейметалл қосындылардың мөлшерін азайтатыны көрсетілген.

Әдебиетте келтірілген эксперименттік деректерді, сондай-ақ термодинамикалық есептеулерді пайдалана отырып, шөміш-пеш агрегатында металды өңдеу технологиясы тұрғысынан қождағы Al2O3-тің максималды рұқсат етілген мөлшері 30 %-дан аспайтыны анықталды.

Зерттеліп отырған қоспамен модельдік қожды тұрақтандыру бойынша эксперименттер нәтижелері бұл жағдайда негізінен тұрақтандырудың химиялық әдісі іске асырылатынын көрсетті.

Кілтті сөздер: болат, пештен тыс өңдеу, қож, шөміш-пеш агрегаты, фаза, флюс.

Кіріспе

Әлемде балқытылатын болаттың басым бөлігі доғалы болат балқыту пешінде немесе конвертерде болат жартылай өнімін алу және осы жартылай өнімді пештен тыс өңдеу агрегаттарында өңдеу арқылы дуплекс-процесспен өндіріледі. Осындай негізгі агрегаттардың бірі – металды металл емес қосылыстардан тазартуға, оны күкіртсіздендіруді жүргізуге және оның химиялық құрамын талап етілетін деңгейге дейін жеткізуге мүмкіндік беретін шөміш-пеш агрегаты (бұдан әрі – ШПА).

Мұндай екі сатылы өндіріс схемасы металды өңдеудің физика-химиялық параметрлері мен температурасы бойынша екі түрлі кезеңін жүргізу қажеттілігімен шартталған. Біріншісі – металды балқыту және фосфорды жою. Екіншісі – металды күкіртсіздендіру, оны қоспалау және құю алдында қыздыру. Бірінші кезең үшін салыстырмалы түрде төмен температура және қожды үнемі жаңарту қажет болса, ал екіншісі үшін жоғары температура және металды тазартуға, қоспалау үшін ферроқорытпалардың күюін азайтуға мүмкіндік беретін және алынатын болаттың физика-химиялық және механикалық қасиеттеріне ең аз зиянды әсер ететін қож қажет. Бұл тәсіл алынатын металдың сапасын арттыруға, металды өңдеу уақыты мен шығындарын азайтуға, агрегаттардың жұмысының жөндеуаралық кезеңдерін арттыруға, агрегаттардың әрқайсысында технологияны оңайлатуға, шикіқұрамды тиеуден бастап металды құю мен прокаттауға дейінгі агрегаттардың ең аз бос тұру кезеңдерімен металды өңдеудің технологиялық тізбегін құруға мүмкіндік береді [1, 228 б.].

Металды өңдеудің әрбір кезеңінде өз міндеттері қойылатындықтан, олардың әрқайсысында түзілетін қожға қойылатын талаптар да әртүрлі, бұл металды пештен тыс өңдеудің қож режимдерінің қатты ерекшеленуіне әкеледі. Пештен тыс өңдеу қождары, көбінесе, суыған кезде үгітіліп, осы қождар сіңген отқа төзімді қабатты бұзады [2, 26 б.].

Қазіргі уақытта металлургия өнеркәсібінде қождар мен басқа да өндіріс қалдықтарын жинақтауға байланысты мәселелер шиеленісе түсті. Бұл ретте мәселенің ауқымдылығы сондай, бірқатар жағдайларда ол ағымдағы өндіріс қалдықтары алуы тиіс кеңістіктің жетіспеушілігі салдарынан кәсіпорындардың одан әрі даму мүмкіндіктерін шектейді [3, 70 б.].

Бұл зерттеуде ШПА-да металды өңдеу кезінде құрамында Al_2O_3 бар отқа төзімді материалдардың қалдықтары негізіндегі флюс түзетін қоспаны енгізу арқылы тазартушы қождарды химиялық тұрақтандыру нұсқалары қарастырылған.

Зерттеліп отырған материалдың басты ерекшелігі – ол тазартушы қождардың тұрақтылығын қамтамасыз етіп, болат қорыту процесінің экономикалық тиімділігін арттырады. Сонымен қатар, ол дәстүрлі балқытқыш шпаттың (CaF2) тиімді баламасы ретінде қарастырылады. Металлургияда қожды сұйылту үшін флюоритті (балқытқыш шпатты) қолдану кең таралғанымен [4;5;6;7;8], бұл әдістің технологиялық және экологиялық кемшіліктері жетерлік:

Отандық кен орындарының сарқылуына байланысты балқытқыш шпат қымбат әрі тапшы шикізатқа айналды;

шөміштегі өңдеу процесінде фторидтердің булануы қоршаған ортаға зиянды әсерін тигізеді;

CaF_2 шөміштің отқа төзімді қаптамасының қызмет ету мерзімін қысқартады. Оның сұйылтқыш әсері уақытша ғана: фтор қосылыстары буланған соң, қождың аққыштығы мен гомогенділігі қайтадан нашарлайды;

Құрамында фтор мөлшері жоғары қождар сутегін өткізгіш келеді, бұл болаттың сапалық көрсеткіштеріне теріс әсер етеді.

Зерттеудің мақсаты тазартушы қождарды тұрақтандыруға, балқытқыш шпатты пайдалануды болдырмауға, болаттың тұтынушылық қасиеттерін жақсартуға, болат өндірісінің экологиялылығын арттыруға мүмкіндік беретін, пештен тыс өңдеу агрегатында болатты өңдеу кезінде құрамында Al_2O_3 бар отқа төзімді материалдардың қалдықтары негізіндегі флюс түзетін қоспаның химиялық құрамы мен қолдану технологиясын әзірлеу болып табылады.

Материалдар мен әдістер

Пештен тыс өңдеу агрегаттарында флюс түзетін қоспаны пайдалану мүмкіндігін зерттеу үшін бірқатар металлургиялық кәсіпорындардың қож үлгілері талданды. «Кастинг» ЖШС ПФ (Павлодар қ., Қазақстан) және «KSP Steel» ЖШС ПФ (Павлодар қ., Қазақстан) кәсіпорындарының қождары талданды. 1 және 2-кестелерде зерттелген қождардың химиялық құрамдары ұсынылған.

Зерттеу жұмысында іріктелген қождардың қасиеттерін талдау полимерлік модельді қолдану арқылы есептеу жолымен жүзеге асырылды. Ең алдымен, жүйедегі гетерогенділік мәселесі қаралды: металды өңдеу температурасында кейбір оксидтердің белсенділігі қанығу деңгейінен асып кетсе, олар артық фаза ретінде бөлінеді.

1-кесте – «KSP Steel» ЖШС ПФ ШПА қождарының химиялық құрамы, %

Үлгі №	$Fe_ж$	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO
1	0,9	25,2	2,3	55,9	4,9	1,6
2	0,8	28,5	2,2	55,4	4,7	1,5
3	1,3	25,1	2,3	55,6	4,5	2,6
4	0,8	24,0	2,1	55,0	5,1	1,4
5	0,9	24,3	2,2	56,1	4,7	1,6
6	0,9	23,5	2,1	55,0	4,9	1,5

7	0,9	24,0	1,8	57,6	6,6	1,7
8	0,7	23,9	1,8	56,9	6,5	1,5
9	0,8	23,3	1,8	57,7	6,4	1,6
10	0,7	21,3	1,8	56,3	6,9	1,2
11	0,8	21,3	1,7	56,7	6,8	2,7
12	0,7	21,3	1,8	55,3	6,4	1,9

2 кесте – «Кастинг» ЖШС ШПА қождарының химиялық құрамы, %

Үлгі №	$Fe_{об}$	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO
1	1,2	29	0,8	52,2	8,3	1,6
2	0,9	28,5	0,8	52,4	7,9	1,6
3	1,0	28,8	0,9	52,9	8,2	1,65
4	1,2	28,8	0,8	53,6	8,2	1,63
5	0,9	28,5	0,7	52,2	10,3	2,0
6	0,7	28,6	0,7	52,8	9,7	1,7
7	0,2	29,6	0,8	54,2	9,4	1,5
8	0,7	28,3	1,0	53,9	9,0	1,7
9	0,5	27,1	0,9	53,7	8,7	1,7

Мұндай қатты қоспалар қождың аққыштығын нашарлатады және тазарту процесіне пайдасыз болып саналады. Артық фазаларды алып тастау арқылы қождың белсенді сұйық негізінің құрамы анықталды. Осының нәтижесінде қождың күкіртті жою, ферроқорытпаларды сақтау және «қож-металл» шекарасындағы керілу сияқты маңызды көрсеткіштерін дәл бағалауға қол жеткізілді. Теориялық есептеулерді тексеру үшін Штенгельмейер вискозиметрінде нақты эксперименттер жасалып, қосымша рентгенфазалық зерттеу әдістері тартылды.

Нәтижелер және талқылау

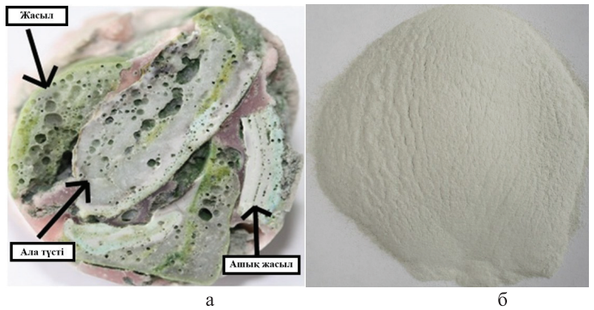
Технологиялық процестің әр түрлі сатыларында, атап айтқанда ШПА-дағы өңдеу соңында және вакуумдау процесінен кейін алынған қож үлгілерінің фазалық құрамы 3 кестеге енгізілді.

Бұл деректер металды өңдеудің екі кезеңін қамтиды. Агрегатта (ШПА) өңделгеннен кейінгі қождың макроқұрылымы мен сыртқы бейнесі 1 суретте назарға ұсынылған.

3-кесте – Металды пештен тыс өңдеудегі қож сынамаларының фазалық құрамдары, %

Сынама № және сипаттамасы		Жасыл түсті № 1 сынама	Ашық жасыл түсті № 1 сынама	Ала түсті № 1 сынама	Орта № 1 сынама	№ 2 сынама
Анықталған фазалар	$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$		29,81	24,68	21,39	30,89
	β-Ca_2SiO_4	80,04	38,92	47,42	45,15	4,98
	γ-Ca_2SiO_4		11,82	8,84	16,10	39,66
	Ca_3SiO_5	19,96	13,22	13,94	9,03	16,75
	CaF_2		3,49	2,77	5,27	3,86
	MgO		2,74	2,35	3,06	3,86

Зерттеу деректері тазартушы қождардың фазалық құрамы мен морфологиясы бойынша айтарлықтай гетерогенді (біркелкі емес) екенін айғақтайды. Бұл біркелкісіздік ШПА жағдайындағы металды өңдеу кинетикасына және реакциялық көлемдегі материалдардың таралу жылдамдығына теріс ықпал етуі мүмкін. Сонымен қатар, фазалық құрамның күрделілігі өздігінен үгітілетін қождарды кәдеге жарату мәселесінде тек бір тәсілді қолдануға мүмкіндік бермейді, себебі бұл жағдайда нәтиженің тұрақтылығына кепілдік жоқ. Сондықтан, екі немесе одан да көп технологияны біріктіретін кешенді тұрақтандыру әдісі анағұрлым тиімді болып табылады.



а б

а – бұзылмаған қож кесектерінің сыртқы түрі;
б – бұзылған қождың сыртқы түрі.
1-сурет – ШПА-да өңдеуден кейінгі қождардың сыртқы түрі

4-кестеде тұтқырлықты есептеу және зертханалық өлшеу нәтижелерінің салыстырмалы талдауы келтірілген. Зерттеу нысаны ретінде алынған өнеркәсіптік қождар тазартушы қождардың барлық спектрін қамтиды, ал тәжірибелік үлгілер балқыту процесінде қатты фазаның әртүрлі концентрациясын имитациялау мақсатында арнайы синтезделді.

Әртүрлі кәсіпорындардың өнеркәсіптік тазартушы қождарының құрамдары мен технологиялық қасиеттеріне жүргізілген талдау пештен тыс өңдеу қождарының химиялық және фазалық құрамдары үлкен шектерде ауытқитынын көрсетті. Көптеген жағдайларда қож режимі түзілетін қож кальций және магний оксидтерімен аса қанығатындай етіп ұйымдастырылған, бұл қож түзетін материалдардың артық шығынына және қою гетерогенді қождың түзілуіне әкеледі, өйткені металды зиянды қоспалардан тазарту процесіне қождың тек сұйық фазасы ғана қатысады. Қождағы қатты бөлшектер балласт болып табылады, өйткені бұл материал агрегатқа енгізілгенімен, оған жүктелген металды өңдеу міндетін орындамайды [9, 101 б.].

4-кесте – Өнеркәсіптік және тәжірибелік қождардың тұтқырлығы мен гетерогенділігі, Па · с

Қож түрі	Өнеркәсіптік қождар				Тәжірибелік қождар		
Химиялық құрамы	1	2	3	4	5	6	7
$Al_2O_{3,\%}$	6,86	14,64	20,29	22,63	13,96	24,28	23,79
FeO, %	1,12	8,06	0,66	0,15	0,55	0,55	0,48
MnO, %	0,24	3,71	0,36	0,46	0,44	0,45	0,4
MgO, %	8,27	8,89	7,64	4,89	10,33	10,36	8,99
CaO, %	58,07	50,39	52,66	59,07	61,02	51,94	42,59
$SiO_{2,\%}$	24,45	14,32	18,39	12,8	13,71	12,42	23,75
Гетерогендікті ескерусіз есептік тұтқырлық	0,051	0,077	0,145	0,157	0,13	0,23	0,23
Гетерогендікті ескеретін есептік тұтқырлық	0,06	0,112	0,145	0,235	0,47	0,36	0,23
Өлшенген тұтқырлық	0,093	0,196	0,228	0,382	0,777	0,51	0,345
Қатты фаза мөлшері, %	3,5	8,89	0	8,8	27	9,6	0
Қыздыру температурасы, °С	1580	1600	1550	1600	1580	1620	1570

Қоршаған ортаға тигізетін зияны тұрғысынан қарасақ, байыту фабрикаларының ұсақ дисперсті қалдықтары мен қож балқытудан түсетін шаңдар ең қауіпті санатына жатады. Дегенмен, парадоксальды түрде, олардың дәл осы ұнтақ құрылымы кешенді флюстерді өндіруде үлкен артықшылық береді: оларды басқа қоспалармен біртекті араластыру және қолдануға ыңғайлы брикеттер түрінде қалыптау технологиялық тұрғыдан тиімді.

Шөміштегі металды өңдеу технологиясына сәйкес, қолданылатын флюс түйіршіктерінің оңтайлы диаметрі 20–30 мм аралығында болуы шарт. Зерттеулер көрсеткендей, бұдан ірі кесектер балқымада баяу ериді, ал тым ұсақ фракциялар тасымалдау кезінде шаңға айналып, материалдық шығынды арттырады [10]. Дайын флюстің химиялық компоненттері 5-кестеде нақтыланған.

5-кесте – Флюс қоспасының құрамы

Компоненттердің массалық үлесі, %					
CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	FeO
1,9	5,0	76,7	10,0	0,49	0,57

Құрамында Al_2O_3 бар отқа төзімді материалдардың техногендік қалдықтары натрий (Na_2O) және калий (K_2O) оксидтерінің маңызды көзі болып табылады. Зерттеулерге сүйенсек [11], бұл оксидтер бор оксидімен салыстырғанда қождың тұтқырлығын тиімдірек төмендетеді, сонымен қатар күкіртсіздендіру процесін жақсартып, металл емес қоосылыстарды жоюға септігін тигізеді.

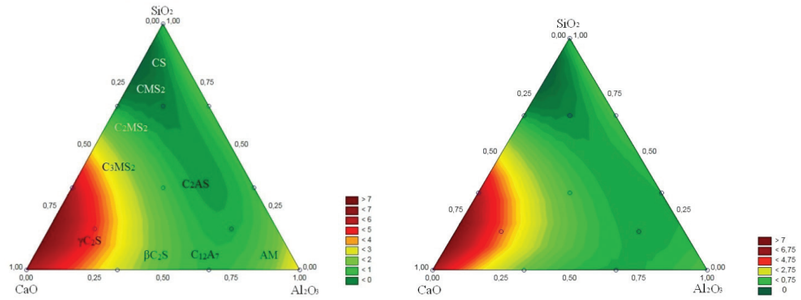
Алайда Na_2O және K_2O көбінесе карбонатты қосылыстар (сода) түрінде кездесетіндіктен, оларды пешке енгізу кезінде диссоциация процесі жүріп, қарқынды шаң түзіледі. Түзілген шаң газдар ағынымен бірге жүйеден шығып кетуі мүмкін. Осы технологиялық шығынды болдырмау үшін сілтілік оксидтерді таза күйінде емес, арнайы дайындалған флюстің құрамында енгізу ұсынылады. Флюс кесектерінің ішіндегі оксидтер шаң күйіне ауысқанымен, реакция аймағынан ұшып кете алмайды. Зерттеу объектісі болған қождардың химиялық құрамы 6 кестеде келтірілген.

6-кесте – Зерттелген қождардың химиялық құрамдары

Үлгі №	Компонент, %			Оксид мөлшері, %				
	Негізгі қож	SiO_2	Ағын-Қалыпта стырушы қоспа	CaO	Al_2O_3	MnO	MgO	SiO_2
1	66,67	26,67	6,67	46,87	7,83	0,32	7,56	37,03
2	60,00	26,67	13,33	42,33	12,99	0,33	7,58	36,38
3	86,67	13,33	0,00	60,75	3,16	0,37	8,92	26,34
4	73,33	26,67	0,00	51,40	2,67	0,31	7,55	37,67
5	73,33	13,33	13,33	51,67	13,47	0,38	8,95	25,04
6	73,33	13,33	13,33	51,67	13,47	0,38	8,95	25,04
7	60,00	40,00	0,00	42,06	2,19	0,26	6,17	49,00

8	86,67	6,67	6,67	60,89	8,56	0,41	9,62	20,03
9	86,67	0,00	13,33	61,02	13,96	0,44	10,33	13,71
10	73,33	0,00	26,67	51,94	24,28	0,45	10,36	12,42
11	60,00	0,00	40,00	42,86	34,59	0,46	10,40	11,12
12	100,00	0,00	0,00	65,42	3,43	0,40	9,59	14,01
13	60,00	13,33	26,67	42,59	23,79	0,40	8,99	23,75
14	66,67	6,67	26,67	47,27	24,04	0,42	9,68	18,09

Күкіртсіздендіру қасиеттері келесі қатынас бойынша анықталатын Маннесманн индексінің (2 сурет) көмегімен бағаланды: $(CaO/SiO_2)/Al_2O_3$.



а – 1500°С кезінде б – 1550°С кезінде.

2 сурет – Эксперименттік қождардың рентгенфазалық талдау нәтижелері және олардың тұтқырлығы (Па · с)

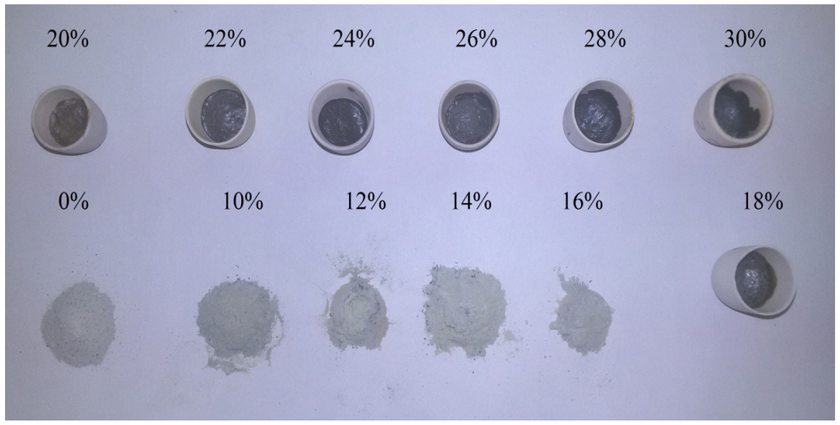
Жоғарыдағы тәуелділіктер металлургиялық көрсеткіштердің тұрақсыздығын көрсетеді. Химиялық талаптарға сәйкес, кремний оксидін қосу технологиялық процеске зиян келтіреді деп танылды.

Ал Al_2O_3 мөлшері көп қоспаларды енгізу, керісінше, оң нәтиже береді. Ол қождың тазарту қасиетіне нұқсан келтірместен, оны сұйылтады және металл емес қосылыстардың бөлінуіне жағдай жасайтын фазааралық керілуді арттырады. Сонымен бірге, бұл әдіс экологиялық және технологиялық маңызды мәселені шешеді – қождың қатаю кезіндегі үгітілуінің алдын алып, оны тұрақтандырады.

Осылайша, тазартушы қождардың құрамын реттеу үшін құрамында жоғары Al2O3 бар кешенді қоспаны пайдалану қождың металлургиялық сипаттамалары тұрғысынан өте перспективалы.

Қожға құрамында Al_2O_3 бар отқа төзімді материалдардың қалдықтары негізіндегі 10,0 % қоспаны енгізген кезде қождағы тұрақсыз -$2CaO{\cdot}SiO_2$ модификациясының мөлшері 3 еседен астамға азаяды (бастапқы қождағы 24,6 %-дан құрамында 10 % қоспа бар қождағы 7,2 %-ға дейін). Қождағы қоспа мөлшерін 10,0 %-дан 30,0 %-ға дейін одан әрі арттырған кезде, қождағы $2CaO{\cdot}SiO_2$ мөлшері азаяды. Модельдік қождағы құрамында Al_2O_3 бар отқа төзімді материалдардың қалдықтары негізіндегі қоспа мөлшерін арттырған кезде, қождағы

$12CaO_7Al_2O_3$ қосылысының мөлшері бірқалыпты артады. 3-суретте келтірілген деректер бойынша, модельдік қождағы қоспа мөлшері 16 %-дан асқанда қож тұрақты болатыны көрінеді.



3-сурет – Термиялық өңдеуден кейінгі модельдік қожы бар тигельдердің жалпы көрінісі

Сынақ нәтижелері бойынша, модельдік қожға отқа төзімді материалдардың қалдықтары негізіндегі флюс түзетін қоспаны енгізген кезде ол тұрақталады деген қорытынды жасауға болады.

Сынақтар 20Г, 09Г2С, Т-1В маркалы болаттарды балқыту кезінде жүргізілді. Металды өңдеу штаттық технология бойынша жүргізілді, тек балқытқыш шпаттың орнына ішінара сыналатын флюс түзетін қоспа салынды.

7-кесте – Штаттық технология бойынша және тәжірибелік материалды қолдану арқылы металды күкіртсіздендіру

Балқыма	Өңдеу басталғанға дейінгі S, %	Өңдеуден кейінгі S, %	Өңдеу уақыты, мин.	Күкіртсіздендірудің орташа жылдамдығы, %/мин.
Болат 20Г				
Тәжірибелік	0,0529	0,0110	42,8	0,0010
Штаттық	0,0564	0,0099	43,4	0,0011
Отклонение	-0,0035	0,0011	-0,63	0,0001
Болат Т1-В				
Тәжірибелік	0,0477	0,0086	51,7	0,0008
Штатные	0,0559	0,0099	53,0	0,0009
Ауытқу	-0,0081	-0,0013	-1,33	0,0001

Болатты пештен тыс өңдеу кезінде қоспаны қолдану балқытқыш шпат шығынын 2,5 кг/т-ға азайтуға мүмкіндік берді. Өндіріс құнының негізгі үнемделуі алюминий концентратының шығынын азайту есебінен алынады.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің AP26198363 «Өндірістің тұйық циклі жағдайында кешенді металлургиялық қайта бөлу кезеңінде болат пен ферроқорытпалардың тұтынушылық қасиеттерін арттыру» жобасы аясында қаржыландырылды.

Қорытынды

Әртүрлі кәсіпорындардың өнеркәсіптік тазартушы қождарының құрамдары мен технологиялық қасиеттеріне талдау жүргізілді, ол пештен тыс өңдеу қождарының химиялық және фазалық құрамдары үлкен шектерде ауытқитынын, сондай-ақ көптеген жағдайларда қалыптасқан қождар гетерогенді және тұрақсыз болып келеді, бұл металды сапалы өңдеуге және күкіртсіздендіру процесінің тұрақтылығына кері әсерін тигізеді.

Құрамында Al_2O_3 бар отқа төзімді материалдардың қалдықтары негізінде флюс түзетін қоспаның құрамы мен қолдану технологиясы әзірленді. Бұл материал тазартушы қождарды тұрақтандыруға, тапшы және қымбат тұратын балқытқыш шпатты (CaF_2) алмастыруға, сондай-ақ болат өндірісінің экологиялылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Термодинамикалық есептеулер мен эксперименттік зерттеулер нәтижесінде, шөміш-пеш агрегатында металды өңдеу технологиясы үшін қождағы Al_2O_3 мөлшері 30 %-дан аспауы тиіс екендігі анықталды. Бұл концентрация шегі қождың қажетті сұйыққозғалғыштығын және тазарту қасиеттерін қамтамасыз етеді.

Өндірістік сынақтар жаңа қоспаны қолданудың тиімділігін растады: болаттың сапалық көрсеткіштері жақсарды (металл емес қосылыстар азайды), балқытқыш шпаттың шығыны төмендеді және өндіріс қалдықтарын кәдеге жарату мәселесі шешімін тапты.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Дюдкин Д. А.** Производство стали. Том 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки: монография / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко [Текст]. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.

2 **Шахпазов, Е. Х., Зайцев, А. И.** Современные тенденции развития металлургической технологии для обеспечения требований к уровню и стабильности свойств, эксплуатационной надежности стали [Текст]. – Труды научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – С. 26–31.

3 **Ровнушкин, В. А., Смирнов, Л. А.** Состояние и задачи развития электросталеплавильного производства [Текст]. – Труды научно-технической

конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – С. 70–77.

4 **Быков, П.О., Бегалиев, Р.А., Куандыков А.Б., Суюндиков, М.М., Сименс Э.** Исследование влияния технологических факторов при выплавке низколегированной стали на стойкость к водородному растрескиванию [Текст] // Научный журнал «Наука и техника Казахстана». – 2024. – № 4. – С. 229–244. – https://doi.org/10.48081/RXIH6581

5 **Бегалиев Р. А., Шабенов К. К.** Улучшение макроструктуры стальных трубных непрерывнолитых заготовок [Текст] // Научный журнал «Наука и техника Казахстана». – 2022. – № 3. – С. 86–95. – https://doi.org/10.48081/UOZH2182

6 **Almeida R. A. M. et al.** MgO Saturation Analisys of CaO-SiO_2-FeO-MgO-Al_2O_3 Slag System [Текст] //Materials Research. – 2018. – Т. 21. – С. e20170041. – https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0041

7 **Jiao K. X. et al.** Thermodynamic properties and viscosities of CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3 slags [Текст] //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2019. – Т. 50. – №. 2. – С. 1012–1022. – https://doi.org/10.1007/s11663-018-1490-6

8 **Милейковский, А. Б., Малахов, Н. В.** Разработка технологии внепечной обработки низколегированных трубных сталей повышенной коррозионной стойкости [Текст]. – Труды научно–технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – С. 130–138.

9 **Borin, D., Odenbach, S.** Viscosity of liquid metal suspensions — experimental approaches and open issues. [Текст] // The European Physical Journal Special Topics. – 2013. – Т. 220. – №. 1. – С. 101–110. – https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01800-9

10 **Ayyandurai A.** Development of synthetic slag for desulphurisation of the steel during steelmaking in induction furnace[Текст] //Advances in Materials and Processing Technologies. – 2022. – Т. 8. – №. 2. – P. 2022–2038. – https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1878729

11 **Chandel S. S., Singh P. K., Randhawa N. S.** Enhancing recycling potential: Thermodynamic and non-isothermal kinetics of solid state carbothermic reduction of electric arc furnace slag [Текст]//Thermal Science and Engineering Progress. – 2025. – С. 103941. – https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103941

REFERENCES

1 **Dyudkin D. A.** Proizvodstvo stali. Tom 1. Processy` vy`plavki, vnepechnoj obrabotki i neprery`vnoj razlivki: monografiya / D. A. Dyudkin, V. V. Kisilenko [Steel production. Volume 1. The processes of smelting, furnace treatment and continuous casting][Text]. – M. : Teplotehnik, 2008. – 528 p.

2 **Shaxpazov, E. X., Zajcev, A. I**. Sovremenny`e tendencii razvitiya metallurgicheskoj texnologii dlya obespecheniya trebovanij k urovnyu i stabil`nosti svojstv, e`kspluatacionnoj nadezhnosti stali [Current trends in the development of metallurgical technology to meet the requirements for the level and stability of properties, operational reliability of steel] [Text]. – Trudy` nauchno-texnicheskoj konferencii «Problemy` i perspektivy` razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol`zovaniem zavershenny`x fundamental`ny`x issledovanij i NIOKR». – Ekaterinburg: UrO RAN, 2011. – P. 26–31.

3 **Rovnushkin, V. A., Smirnov, L. A.** Sostoyanie i zadachi razvitiya e`lektrostaleplavil`nogo proizvodstva [The state and objectives of the development of electric steelmaking] [Text]. – Trudy` nauchno-texnicheskoj konferencii «Problemy` i perspektivy` razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol`zovaniem zavershenny`x fundamental`ny`x issledovanij i NIOKR». – Ekaterinburg : UrO RAN, 2011. – P. 70–77.

4 **Bykov, P. O., Begaliev, R. A., Kuandykov A. B., Suyundikov, M. M., Simens E`.** Issledovanie vliyaniya texnologicheskix faktorov pri vy`plavke nizkolegirovannoj stali na stojkost` k vodorodnomu rastreskivaniyu [Investigation of the influence of technological factors in the smelting of low-alloy steel on resistance to hydrogen cracking] [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2024. – № 4. – P. 229 – 244. – https://doi.org/10.48081/RXIH6581

5 **Begaliev R. A., Shabenov K. K.** Uluchshenie makrostruktury` stal`ny`x trubny`x neprery`vnolity`x zagotovok [Improvement of the steel pipe continuous cast blanks macrostructure] [Text] // Science and technology of Kazakhstan. – 2022. – № 3. – P. 86–95. – https://doi.org/10.48081/UOZH2182

6 **Almeida R. A. M. et al.** MgO Saturation Analisys of CaO-SiO_2-FeO-MgO-Al_2O_3 Slag System [Текст] //Materials Research. – 2018. – Т. 21. – С. e20170041. – https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0041

7 **Jiao K. X. et al.** Thermodynamic properties and viscosities of CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3 slags [Текст] //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2019. – Т. 50. – №. 2. – С. 1012–1022. – https://doi.org/10.1007/s11663-018-1490-6

8 **Milejkovskij, A. B., Malaxov, N. V.** Razrabotka texnologii vnepechnoj obrabotki nizkolegirovanny`x trubny`x stalej povy`shennoj korrozionnoj stojkosti [Development of technology for out-furnace treatment of low-alloy tubular steels with increased corrosion resistance] [Text]. – Trudy` nauchno–texnicheskoj konferencii «Problemy` i perspektivy` razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol`zovaniem zavershenny`x fundamental`ny`x issledovanij i NIOKR». – Ekaterinburg : UrO RAN, 2011. – P. 130–138.

9 **Borin, D., Odenbach, S.** Viscosity of liquid metal suspensions — experimental approaches and open issues. [Text]// The European Physical Journal Special Topics. – 2013. – vol. 220. – №. 1. – P. 101–110. – https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01800-9

10 **Ayyandurai A.** Development of synthetic slag for desulphurisation of the steel during steelmaking in induction furnace [Text]//Advances in Materials and Processing Technologies. – 2022. – Vol. 8. – № 2. – P. 2022–2038. – https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1878729

11 **Chandel S. S., Singh P. K., Randhawa N. S.** Enhancing recycling potential: Thermodynamic and non-isothermal kinetics of solid state carbothermic reduction of electric arc furnace slag [Text] // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025. – P. 103941. – https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103941

19.01.26 ж. баспаға түсті.
01.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
20.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. В. Богомолов[1], С. С. Спанов[2], Р. А. Бегалиев[3],
П. О. Быков[4], А. А. Каменов[5]
[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
Поступило в редакцию 19.01.26.
Поступило с исправлениями 01.05.26.
Принято в печать 20.02.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ СВОЙСТВ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВА

Представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований по совершенствованию технологического процесса получения низколегированных сталей с повышенным уровнем эксплуатационных свойств и экологичностью производства.

Повышенный уровень потребительских свойств был достигнут за счет снижения неметаллических включений в стали при внепечной обработке металла. Экологичность производства обеспечивалась за счет использования флюсообразующей добавки на основе отходов огнеупорных материалов с содержанием Al_2O_3. Данный материал позволил стабилизировать рафинировочные шлаки, снизить затраты на производство стали, а также стал заменителем плавикового шпата (CaF_2).

Для исследования возможности использования флюсообразующей добавки на агрегатах внепечной обработки были проанализированы образцы шлаков ряда металлургических предприятий. Пробы отбирались по ходу процесса обработки металла на агрегате ковш-печь. Оценка рафинировочных и физико-химических свойств образцов отобранных шлаков проводилась расчётным путём с использованием полимерной модели строения шлаков.

Подтверждена возможность стабилизации рафинировочных шлаков с помощью добавки на основе отходов огнеупорных материалов с содержанием Al_2O_3. Показано, что ввод в шлаки Al_2O_3, позволяющий работать на высокоосновных шлаках, улучшает поверхностные свойства шлаков, повышая стойкость огнеупоров, снижая потери металла в виде корольков и количество неметаллических включений.

С использованием экспериментальных данных, представленных в литературе, а также термодинамических расчётов определено, что максимально допустимое с точки зрения технологии обработки металла на агрегате ковш-печь содержание Al_2O_3 в шлаке не более 30 % Al_2O_3.

Результаты экспериментов по стабилизации модельного шлака исследуемой добавкой показали, что в этом случае реализуется в основном химический способ стабилизации.

Ключевые слова: сталь, внечпечная обработка, шлак, агрегат ковш-печь, фаза, флюс.

A. V. Bogomolov[1], S. S. Spanov[2], R. A. Begaliev[3],
P. O. Bykov[4], A. A. Kamenov[5]
[1,2,3,4,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 19.01.26.
Received in revised form 01.02.26.
Accepted for publication 20.02.26.

RESEARCH ON THE PRODUCTION OF LOW-ALLOY STEELS WITH ENHANCED PROPERTIES AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY

The results of modeling and experimental studies focused on improving the technological process for producing low-alloy steels with an enhanced level of performance properties and environmental sustainability are presented.

An increased level of consumer properties was achieved by reducing non-metallic inclusions in the steel during secondary metallurgy (out-of-furnace treatment). Environmental sustainability was ensured through the use of a flux-forming additive based on waste refractory materials containing Al_2O_3. This material enabled the stabilization of refining slags, reduced steel production costs, and served as a substitute for fluorspar CaF_2.

To investigate the feasibility of using this flux-forming additive in secondary treatment units, slag samples from several metallurgical enterprises were analyzed. Samples were taken during the metal processing stages in the ladle furnace (LF) unit. The refining and physicochemical properties of the selected slag samples were evaluated through calculations using a polymer model of slag structure.

The possibility of stabilizing refining slags using an Al_2O_3-based additive derived from refractory waste has been confirmed. It is shown that the introduction of Al_2O_3 into the slags–allowing for operations with highly basic slags–improves the surface properties of the slags, increases refractory lining durability, and reduces metal losses in the form of droplets (beads) as well as the quantity of non-metallic inclusions.

Using experimental data from literature and thermodynamic calculations, it was determined that the maximum permissible Al_2O_3 content in the slag, from the perspective of ladle furnace processing technology, is no more than 30 %.

The results of experiments on stabilizing model slag with the studied additive showed that, in this case, a primarily chemical stabilization method is implemented.

Keywords: steel, secondary metallurgy, slag, ladle furnace (LF), phase, flux.

МРНТИ 53.31.21

https://doi.org/10.48081/BGQF1922

К. К. Досжанов[1], О. Р. Сариев[2], Е .Э. Абдулабеков[3], Б. С. Келаманов[4], *А. М. Әбдірашит[5]

[1,2,4,5]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республика Казахстан, г. Актобе;

[3]Актюбинский завод ферросплавов – филиал АО «ТНК «Казхром», Республика Казахстан, г. Актобе

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3625-9423

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0745-848X

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8878-7021

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7646-9153

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0718-3041

*e-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com

АПРОБАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СТАБИЛИЗАЦИИ ШЛАКОВ ФЕРРОХРОМА ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

В статье представлены результаты успешной промышленной апробации экологически безопасной технологии стабилизации шлаков рафинированного феррохрома, направленной на решение актуальной проблемы их самопроизвольного распада. Данное явление, обусловленное полиморфным превращением β-2CaO · SiO$_2$ в γ-2CaO · SiO$_2$, приводит к превращению шлака в пылевидный порошок, что исключает его дальнейшее использование и создает серьезные экологические риски. В отличие от традиционного химического метода стабилизации борсодержащими материалами, который обеспечивает лишь метастабильное состояние шлака, авторами предложен принципиально иной физико-химический подход. Ключевая идея технологии заключается в регулировании основности шлака (соотношения CaO/SiO$_2$) путем введения в расплав добавки – керамзита, что позволяет сместить фазовый состав в термодинамически устойчивую область, где образование нестабильного двухкальциевого силиката исключено.

В работе детально описаны теоретическое обоснование метода, включая расчеты равновесных фазовых составов, этапы лабораторных исследований и полномасштабные промышленные испытания. Наибольшую технологическую эффективность продемонстрировал способ внепечной обработки, заключающийся в подаче керамзита через труботечку непосредственно в струю жидкого шлака при выпуске из печи. Этот метод обеспечивает интенсивное перемешивание и быстрое растворение добавки (за 3–5 минут) без негативного воздействия на восстановительные процессы в печи.

Внедренная технология позволяет получать стабильный, не склонный к распаду кусковой продукт с основностью ниже 1, 4, пригодный для коммерческого использования в строительной индустрии в качестве заполнителя. Таким образом, технология не только решает серьезную экологическую проблему утилизации техногенных отходов, но и приносит экономический эффект, трансформируя отходы в товарную продукцию, способствуя созданию замкнутого производственного цикла на предприятиях ферросплавной отрасли.

Ключевые слова: шлак феррохрома, стабилизация, распад шлака, основность, керамзит, двухкальциевый силикат, химическая стабилизация бором.

Введение

Актюбинский завод ферросплавов, как и многие другие предприятия ферросплавной отрасли, длительное время сталкивался с серьезной технологической и экологической проблемой – самопроизвольным распадом шлаков рафинированного феррохрома в порошок после их охлаждения [1;2]. Данное явление, известное в литературе как «рассыпание шлака», связано с полиморфным превращением β-2CaO · SiO$_2$ в γ-2CaO · SiO$_2$, сопровождающимся увеличением объема примерно на 10 % [3; 4].

Этот процесс не только создавал значительные экологические проблемы в виде пыления на шлакоотвалах [5], но и полностью исключал возможность использования шлаков в качестве строительного материала, в частности, щебня для ответственных конструкций [6]. Накопление больших объемов неустойчивых шлаков представляло собой серьезную проблему для предприятия и требовало поиска эффективных решений.

Традиционным решением данной проблемы являлась химическая стабилизация с помощью борсодержащих материалов, в частности минерала колеманита [7; 8]. Механизм этого метода основан на способности бора стабилизировать высокотемпературные модификации силикатов кальция. Однако, как показали исследования [9; 10], этот метод имеет фундаментальный недостаток: он переводит шлак в метастабильное состояние, что не гарантирует его долговременной стабильности.

Метастабильность борстабилизированных шлаков создает потенциальные риски при их использовании в ответственных строительных конструкциях (здания, мосты, дороги), поскольку невозможно точно прогнозировать, когда будет достигнуто критическое состояние и начнется разрушение материала [11]. Кроме того, наличие водорастворимых соединений бора в шлаках может создавать дополнительные экологические проблемы [12].

В связи с указанными недостатками борной стабилизации возникла необходимость в поиске принципиально новой, надежной и экологически безопасной альтернативы. Перспективным направлением представлялась разработка технологии, основанной на регулировании фазового состава шлаков через управление их химическим составом, в частности, основностью (CaO/SiO$_2$) [13; 14].

Данная статья представляет результаты комплексных исследований, включающих теоретическое обоснование, лабораторные и промышленные испытания технологии стабилизации шлаков рафинированного феррохрома путем регулирования их основности. Работа демонстрирует полный цикл разработки – от фундаментальных исследований до успешной промышленной реализации технологии, обеспечивающей получение термодинамически стабильного продукта, пригодного для использования в строительной индустрии.

Материалы и методы

Фундаментальной причиной самопроизвольного распада шлаков рафинированного феррохрома является полиморфное превращение β-модификации двухкальциевого силиката ($2CaO \cdot SiO_2$, C_2S) в γ-модификацию при охлаждении ниже 675°C. Этот фазовый переход сопровождается увеличением удельного объема примерно на 10 %, что вызывает внутренние напряжения, приводящие к разрушению структуры шлака и его распаду в порошок [15]. Следовательно, ключевым условием стабилизации шлака является полное исключение или минимизация содержания C_2S в его фазовом составе.

Для определения термодинамически устойчивых фазовых составов в зависимости от химического состава шлака были проведены расчеты равновесного фазового состава шестикомпонентной системы Cr_2O_3-SiO_2-Al_2O_3-FeO-CaO-MgO, максимально приближенной к реальным шлакам производства рафинированного феррохрома [16]. Расчеты выполнялись с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного в ХМИ им. Ж. Абишева, и проводились с прямой привязкой к величине основности ($B = CaO/SiO_2$).

Результаты расчетов выявили две принципиально различные области составов, в которых образование C_2S термодинамически невозможно:

Область низких основностей (B<1,4). В этой области равновесный фазовый состав характеризуется присутствием таких минеральных фаз, как монтичеллит ($CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$), окерманит ($2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$), геленит ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$), а также шпинелидов ($MgO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Cr_2O_3$) и мервинита ($3CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$). Данные фазы не подвержены деструктивным полиморфным превращениям при охлаждении.

Область высоких основностей (B>3,2). В этой области доминирующими фазами являются трехкальциевый силикат (3CaO·SiO2, C3S), трехкальциевый алюминат ($3CaO \cdot Al_2O_3$), феррохромит ($FeO \cdot Cr_2O_3$), периклаз (MgO), хромат кальция ($CaO \cdot Cr_2O_3$) и свободный оксид кальция (CaO). Хотя C_2S в равновесии отсутствует, данная область является технологически неприемлемой для ферросплавного производства вследствие чрезвычайно высоких расходов извести и значительного увеличения удельного расхода электроэнергии, необходимых для поддержания высокой температуры плавления таких шлаков.

Таким образом, для практической реализации была выбрана стратегия смещения основности шлака с типичного для производства уровня ~1,9 в область низких основностей (B<1,4).

В рамках лабораторных исследований проводился поиск и апробация эффективных реагентов для снижения основности. Наибольшую эффективность показал керамзит – легкий пористый материал, обладающий высоким содержанием кремнезема ($SiO_2 \approx 65$ %) и глинозема ($Al_2O_3 \approx 20$ %) [17]. Лабораторные эксперименты по плавке модельных шлаковых смесей с добавками керамзита позволили установить следующие закономерности:

– Была подтверждена линейная зависимость между количеством вводимого керамзита и снижением конечной основности шлака. Установлено, что добавка ~15 % керамзита от массы шлака обеспечивает переход основности в целевую область ниже 1, 4, что подтверждено данными рентгенофазового и петрографического анализов, показавших полное исчезновение C_2S [18].

- Проведенные дилатометрические исследования и анализ кривых охлаждения показали, что введение керамзита способствует значительному снижению температуры начала кристаллизации и температуры плавления шлака на 22–287 °C в зависимости от состава [19]. Это приводит к увеличению времени пребывания шлака в жидком состоянии, что, в соответствии с законом Стокса, благоприятствует более полному осаждению взвешенных металлических корольков и, как следствие, снижению потерь хрома со шлаком [20].

Полученные лабораторные данные послужили теоретической и экспериментальной основой для планирования промышленных испытаний.

Результаты и обсуждение

Присадка керамзита в печь. Первоначальные опыты были сосредоточены на присадке керамзита непосредственно в печь перед выпуском металла и шлака. В соответствии с лабораторными рекомендациями, начальная дозировка была принята из расчета 15 % от массы шлака, что составляло 1500 кг на выпуск. Наблюдения за процессом плавки и отбор проб для химического анализа показали двоякий результат. С одной стороны, была экспериментально подтверждена принципиальная возможность стабилизации – шлаки после охлаждения сохраняли монолитную структуру в течение 4 месяцев и более (рисунок 1), не проявляя признаков распада.

А – проба сверху «булки» шлака | Б – проба с середины «булки» шлака | В – п роба снизу «булки» шлака

Рисунок 1 – Стабилизированный шлак с присадкой 1500 кг керамзита в печь после 4 месяцев 18 дней хранения

С другой стороны, был выявлен существенный технологический недостаток: оксиды кремния и алюминия, вносимые с керамзитом, не полностью ассимилировались выпускаемым шлаком. Их накопление в печной ванне приводило к систематическому нарушению восстановительных процессов, что проявлялось в росте содержания оксидов хрома (Cr_2O_3) с 4,97% до 15,0% и железа (FeO) в шлаке, снижении температуры расплава и захолаживании печи. Последующее снижение дозы керамзита до 500 кг и 300 кг на выпуск не позволило полностью нивелировать негативное воздействие на ход плавки, что свидетельствовало о принципиальной ограниченности внутрипечного способа введения модификатора.

Таким образом стабилизация в печи возможна, но негативно влияет на технологический процесс. Требовалось решение, исключающее вмешательство в работу печи.

Присадка керамзита в ковш. Следующим этапом исследований стала отработка технологии внепечной обработки шлака, позволяющей исключить негативное влияние на восстановительные процессы в печи. Первоначальные эксперименты были сосредоточены на методе присадки керамзита на дно сталеразливочного ковша объемом 3 м^3 с последующим выпуском на него жидкого расплава. Испытания проводились с использованием как утяжеленного (насыпная плотность 950–1000 кг/м^3), так и стандартного керамзита (насыпная плотность ~500 кг/м^3) в диапазоне расходов от 500 до 1000 кг на выпуск. Однако, как показали результаты, данный способ не обеспечил необходимой эффективности. Визуальное наблюдение и последующий химический анализ проб шлака выявили отсутствие существенного снижения основности (CaO/SiO_2 оставалась на уровне 1,74–1,93), а при сливе шлака фиксировалось наличие значительного количества нерастворившегося керамзита. Основной причиной неудачи явился недостаточный массообмен между твердыми гранулами флюса и жидким шлаком в условиях ламинарного течения расплава в ковше. Отсутствие активного перемешивания препятствовало полноценной кинетике растворения керамзита, что делало данный метод технологически непригодным.

Для интенсификации процесса гомогенизации расплава была разработана и смонтирована специальная конструкция – труботечка, обеспечивающая подачу керамзита непосредственно в восходящую струю жидкого шлака или металла во время выпуска из печи. Данное техническое решение кардинально изменило ситуацию. При подаче керамзита через труботечку гранулы флюса попадали в зону с максимальной турбулентностью и температурой, что обеспечивало их практически мгновенное растворение и активное перемешивание с расплавом. Временной цикл обработки шлака сократился до 3–5 минут, при этом визуальное наблюдение и данные химического анализа подтвердили полное усвоение керамзита и достижение целевых значений основности (1,15–1,36). Этот метод не только доказал свою высокую технологическую эффективность, но и исключил какое-либо негативное воздействие на ход плавки, что определило его как оптимальный для промышленного внедрения.

Технологический успех: Оптимальное решение. Подача керамзита через труботечку в струю расплава продемонстрировала превосходные результаты по всем ключевым технологическим показателям. Во-первых, была достигнута высокая скорость растворения модификатора: полный цикл обработки шлака в ковше составлял всего 3-5 минут, что соответствовало технологическому ритму работы плавильного цеха и не приводило к простоям оборудования. Во-вторых, что крайне важно, был подтвержден принцип отсутствия негативного влияния на ход печного процесса. Поскольку модификация состава шлака происходила вне печи, в ковше, это полностью исключило нарушение восстановительных процессов в ванне печи, что ранее наблюдалось при внутрипечном способе присадки.

Наиболее значимым результатом стало достижение стабильного качества конечного продукта. Шлак, обработанный по новой технологии, с достигнутой основностью ниже 1,4, демонстрировал надежную стабилизацию и не проявлял признаков распада при длительном хранении. Как показано на рисунке 2, опытные партии шлака, полученные при расходе керамзита 1200 кг на выпуск, сохраняли монолитную структуру после 60 дней хранения, что подтвердило их термодинамическую стабильность.

Рисунок 2 – Стабилизированный шлак, полученный при присадке 1200 кг керамзита через труботечку в ковш (хранение 60 дней)

В результате серии оптимизационных экспериментов было установлено, что для гарантированной стабилизации при максимальном выходе шлака (~10 тонн) оптимальной является доза керамзита 1500 кг на выпуск. Химический анализ многочисленных проб подтвердил, что такая дозировка обеспечивает последовательное и надежное снижение основности до целевых значений 1,2–1,5 (таблица 1), что полностью соответствует теоретически рассчитанной области низких основностей, свободной от двухкальциевого силиката. Данный режим был принят в качестве основного для промышленного внедрения.

Таблица 1 – Химический анализ пробы стабилизированного шлака, %

№ плавки	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO	CaO/ SiO_2
220237	9,6	30,3	35,0	12,3	7,6	2,9	1,20
270191	6,2	31,5	42,8	11,9	6,6	0,8	1,36
270191	7,9	29,5	39,6	12,9	6,6	2,6	1,34
270192	6,8	32,8	37,5	10,6	7,7	2,5	1,15
270237	5,1	29,0	43,6	12,0	6,6	1,4	1,50

Выводы

В результате выполнения комплекса исследовательских и опытно-промышленных работ была не только теоретически обоснована, но и успешно апробирована в реальных производственных условиях принципиально новая технология стабилизации шлаков рафинированного феррохрома. Внедрение данной методики позволяет перевести проблемные техногенные отходы в категорию безопасных и полезных продуктов, обеспечивая тем самым замкнутый производственный цикл.

Проведенные исследования и их практическая реализация позволили сформулировать следующие ключевые выводы:

Надежность и стабильность. Предложенная технология, основанная на регулировании основности шлакового расплава, гарантирует получение конечного продукта, термодинамически стабильного в долгосрочной перспективе. Это является ее фундаментальным преимуществом по сравнению с методом борной стабилизации, который приводит к формированию метастабильных соединений, склонных к деградации с течением времени.

Технологическая эффективность. Разработанный способ присадки стабилизирующей добавки (керамзита) непосредственно в струю шлакового расплава через труботечку доказал свою высокую эффективность. Метод отличается простотой, технологичностью и, что наиболее важно, не оказывает дестабилизирующего влияния на основной процесс выплавки феррохрома, обеспечивая его бесперебойность.

Экономическая целесообразность. Технология позволяет трансформировать отходы, требующие затрат на складирование и утилизацию, в товарную продукцию – строительный щебень. Это не только решает острую экологическую проблему накопления техногенных отходов, но и создает дополнительный источник доходов для предприятия, повышая общую экономическую эффективность производства.

Таким образом, представленное практическое решение является значительным технологическим прорывом в области переработки шлаков ферросплавного производства. Реализация проекта демонстрирует не только научно-техническую состоятельность, но и комплексный синергетический эффект, заключающийся в одновременном достижении экологических, технологических и экономических выгод. Полученные результаты открывают новые перспективы для создания безотходных и ресурсосберегающих производств в черной металлургии.

REFERENCES

1 **Smith J., Johnson A., Brown K.** Environmental aspects of ferroalloy production // Metallurgical Review. – 2020. – Vol. 45. – № 3. – P. 112–129.

2 **Johnson A., Smith J., Williams C., Davis M.** Slag management in ferrous metallurgy // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 235. – P. 1405–1419.

3 **Taylor H.F.W.** Cement chemistry. – 2nd ed. – Academic Press, 1997. – 512 p.

4 **Wang L., Chen X., Tanaka Y., Kim H.** Phase transformations in steelmaking slags // ISIJ International. – 2018. – Vol. 58. – № 9. – P. 1587–1595.

5 Environmental Protection Agency. Guidelines for slag management (EPA Report № 530-R-21-001). – Washington, DC : U. S. Government Printing Office, 2021.

6 ASTM International. Standard specification for concrete aggregates (ASTM C33-22). – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

7 **Zhang G., Li W., Wang Y., Liu S.** Boron stabilization of steel slags // Journal of Hazardous Materials. – 2019. – Vol. 368. – P. 669–677.

8 European Slag Association. Properties and uses of iron and steel slags. – Brussels: EUROSLAG, 2020.

9 **Li Y., Wang K., Schmidt A., Rodriguez D.** Long-term stability of B_2O_3-stabilized slags // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 266. – Article 121015.

10 **Patel R., O'Connor B., Lee S., Fischer J.** Metastable phases in stabilized slags // Materials Characterization. – 2022. – Vol. 183. – Article 111635.

11 Building Research Establishment. Durability of construction materials (BRE Digest 500). – Bracknell : BRE Press, 2023.

12 World Health Organization. Boron in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality (WHO/HEP/ECH/WSH/2021.5). – Geneva : WHO, 2021.

13 **Tossavainen M., Engström F., Yang Q., Larsson M.** Chemical stability of steelmaking slags // Environmental Science & Technology. – 2019. – Vol. 53. – № 14. – P. 8012–8021.

14 **Das B., Prakash S., Reddy P. S., Misra V. N.** An overview of utilization of slag from ferrous industries // Resources, Conservation and Recycling. – 2020. – Vol. 158. – Article 104794.

15 **Regourd M., Thomassin J.H., Touray J.C., Baillif P.** Soundness of steel slags // Proc. 7th Int. Congress on the Chemistry of Cement. – Paris, 1980. – Vol. 3. – P. 134–139.

16 **Jak E., Degterov S., Hayes P. C., Pelton A. D.** Thermodynamic modeling of slag systems // International Journal of Materials Research. – 2007. – Vol. 98. – № 10. – P. 847–854.

17 **Rashid A., Verma N., Khan S., Ostrovski O.** Use of expanded clay as a silicate source in metallurgy // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2020. – Vol. 6. – № 4. – P. 612–625.

18 **Haha M.B., Lothenbach B., Le Saout G., Winnefeld F.** Influence of slag chemistry on phase formation // Advances in Cement Research. – 2019. – Vol. 31. – № 7. – P. 312–325.

19 **Vargas F., Romero-Serrano A., Hall R., Parra R.** Effect of additives on the melting behavior of metallurgical slags // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2021. – Vol. 52. – № 3. – P. 1452–1465.

20 **Swinbourne D. R.** Understanding slag behaviour in submerged arc furnaces // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2014. – Vol. 114, № 8. – P. 651–658.

Поступило в редакцию 18.11.25.
Поступило с исправлениями 18.11.25.
Принято в печать 03.02.26.

К. К. Досжанов[1], О. Р. Сариев[2], Е. Э. Абдулабеков[3],
Б. С. Келаманов[4], *А. М. Әбдірашит[5]
[1,2,4,5]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[3]«Қазхром» ТҰК» АҚ филиалы - Ақтөбе ферроқорытпа зауыты,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.
18.11.25 ж. баспаға түсті.
18.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
03.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫН РЕТТЕУ АРҚЫЛЫ ФЕРРОХРОМ ҚОЖЫНЫҢ ТҰРАҚТАНДЫРУ ҮШІН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗ ТЕХНОЛОГИЯНЫ АПРОБАЦИЯЛАУ

Мақалада тазартылған феррохром қождарын олардың өздігінен ыдырау мәселесін шешуге бағытталған экологиялық қауіпсіз тұрақтандыру технологиясының өнеркәсіптік жағдайда табысты апробациясының нәтижелері ұсынылған. Бұл құбылыс β-2CaO·SiO$_2$ фазасының γ-2CaO·SiO$_2$ полиморфтық түрленуіне байланысты қалыптасады және шлактің ұнтақ күйіне дейін ыдырауына алып келеді, нәтижесінде оны әрі қарай пайдалану мүмкін болмайды және айтарлықтай экологиялық қауіп-қатер туындайды. Дәстүрлі борқұрамды материалдармен жүргізілетін химиялық тұрақтандыру тәсілі шлақты тек метатұрақты күйде ғана ұстай алатын болса, авторлар түбегейлі өзгеше физика-химиялық әдісті ұсынады. Технологияның негізгі идеясы – балқымаға керамзит қоспасын енгізу арқылы шлактің негізділігін (CaO/SiO$_2$ қатынасын) реттеу. Бұл фазалық құрамды термодинамикалық тұрақты аймаққа ауыстырып, тұрақсыз екікальцийлі силикаттың пайда болуына жол бермейді.

Жұмыста әдістің теориялық негіздемесі, соның ішінде тепе-тең фазалық құрамдарды есептеу, зертханалық зерттеулердің кезеңдері және өнеркәсіптік көлемдегі толық масштабты сынақтар жан-жақты сипатталған. Ең жоғары технологиялық тиімділікті керамзитті балқыған қож ағынына пештен шығару кезінде тікелей труботечка арқылы беруге негізделген пештен тыс өңдеу тәсілі көрсетті. Бұл әдіс қоспаның қарқынды араласып, 3–5 минут ішінде тез еруін қамтамасыз етеді және пештегі қалпына келу процестеріне теріс әсер етпейді.

Енгізілген технология негізділігі 1, 4-тен төмен, ыдырамайтын, тұрақты кесек түріндегі өнім алуға мүмкіндік береді. Мұндай өнім құрылыс индустриясында толтырғыш ретінде коммерциялық пайдалануға жарамды. Осылайша, технология техногендік қалдықтарды кәдеге жарату мәселесін шешіп қана қоймай, оларды тауарлы өнімге айналдырып, ферросплав өндірісінде тұйық цикл қалыптастыруға, экологиялық және экономикалық тиімділікке қол жеткізуге жағдай жасайды.

Кілтті сөздер: феррохром қожы, тұрақтандыру, қождың ыдырауы, негізгілік, керамзит, екікальцийлі силикат, бор арқылы химиялық тұрақтандыру.

K. K. Doszhanov[1], O. R. Sariyev[2], E. E. Abdulabekov[3],
B. S. Kelamanov[4], *A. M. Abdirashit[5]
[1,2,4,5]Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[3]Aktobe Ferroalloy Plant – Branch of JSC «TNK Kazchrome»,
Republic of Kazakhstan, Aktobe
Received 18.11.25.
Received in revised form 18.11.25.
Accepted for publication 03.02.26.

APPROBATION OF AN ENVIRONMENTALLY SAFE TECHNOLOGY FOR STABILIZING FERROCHROME SLAGS BY REGULATING THEIR CHEMICAL COMPOSITION

The article presents the results of successful industrial trials of an environmentally safe technology for stabilizing refined ferrochrome slags aimed at solving the urgent problem of their spontaneous disintegration. This phenomenon, caused by the polymorphic transformation of β-2CaO·SiO₂ into γ-2CaO·SiO₂, leads to the conversion of slag into a powdery material, which makes its further use impossible and creates significant environmental risks. Unlike the traditional chemical stabilization method using boron-containing materials, which ensures only a metastable state of the slag, the authors propose a fundamentally different physico-chemical approach. The key idea of the technology is to regulate the basicity of the slag (CaO/SiO₂ ratio) by introducing an additive—expanded clay (keramzite)—into the melt, which shifts

the phase composition into a thermodynamically stable region where the formation of unstable dicalcium silicate is excluded.

The paper provides a detailed description of the theoretical justification of the method, including equilibrium phase composition calculations, as well as the stages of laboratory studies and full-scale industrial trials. The highest technological efficiency was demonstrated by an out-of-furnace treatment method, which involves feeding expanded clay through a tapping tube directly into the stream of liquid slag during tapping from the furnace. This method ensures intensive mixing and rapid dissolution of the additive (within 3–5 minutes) without any adverse impact on the reduction processes occurring inside the furnace.

The implemented technology makes it possible to produce a stable, non-disintegrating lump product with a basicity below 1.4, suitable for commercial use in the construction industry as an aggregate. Thus, the technology not only solves a significant environmental problem related to the utilization of industrial waste but also provides an economic benefit, transforming waste into a marketable product and contributing to the creation of a closed production cycle at ferroalloy plants.

Keywords: ferrochrome slag, stabilization, slag disintegration, basicity, expanded clay, dicalcium silicate, boron chemical stabilization.

SRSTI 53.03.05

https://doi.org/10.48081/BGQF1923

A. Zhunusov[1], *R. Tyulyubayev[2], A. Zhunusova[3], A. Bakirov[4], A. Kenzhebekova[5]

[1,2,3,4,5]Toraighyrov university, Republic of Kazahkstan, Pavlodar;

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

[4]ORCID: https://orcid.org//0000-0002-3742-3467

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

*e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz

STUDY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF PELLETS OBTAINED FROM ALUMINUM SLAG

This paper examines the physicochemical and mineralogical properties of pellets produced from secondary aluminum slags with the addition of silica-enriched aspiration dust from ferroalloy production. To incorporate finely dispersed industrial waste into metallurgical processing, a pelletizing method was applied in a disk granulator using an aqueous lignosulfonate solution as a binder. The resulting pellets were subjected to high-temperature firing at temperatures of 600, 800, and 1000 °C. The phase and mineralogical composition were studied using X-ray diffraction and petrographic analysis, and the microstructure was analyzed using electron microscopy. It was found that increasing the firing temperature intensifies solid-phase interactions and forms calcium silicate and aluminosilicate phases, such as wollastonite, dicalcium silicate, and mullite. The introduction of aspiration dust with a high SiO_2 content helps reduce the sintering onset temperature and strengthen the pellet structure by forming a binding silicate matrix. It has been shown that optimizing the composition and firing temperature allows for the production of heat-resistant and mechanically strong pellets, promising for use in processes for producing ferrosilicon with increased aluminum content.

Keywords: Aluminum slag, pellets, pelletizing, X-ray phase analysis, ferrosilicon.

Introduction

Ferroalloys are compounds containing iron and other elements, primarily used in steelmaking. Ferrosilicon, the most widely consumed ferroalloy, is used for alloying and deoxidizing steel. It is produced in electric furnaces using carbothermic reduction of silicon and iron oxide. Carbonaceous materials play a key role in the reduction processes and serve as a reducing agent [1].

The production of ferrosilicon can be considered one of the most energy-intensive processes of electrometallurgy, based on the ore-thermal reduction of silica and other elements with carbonaceous materials [2] in the presence of iron-containing components.

The primary raw material for producing ferrosilicon is quartz or quartzite, which contains minimal amounts of aluminum, calcium, and alkali oxide impurities. Coke,

anthracite, or charcoal are used as reducing agents. Charcoal has an advantage over coke, being characterized by a high carbon content and low ash content [3]. The iron source is steel scrap, iron filings, pellets, or ores, which are added to the charge depending on the required alloy grade [4].

The smelting process occurs at temperatures of approximately 1800–2000 °C and is accompanied by complex redox reactions. Silica is reduced by carbon to form silicon, which dissolves in the iron to form ferrosilicon:

$$SiO_2+2C \rightarrow Si+2CO\uparrow$$

$$Fe+Si \rightarrow FeSi_x \ (x=45–75\%)$$

At the same time, a significant amount of carbon monoxide is generated [5], which is captured by gas cleaning systems and can be used as a secondary energy source.

Molten ferrosilicon accumulates at the bottom of the furnace, above which a slag layer forms, consisting primarily of calcium and magnesium silicates. The slag is periodically removed, and the molten metal is tapped into ladles, poured into molds, and, after cooling, crushed into pieces of standard size. The finished alloy is sorted by chemical composition and corresponds to grades FS20, FS45, FS65, FS75, and FS90.

Modern ferroalloy production technology involves a complex high-temperature electrometallurgical process that produces products with a specified chemical composition while simultaneously optimizing energy consumption and minimizing environmental impact [6,7].

The energy consumption for producing FS-75 ferrosilicon is 8,000-10,000 kWh per ton of product. For Kazakhstan, quartzite and bauxite deposits may become scarce in the next 10-30 years due to the depletion of natural resources. However, an alternative to replacing mineral raw materials with the use of industrial waste in metallurgical processing always exists [8]. This problem is driving the search for efficient and cheaper methods for producing ferrosilicon alloys using industrial waste. If waste is considered as an alternative source of raw material for producing silicon alloys with aluminum, then it contains many useful components. One such alternative source of raw material is secondary aluminum slag. In which Al2O3 reaches 30–35 %. A disadvantage of aluminum slags is their low SiO_2 content (4,0–5,0 %) [9], which will play a key role in ferrosilicon production. However, this disadvantage can be compensated for by introducing silica waste from ferroalloy production into the batch, such as aspiration dust from ferroalloy production, which contains over 90 % SiO_2.

Thus, aluminum slags are quite suitable for use as a feedstock for producing aluminum-silicon alloys (ferrosilicon-aluminum). Experience has shown [10] that the newly developed ferrosilicon-aluminum alloy (FSA), produced from high-ash coal waste from the Ekibastuz coal basin, is suitable as a steel deoxidizer. The same is true for the experimental ferrosilicon-aluminum alloy produced from pellets.

Materials and methods

Secondary aluminum slags were selected as the primary material for the study. The chemical composition of the materials studied is presented in table 1. The data in Table 1 show that the aluminum slags contain 34,9 % Al_2O_3. The waste is characterized by a fine particle size distribution, with the particle size distribution presented in table 2. Pelletization is required to incorporate the fine-grained waste into metallurgical processing.

Table 1 – Chemical composition of secondary aluminum slags

Material Name	Chemical composition, %				
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
Aluminum Slag	12,4	67,8	0,52	4,59	4,58
Ferroalloy Production Dust Aspiration	94,9	1,30	0,89	0,26	0,34

Table 2 – Fractional composition of the studied materials, %

Material Name	Size class, mm				
	0 – 0,056	0,056 – 0,1	0,1 – 0,25	0,25 – 1,0	+1,0
Aluminum Slag	3,8	11,9	26,5	30,3	27,5
Ferroalloy Production Dust Aspiration	30,8	36,1	10,1	8,0	15,1

The aluminum slags under study were granulated using a pelletizing method in a disc granulator (Figure 1). The pelletizing process in a disc granulator involves agglomerating finely dispersed materials (and additives) in a rotating inclined plate. The initial batch was thoroughly mixed for 1 minute. A binder-an aqueous lignosulfonate solution (10,0 % of the dry weight) – was then added, ensuring the formation of strong interparticle bonds.

The prepared batch is uniformly fed onto the surface of a rotating disc granulator. As the plate rotates and is simultaneously moistened, the particles adhere due to capillary forces, adhesion, and plasticity caused by the presence of the aqueous lignosulfonate solution. Repeated rolling and layering results in the formation of spherical «green» pellets of the required diameter. The pellet size and quality are controlled by the tilt angle and rotation speed of the plate, as well as the binder flow rate and concentration. The resulting green pellets possess increased mechanical strength and are resistant to breakage during transportation, after which they are sent for drying and heat treatment (high-temperature roasting).

According to the experimental plan, the resulting pellets were subjected to high-temperature roasting for strengthening at varying temperatures of 600, 800, and 1000 °C.

The pellet production charge consisted of the following components:

– Aluminum slag – 40 %;

– Aspiration dust from ferroalloy production – 50 %;

– Aqueous lignosulfonate solution – 10 %.

a

b

a) disk granulator; b) pellets

Figure 1 – Equipment and pellets under study

The selection of the specified percentage ratios was based on thermodynamic calculations. These calculations revealed that a SiO_2/Al_2O_3 ratio of ≈ 0.5 produces thermally stable pellets that retain their shape upon heating and ensure uniform component distribution.

The physicochemical properties of the pellets were determined using X-ray diffraction (XRD) and petrographic analysis on an X'Pert PRO diffractometer. Surface morphology and microstructure were studied using a JEOL JSM-6390LV electron microscope. High-temperature annealing was performed in a PMV-4000 muffle furnace at a temperature ramp rate of 10 °C/min.

These studies allowed us to establish component ratios and determine the key pelletizing process parameters necessary to produce strong and uniform pellets for further study of the physicochemical properties of the materials.

Results and discussion

High-temperature roasting of green pellets is the final stage of their preparation and is aimed at forming a strong, heat-resistant structure that ensures the retention of shape and mechanical properties during subsequent metallurgical processing. High-temperature roasting was carried out in roasting units at temperatures of 600, 800, and 1000°C.

The initial roasting stage removes free and bound moisture, and thermally decomposes organic binders (including lignosulfonates). Subsequently, in the temperature range of 800–1000°C, solid-phase sintering processes occur, accompanied by diffusion of components, growth of contact surfaces between particles, and the formation of primary intergranular bonds. With a further increase in temperature, recrystallization processes and the formation of strong mineral and oxide phases are activated, leading to compaction of the pellet structure. In the zone of maximum temperatures, a strong pellet framework is formed through partial melting and the formation of liquid-phase bonds, ensuring high mechanical strength and abrasion resistance. The final stage is controlled cooling, which prevents thermal stress and cracking, and stabilizes the phase composition.

High-temperature firing produces pellets with high compressive strength, thermal stability, and stable metallurgical properties that meet the requirements of reduction processes.

Figure 2 shows the X-ray diffraction pattern of sample № 1 (pellets fired at 600 °C). A preliminary study of the X-ray phase composition of secondary aluminum slags [11] revealed the presence of the following phases: spinel ($Al_{1.99}Mg_{0.998}O_4$), quartz (SiO_2), mullite ($Al_{2,4}O_{4,8}Si_{0,6}$), corundum (Al_2O_3), calcite ($CaCO_3$), and breiite ($CaSiO_3$).

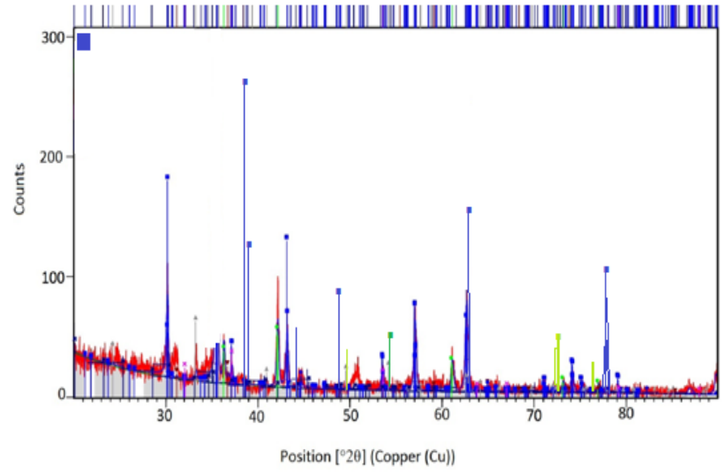


Figure 2 – X-ray diffraction pattern of sample №1 (pellets fired at 600°C)

The X-ray diffraction pattern and mineral composition of sample №1 – pellets fired at 600°C – show the presence of virtually the same minerals.

Table 3 – Mineral composition of sample № 1

Mineral Name	Formula	Mass fraction, %
Spinel	$Al_{1.99}Mg_{0.998}O_4$	20.5
Quartz	SiO_2	11.5
Mullite	$Al_{2.4}O_{4.8}Si_{0.6}$	8.0
Aluminum Oxide (Corundum)	Al_2O_3	11.3
Calcite	$CaCO_3$	27.8
Breyite	$CaSiO_3$	20.9

This can be explained by the fact that when green pellets are fired at approximately 600°C, dehydration, thermal decomposition of organic components, and initial solid-phase changes predominantly occur, while significant phase transformations for most mineral constituents are absent.

Spinel, mullite, calcite, and breiite are thermodynamically stable phases at this temperature. Their crystal structure remains unchanged, with only minor relief of internal stresses and ordering of lattice defects possible. № chemical interaction of these minerals with other components of the batch is observed at 600°C.

Changes are observed with quartz (SiO_2). Upon heating, it undergoes an α→β polymorphic transition (573 °C). This transition is reversible and is accompanied by an abrupt change in volume, which can lead to the formation of microcracks in the pellet structure. However, the chemical stability of quartz is maintained, and decomposition or formation of new phases does not occur. Calcite ($CaCO_3$) is the most heat-sensitive component of the system. At 600°C, its partial thermal decomposition begins, forming calcium oxide and releasing carbon dioxide. The degree of decomposition is determined by the holding time, particle size distribution, and CO_2 partial pressure. Gas release can contribute to increased pellet porosity and changes in pellet structure.

Thus, calcining pellets at 600°C does not result in the formation of new high-temperature phases, with the exception of the initial decomposition of calcite and the polymorphic transition of quartz. However, it does have a significant impact on the microstructure and porosity of the material, which may impact the pellet strength during subsequent heat treatment stages.

The next batch of pellets (sample № 2), with the addition of aspiration dust from the ferroalloy production process (the chemical composition is given in table 4), was subjected to high-temperature roasting at 800°C. The X-ray diffraction pattern (figure 3) and the data in Table 2 for sample № 2 (pellets roasted at 800°C) show some change in the mineralogical composition.

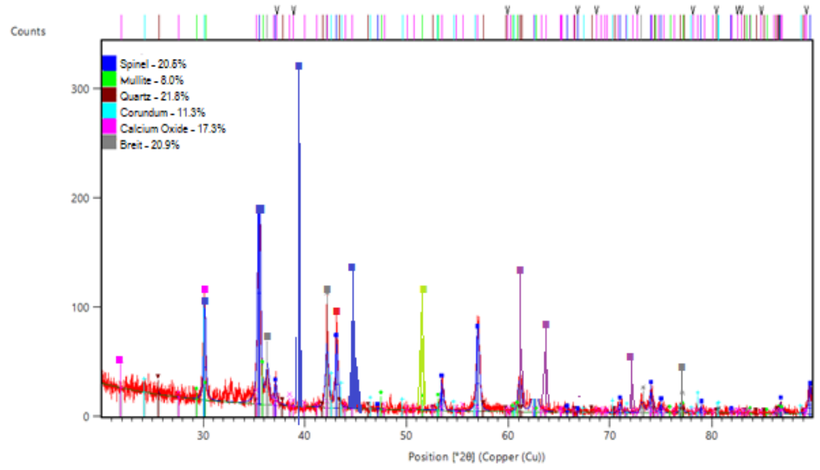


Figure 3 – X-ray diffraction pattern of sample №2 (pellets fired at 800°C)

Roasting pellets at temperatures around 800°C and 1000°C results in more intense solid-phase processes compared to the low-temperature stage. However, for most refractory minerals, the system still remains in the phase stability region without the formation of a liquid phase.

Table 4 – Mineral composition of sample №2

Mineral Name	Formula	Mass fraction, %
Spinel	$Al_{1.99}Mg_{0.998}O_4$	12,4
Quartz	SiO_2	18,0
Mullite	$Al_{2.4}O_{4.8}Si_{0.6}$	15,0
Aluminum Oxide (Corundum)	Al_2O_3	9,00
Calcium Oxide	CaO	18,6
Bryite (Wollastonite)	$CaSiO_3$	18,2
Dicalcium Silicate	$2CaO{\cdot}SiO_2$	8,80

Spinel ($Al_{1.99}Mg_{0.998}O4$), mullite ($Al_{2.4}O_{4.8}Si_{0.6}$), corundum (Al_2O_3), and breiite ($CaSiO_3$) retain thermodynamic and structural stability at 800°C. No phase transformations occur, but diffusion compaction and a reduction in crystal lattice defects are enhanced, which can contribute to increased intergrain contact strength.

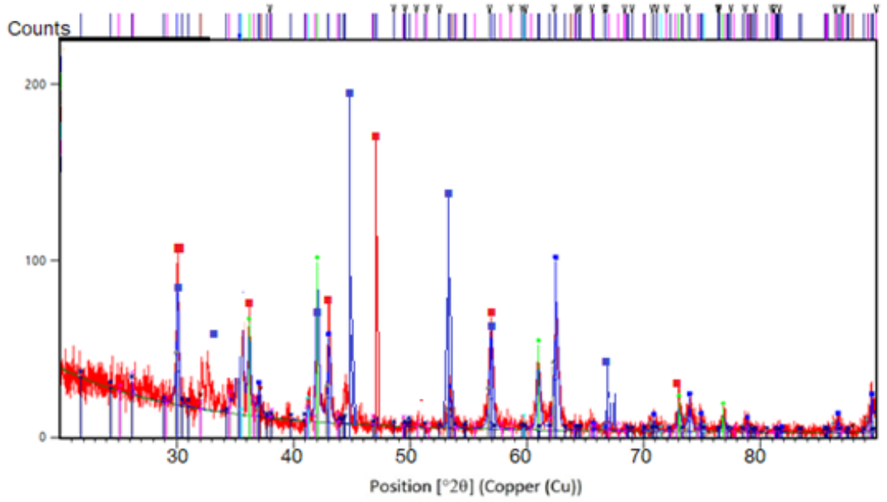


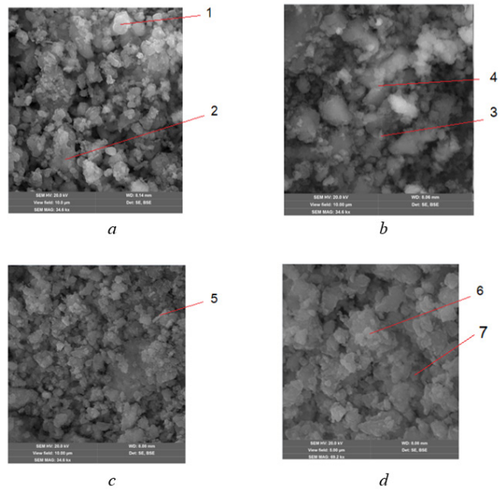
Figure 4 – X-ray diffraction pattern of sample № 3 (pellets fired at 1000°C)

When pellets are fired at approximately 1000 °C, the system transitions to a region of active solid-phase interactions and initial high-temperature sintering, which is accompanied by significant structural and phase changes that influence the formation of a strong pellet framework. The introduction of aspiration dust from ferroalloy production with a high silica content (≈94 % SiO_2) into the pellet composition significantly alters the course of high-temperature processes and the mineralogical composition of the pellets, especially at temperatures of 800–1000 °C. This is observed in the X-ray diffraction pattern of sample № 3 (figure 4 and table 5) and is associated with the high dispersion of the dust, the increased reactivity of amorphous and fine-crystalline SiO_2, and its active interaction with the main oxides.

Table 5 – Mineral composition of sample №3

Mineral Name	Formula	Mass fraction, %
Spinel	$Al_{1.99}Mg_{0.998}O_4$	8,20
Quartz	SiO_2	20,1
Mullite	$Al_{2.4}O_{4.8}Si_{0.6}$	18,0
Aluminum Oxide (Corundum)	Al_2O_3	10,0
Calcium Oxide	CaO	12,4
Bryite (Wollastonite)	$CaSiO_3$	22,4
Dicalcium Silicate	$2CaO{\cdot}SiO_2$	8,90

First of all, additional silica enhances the role of SiO_2 as a fluxing and phase-forming component. At temperatures of about 800–1000 °C, the intensity of solid-phase reactions between SiO_2 and calcium oxide formed during the decomposition of calcite increases. This allows the formation and growth of calcium silicate phases, such as breiite-wollastonite ($CaSiO_3$) and its high-temperature modifications, as well as dicalcium silicate ($2CaO\ SiO_2$) with a local excess of CaO. Dicalcium silicate is observed in the microsection as irregularly shaped grains (figure 5 (b), pos. 3). These reactions contribute to the compaction of the structure and the formation of strong intergranular bonds. Wollastonite ($CaSiO_3$) is displayed in the microsection as acicular crystals (figure 5 (c), pos. 5).



1 – spinel; 2 – corundum; 3 – dicalcium silicate;
4 – calcium oxide; 5 – wollastonite; 6 – quartz; 7 – mullite
Figure 5 – Microsection of pellets fired at 800 °C and 1000 °C

Calcium oxide in the microsection is often found as crusts or areas along phase boundaries (figure 5 (b), pos. 4). Spinel in the microsection is observed as isometric, rounded, or polygonal crystals (figure 5 (a), pos. 1).

Highly dispersed SiO_2 in aspiration dust can actively interact with aluminum oxides. At temperatures close to 1000°C, the preconditions for the formation of aluminosilicate phases and mullite growth are created, especially in the contact zones of corundum, mullite, and amorphous silica. Although intense mullite formation is typical at higher temperatures, the presence of reactive SiO_2 accelerates these processes. Mullite in the microsection is observed as isometric, rounded grains (figure 5 (d), pos. 7).

Quartz present in the aspiration dust, with a high SiO_2 content, increases the proportion of the silica phase in the pellets. In the microsection, it appears as isometric, angular, or rounded grains (figure 5 (g), pos. 6). During heating and subsequent cooling, this enhances the effect of quartz polymorphic transformations, which can lead to increased internal stresses and microcrack formation. At the same time, finely dispersed silica promotes the development of a glassy phase at higher firing temperatures, lowering the sintering onset temperature.

Overall, the introduction of aspiration dust with a silica content of approximately 94 % leads to enrichment of the pellets with silica, intensification of the formation of calcium and aluminosilicate phases, a decrease in the sintering onset temperature, and a change in the ratio of refractory and silicate components. These changes can have a positive effect on the strength of pellets due to the formation of a binding silicate matrix, but with an excess of SiO_2, increased brittleness and decreased recoverability are possible, which requires optimization of the composition and firing temperature regime.

During the stepwise firing of pellets in the temperature range of 600–1000 °C, physicochemical and mineralogical transformations occur sequentially, determining the formation of their structure and strength properties. At the initial heating stage, at temperatures around 600°C, dehydration and thermal decomposition of organic components occur, and the first solid-phase changes begin. Refractory minerals-spinel, mullite, and corundum-retain phase stability, while quartz undergoes an $\alpha\leftrightarrow\beta$ polymorphic transition, accompanied by volumetric changes and possible microcracking. In this same temperature range, partial decomposition of calcite initiates, releasing CO_2 and forming active CaO.

As the temperature increases to 800 °C, solid-phase processes intensify. Calcite undergoes almost complete decarbonization, leading to the accumulation of calcium oxide in the system. Refractory oxide and aluminosilicate phases (spinel, mullite, corundum) remain stable, but the diffusion mobility of the components increases and contact sintering intensifies. Quartz is stabilized in the β-modification, but the risk of thermal stress formation remains during subsequent cooling. Breyite ($CaSiO_3$) does not undergo polymorphic transformations at this temperature and remains stable.

The introduction of high-silica content (≈94 % SiO_2) into pellets from aspiration dust from ferroalloy production significantly affects the nature of phase transformations even at temperatures of 800 °C and above. Highly dispersed and partially amorphous SiO_2 exhibits increased reactivity and actively interacts with the resulting CaO, promoting

the formation of calcium silicate phases. These reactions are accompanied by a decrease in the sintering onset temperature and the development of a binding silicate matrix. When fired at approximately 1000 °C, the system enters a region of active solid-phase interaction and initial high-temperature sintering. Calcium oxide reacts vigorously with silica, both the original and that introduced with aspiration dust, leading to the formation and growth of calcium silicate phases ($CaSiO_3$, locally $2CaO\ SiO_2$). Simultaneously, the interaction of SiO_2 with Al_2O_3 intensifies, creating the preconditions for the formation and growth of mullite in the contact zones. Spinel and corundum retain phase stability, acting as a rigid framework, but the redistribution of MgO between the spinel and silicate components becomes thermodynamically possible.

Financing information

The research was carried out within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the competition for grant funding for scientific and (or) scientific and technical projects for 2024–2026 under the project AP23488812 «Development and research of technology for smelting ferrosilicon with high aluminum content using substandard ashes and aluminum slags».

Conclusions

Thus, in the 600–1000 °C range, a transition from the structurally unstable state of green pellets to the formation of a strong mineralogical framework occurs. The addition of silica-enriched aspiration dust enhances the formation of silicate and aluminosilicate phases, lowers the sintering onset temperature, and promotes structural strengthening. However, excess SiO_2 can lead to an increase in the proportion of the glassy phase and increased brittleness, requiring optimization of the pellet composition and firing temperature depending on the intended use.

REFERENCES

1 **Etemadi, A.** The effect of different carbon reductants on the production of ferrosilicon 75 % on an industrial scale in an electric arc furnace [Text] / A. Etemadi, H. Koohestani, M. Tajally // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – № 3. – Art. e13956. – https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13956.

2 **Surup, G. R.** Charcoal as an alternative reductant in ferroalloy production: a review [Text] / G. R. Surup, A. Trubetskaya, M. Tangstad // Processes. – 2020. – Vol. 8, № 11. – P. 1432. – https://doi.org/10.3390/pr8111432.

3 **Nurpeisova, A.** Optimization of the electrothermal production of ferrosilicon from the leaching tailings of the oxidized copper ore of Almaly [Text] / A. Nurpeisova [et al.] // Engineering Journal of Satbayev University. – 2023. – № 1 (145). – P. 19–24. – https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i1.03.

4 **Pan, X.** Effect of South Africa reductants on ferrochrome production [Text] / X. Pan // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – Vol. 46. – № 16. – P. 352–358. – https://doi.org/10.3182/20130825-4-US-2038.00116.

5 **Philipson Harald, G. R.** Aluminothermic Reduction Kinetics of Calcium Silicate Slag for Silicon Alloy Production [Text] / G. R. Philipson Harald, M. Wallin, K. E. Einarsrud // Metals. – 2024. – Vol. 14. – № 6. – P. 604. – https://doi.org/10.3390/met14060604.

6 **Safarian, J.** Processes for Upgrading Metallurgical Grade Silicon to Solar Grade Silicon [Text] / J. Safarian, G. Tranell, M. Tangstad // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 20. – P. 88–97. – https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.011.

7 **Shevko, V. M.** Obtaining of ferrosilicon from technogenic magnetite concentrate [Text] / V. M. Shevko [et al.] // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources. – 2020. – № 3 (313). – P. 71–78. – https://doi.org/10.31643/2020/6445.20.

8 **Zhunusova, A.** Research of physicochemical properties of ferrous sands from alumina production [Text] / A. Zhunusova [et al.] // Acta Metallurgica Slovaka. – 2024. – Vol. 30. – № 4. – P. 161–166. – https://doi.org/10.36547/ams.30.4.2086.

9 **Baisanov, S. O.** Electrothermal smelting of ferrosilicoaluminum from coal tailings at the Ispat-Karmet joint stock company [Text] / S. O. Baisanov [et al.] // Steel in Translation. – 2000. – Vol. 30. – № 7. – P. 24–26.

10 **Baisanov, S. O.** Using clay rock in smelting ferrosilicoaluminum [Text] / S. O. Baisanov [et al.] // Steel in Translation. – 2008. – Vol. 38. – № 8. – P. 668–670. – https://doi.org/10.3103/S0967091208080202.

11 **Zhunussov, A. K.** Study of the use of aluminium-containing waste in ferrosilicon production [Text] / A. K. Zhunussov [et al.] // Journal of Alloys and Metallurgical Systems. – 2025. – Vol. 12. – P. 100224. – https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100224.

Received 13.01.26.
Received in revised form 13.01.26.
Accepted for publication 03.02.26.

А. Жунусов[1], * Р. Тюлюбаев[2], А. Жунусова[3], А. Бакиров[4], А. Кенжебекова[5]
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
13.01.26 ж. баспаға түсті.
13.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АЛЮМИНИЙ ШЛАГЫНАН АЛЫНҒАН ТҮЙІРШІКТЕРДІҢ ФИЗИКАЛЫҚ-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада кремнеземге бай ферроқорытпа өндірісінің аспирациялық шаңын қосу арқылы алынған екінші реттік алюминий шлактары негізіндегі окатыштардыңфизика-химиялықжәнеминералогиялыққасиеттерізерттелді. Ұнтақталған техногендік қалдықтарды металлургиялық өңдеуге тарту мақсатында лигносульфонаттың сулы ерітіндісін байланыстырғыш ретінде пайдалана отырып, табақты грануляторда окомкалау әдісі қолданылды. Алынған окатыштар 600, 800 және 1000 °С температураларда жоғары температуралық күйдіруге ұшыратылды. Фазалық және минералогиялық құрамы рентгенфазалық және петрографиялық талдау әдістерімен, ал микроструктурасы электрондық микроскопия көмегімен зерттелді. Күйдіру температурасы артқан сайын қатты фазалық өзара әрекеттесулердің күшейетіні және волластонит, екікальцийлі силикат пен муллит сияқты кальцийсиликатты және алюмосиликатты фазалардың түзілуі анықталды. Құрамында SiO_2 мөлшері жоғары аспирациялық шаңды енгізу спекание басталу температурасын төмендетіп, силикатты байланыстырғыш матрицаның түзілуі арқылы окатыштардың құрылымдық беріктігін арттыратыны көрсетілді. Окатыштардың құрамын және күйдіру температуралық режимін оңтайландыру олардың жоғары термиялық тұрақтылығы мен механикалық беріктігін қамтамасыз етіп, алюминий мөлшері жоғары ферросилиций алу процестерінде қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Кілтті сөздер: Алюминий шлактары, түйіршіктер, түйіршіктеу, рентгендік фазалық талдау, ферросилиций.

А. Жунусов[1], * Р. Тюлюбаев[2], А. Жунусова[3], А. Бакиров[4], А. Кенжебекова[5]
[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
Поступило в редакцию 13.01.26.
Поступило с исправлениями 13.01.26.
Принято в печать 03.02.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОКАТЫШЕЙ ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ШЛАКОВ

В работе исследованы физико-химические и минералогические свойства окатышей, полученных на основе вторичных алюминиевых шлаков с добавлением аспирационной пыли ферросплавного производства, обогащённой кремнезёмом. Для вовлечения мелкодисперсных техногенных отходов в металлургический передел применён метод окомкования в тарельчатом грануляторе с использованием водного раствора лигносульфоната в качестве связующего. Полученные окатыши подвергались высокотемпературному обжигу при температурах 600, 800 и 1000 °С. Фазовый и минералогический состав исследовался методами рентгенофазового и петрографического анализа, а микроструктура – с использованием электронной микроскопии. Установлено, что при повышении температуры обжига происходит интенсификация твёрдофазных взаимодействий и формирование кальцийсиликатных и алюмосиликатных фаз, таких как волластонит, двухкальциевый силикат и муллит. Введение аспирационной пыли с высоким

содержанием SiO_2 способствует снижению температуры начала спекания и упрочнению структуры окатышей за счёт образования связующей силикатной матрицы. Показано, что оптимизация состава и температурного режима обжига позволяет получать термостойкие и механически прочные окатыши, перспективные для использования в процессах получения ферросилиция с повышенным содержанием алюминия.

Ключевые слова: Алюминиевый шлак, окатыши, окомкование, ренгеннофазовый анализ, ферросилиций.

МРНТИ 53.47.21

https://doi.org/10.48081/BGQF1924

К. Жұмашев[1], А. Нарембекова[2], Е. У. Жумағалиев[3],
****Е. Ж. Шабанов[4], Б. М. Орынбаев[5]***
[1]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[3,4,5]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Актобе.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8577-9417
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9066-6564
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8002-2853
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6902-1211
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7730-9060
*e-mail: ye.shabanov@gmail.com

ПЕРЕРАБОТКА ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОХРОМА СЕРНОЙ КИСЛОТОЙ В ХРОМОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ

Поиск оптимальных способов переработки накопленных хромсодержащих отходов является одной из актуальных задач в металлургической отрасли. С учетом растущего спроса на феррохром, наиболее целесообразным направлением является переработка хромсодержащих отходов с получением товарного хромового концентрата. Существующие способы переработки подобных отходов показывают возможность применения для этой цели недорогого и доступного реагента – серной кислоты. К хромсодержащим отходам относится и пыль, улавливаемая мокрым методом из отходящих газов руднотермических печей при выплавке углеродистого феррохрома. Накопление данной пыли представляет серьёзную экологическую проблему, поскольку она содержит значительное количество хрома и других компонентов, способных негативно воздействовать на окружающую среду. В статье приведены результаты исследования химического и фазового состава хромсодержащей пыли, а также представлены лабораторные эксперименты по её сернокислотному выщелачиванию. Исследования проводились по двум направлениям: сульфатизирующему обжигу с последующим выщелачиванием спека и прямому выщелачиванию пыли растворами серной кислоты. Экспериментальные данные подтвердили высокую эффективность применения серной кислоты, что обеспечивает перевод значительной части хрома в раствор и последующее выделение хромового концентрата. Использование недорогого реагента способствует снижению себестоимости процесса и делает возможной переработку больших объёмов отходов, образующихся при производстве феррохрома. Реализация такого подхода позволит не только получить вторичное сырьё для металлургического производства, но

и существенно уменьшить экологическую нагрузку, связанную с хранением и накоплением пыли на полигонах, обеспечивая тем самым повышение уровня экологической безопасности предприятий.

Ключевые слова: высокоуглеродистый феррохром, хромсодержащая пыль, сульфатизация, выщелачивание, хромовый концентрат.

Введение

Высокоуглеродистый феррохром применяется при выплавке коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, куда хром входит в качестве легирующего элемента. Назначение сталей определяет необходимую концентрацию хрома в них от десятых долей до нескольких десятков процентов. По запасам хромовых руд, являющихся сырьем для выплавки феррохрома, Республика Казахстан занимает одно из ведущих мест в мире. Основные запасы хромовых руд Казахстана сосредоточены в Хромтауском районе Актюбинской области, в пределах Кемпирсайского массива. Феррохром различных марок выплавляется на ферросплавных заводах в г. Актобе и г. Аксу (Павлодарская область) из хромовых руд месторождений Кемпирсайского массива, которые добывают и обогащают на предприятиях Донского ГОКа (промышленный центр г. Хромтау). Эти заводы и Донской ГОК входят в состав АО «ТНК «Казхром», являющегося крупнейшим производителем ферросплавов в стране, и одним из крупнейших в мире.

Хромсодержащие минералы руд месторождений Кемпирсая относятся к группе хромшпинелидов, которые могут быть выражены общей формулой $(Mg, Fe)^{2+}(Cr, AI, Fe^{3+})2^{3+}O4$. Пустая порода руды, цементирующая зерна хромшпинелидов, представлена серпентином $3\ MgO \times 2\ SiO_2 \times 2\ H_2O$. Другими минералами пустой породы является тальк, хлорит, магнезит, разновидности кварца, гидроокислы железа, карбонаты, которые присутствуют в рудах часто одновременно в различных количествах. Содержание оксида хрома Cr_2O_3 в руде составляет 45–51 %. При обогащении хромовой руды уменьшается лишь количество пустой породы, вследствие чего содержание оксида хрома (III) в полученном концентрате повышается до 52–54 %. Полученный концентрат после окускования (окатыши) направляется на выплавку феррохрома.

На ферросплавном заводе в г. Актобе высокоуглеродистый феррохром выплавляют в руднотермической печи постоянного тока закрытого типа мощностью 72 МВ*А углевосстановительным процессом. Для получения феррохрома используется шихта (хромовая руда, спецкокс, антрацит) фракции 0–10 мм. Флюсами являются боксит и кварцит. Процесс выплавки феррохрома из хромшпинелидов суммарно описывается реакцией:

$$(Mg, Fe)^{2+}(Cr, AI, Fe^{3+})2^{3+}O4 + C + SiO_2 \rightarrow [Cr\text{-}Fe\text{-}C] + (MgO - AI_2O_3 - SiO_2) + CO \quad (1)$$

При выплавке феррохрома по реакции (1) вместе с отходящими газами происходит выделение хромсодержащей пыли, при этом количество выделяемой пыли зависит от типа используемой печи. В печах открытого типа запыленность отходящих газов при использовании печи открытого типа составляет 50–60 г/м^3,

в отдельных случаях достигает 100 г/дм^3. При выплавке феррохрома в закрытой печи из-за повышенного давления под сводом запыленность отходящего газа меньше и составляет 15–20 г/м^3. Удельный выход пыли на 1 тонну феррохрома в закрытой печи составляет 50–150 кг/т, а в открытой печи – 25–75 кг/т [1]. Пыль из отходящих газов улавливают мокрым способом, при этом частицы пыли выводятся с водой в виде суспензии. Суспензия затем направляется на отстаивание с целью осаждения частиц, после чего осветленная вода направляется обратно в газоочистку. Сгущенная пульпа поступает на вакуум-фильтр, где хромсодержащий шлам подвергается механическому обезвоживанию. Обезвоженный шлам представляет собой мелкодисперсный материал с влажностью 16 %. В настоящее время шламы от мокрой газоочистки из-за отсутствия эффективного способа их переработки складируются на шламоотвале навалом. Объем улавливаемой пыли составляет примерно 47 тыс. т в год в зависимости от производительности печей постоянного тока.

Содержание оксида хрома (III) в обезвоженном шламе мокрой газоочистки выше, чем в других хромсодержащих техногенных отходах, и достигает 25–30 %. К примеру, содержание Cr_2O_3 в шламовых хвостах обогащения хромовой руды Донского ГОКа составляет 27,04 [2], а хроматный шлам от производства хромата натрия Na_2CrO_4 содержит 5–15 % Cr_2O_3 [3]. С учетом повышенного содержания Cr_2O_3 эти отходы можно рассматривать как ценное техногенное сырье. Однако лишь малая часть хвостов обогащения и хроматных шламов подвергается переработке, а уловленная пыль не утилизируется совсем, что приводит к накоплению вышеперечисленных отходов на промышленных полигонах. Пыление, загрязнение почвы и сточных вод тяжелыми металлами, покрытие обширных площадей, экологические платежи для предприятий и их ежегодное повышение – вот некоторые отрицательные аспекты хранения и складирования отходов производства. Переработка всего объема лежалых и текущих отходов позволит решить экологическую проблему, связанную с их накоплением, и рациональнее использовать природные ресурсы. В частности, утилизация уловленной пыли позволяет решать сразу две проблемы: экономическую – получить дополнительный доход и частично окупить расходы на газоочистку, и экологическую – исключить загрязнение ею окружающей среды. Преимущество уловленной пыли перед минеральным сырьем заключается в отсутствии затрат на извлечение из недр и измельчение. Наиболее оптимальным вариантом утилизации пыли был бы ее возврат в печь в качестве одного из компонентов шихты при выплавке феррохрома. Однако технологические особенности процесса выплавки феррохрома исключают подобный вариант утилизации пыли.

Необходимым условием технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома является получение оптимального по составу шлака. Феррохром с содержанием хрома 65–70 % и углерода 7–8,5 % имеет температуру плавления 1550–1570 °С, поэтому температура плавления шлака должна быть 1650–1670 °С. Для обеспечения такой температуры плавления и прогрева шлака, обеспечивающих его нормальную жидкотекучесть и полный выход из печи, химический состав

конечного шлака должен быть следующим [4], %: 32–35 SiO_2; 37–40 MgO; 22–27 Al_2O_3; 3–5 Cr_2O_3. Следует отметить, что шлаковый режим процесса выплавки феррохрома в руднотермических печах достаточно полно описывается системой MgO-Al_2O_3-SiO_2, т.к. в составе конечных шлаков сумма этих трех оксидов составляет более 90 % [5]. С применением тройной диаграммы состояния MgO-Al_2O_3-SiO_2 [4] можно определять температуру плавления шлака в зависимости от соотношения этих оксидов. Соотношением шлакообразующих оксидов определяется состав шлака, оказывающий влияние на такие технологические свойства шлака, как температура плавления и его жидкотекучесть (вязкость). От этих свойств шлака зависит степень перехода хрома из руды в сплав, являющаяся одним из основных технико-экономических показателей, определяющих эффективность производства феррохрома. Представленный состав конечного шлака соответствует области магнезиальной шпинели MgO × AI_2O_3 на тройной диаграмме состояния MgO-Al_2O_3-SiO_2.

Нормальная жидкотекучесть (вязкость) шлака зависит от соотношения в руде и шлаке MgO/Al_2O_3. Рост этого соотношения приводит к увеличению вязкости шлака [6]. Отношение MgO / AI_2O_3 в рудах Донского ГОКа по сравнению с зарубежными хромитовыми рудами является высоким и составляет 2,5–3,1. Повышенное содержание оксида магния MgO в рудах Донского ГОКа привело к смещению состава печных шлаков из области магнезиальной шпинели, соответствующей оптимальному составу, в область тугоплавкого форстерита 2 MgO × SiO_2 (1867 °С) [5]. Этим объясняется высокая температура плавления первых порций образующегося шлака (около 1760 °С) [7]. При переработке высокомагнезиальных руд присадкой отсевов кварцита содержание оксида кремния необходимо довести до 33 %, что снизит вязкость шлаков до минимального значения. При этом рекомендуемые отношения содержания компонентов MgO / AI_2O_3 и AI_2O_3 / SiO_2 находятся в пределах 1,1–1,5 и 0,8–1,0 соответственно. Конечный шлак такого состава обеспечит наибольшую степень извлечения хрома из руды в сплав [8].

С учетом спроса на высокоуглеродистый феррохром наиболее предпочтительным вариантом утилизации уловленной пыли является ее переработка с получением хромового концентрата. Принимая во внимание отрицательное влияние оксида магния на процесс выплавки феррохрома, способ переработки пыли может быть реализован по схеме, включающей в себя как минимум два этапа (рисунок 1).

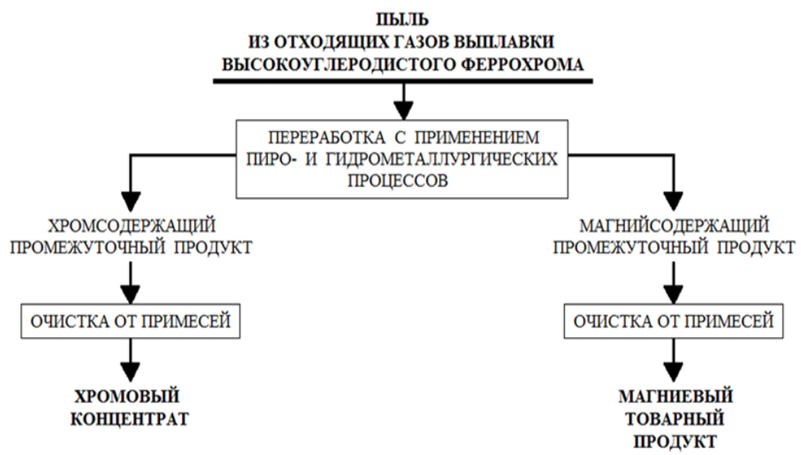


Рисунок 1 – Общая схема переработки хромсодержащей пыли, уловленной мокрым методом из отходящих газов при выплавке высокоуглеродистого феррохрома

На первом этапе из пыли получают хромсодержащий и магнийсодержащий промежуточные продукты. На втором этапе из хромсодержащего промежуточного продукта получают хромовый концентрат, а магнийсодержащий промежуточный продукт перерабатывают с получением магниевого товарного продукта. В зависимости от выбора методов очистки промежуточного продукта в качестве товарного магниевого продукта может выступить жженая или белая магнезия, кристаллический сульфат или хлорид магния, основной карбонат магния, металлический магний и т.д.

По химическому и минералогическому составу пыль отличается от других хромсодержащих отходов, так как она содержит не только частицы исходного сырья (руда и кокс), но и частицы конечного шлака, образующиеся в процессе взаимодействия кремнеземистого флюса с хромшпинелями ($MgO{\times}Cr_2O_3$ и $FeO{\times}Cr_2O_3$), содержащимися в рудной части шихты.

Анализ технологических решений по переработке таких отходов, как хроматный шлам, шламы обогащения хромитовых руд, показывает возможность практической реализации схемы, представленной на рисунке 1, где хром и магний распределяются по разным промежуточным продуктам, из которых получают товарные продукты. Следует отметить, что при переработке этих отходов применяется относительно недорогой реагент – серная кислота, производимая из отходящих газов предприятий цветной металлургии.

Так, например в патенте [9], из хроматного шлама соединения магния и хрома (VI) извлекаются в раствор выщелачиванием в серной кислоте, а оставшийся после фильтрации пульпы осадок может быть использован в качестве одного из компонентов при получении строительных материалов. Затем полученный

раствор сульфата магния $MgSO_4$ и соли хромовой кислоты Na_2CrO_4 очищается от соединений хрома и кальция. В раствор добавляют серусодержащий восстановитель (диоксид серы, сульфид, сульфит, тиосульфат натрия), полученную смесь обрабатывают серной кислотой до полного восстановления хрома (VI) до хрома (III). Степень восстановления хрома (VI) контролируют по индикатору дифенилкарбозиду. Затем вводят 1 М раствор карбоната натрия до pH среды 4,8–7,8 и отфильтровывают выпавший осадок гидроксида хрома (III) и соединений кальция, который направляют на переработку. В очищенный раствор сульфата магния вводят 1 М раствор карбоната натрия до pH среды 8,2–8,4. После выдержки смеси в течение 20 мин ее фильтруют с получением осадка - карбонат или гидроксокарбонат магния, разлагая который при 950–1000 °С, получают целевой продукт – оксид магния (более 98,5 % MgO).

В работе [10] серная кислота применяется для переработки хромитсодержащих шламов обогащения Донского ГОКа. Шлам, содержащий хром, магний, цветные металлы и другие полезные компоненты, подвергается сульфатизирующему обжигу совместно с восстановителем (углем). При этом решение основной задачи операции обжига сводилось к переводу в водорастворимые соединения магния, цветных и редкоземельных металлов с отделением хрома и его соединений в нерастворимый остаток – кек. Показана возможность разделения хрома от других металлов в виде нерастворимого кека при низких температурных интервалах обжига – 723-873 К. Установлено, что энергия Гиббса реакции взаимодействия сульфата хрома с восстановителем ~ в 2,5 раза превышает значения энергии Гиббса реакций взаимодействия с восстановителем сульфатов остальных металлов. При выбранных температурных интервалах взаимодействие сульфатов магния, железа и цветных металлов с восстановителем невозможно, пока в системе присутствует сульфат хрома. В ходе взаимодействия сульфата хрома с восстановителем образуется оксид хрома Cr_2O_3, который при последующем водном выщелачивании выпадает в осадок в виде нерастворимого кека, в то время как сульфаты остальных металлов концентрируются в растворе.

В статье [11] показана возможность применения серной кислоты для переработки хромсодержащей пыли отходящих газов с получением хромового концентрата. Объектом исследования являлась пыль следующего химического состава, %: 17,57 Cr_2O_3; 46,84 MgO; 14,02 SiO_2. Пыль подвергалась выщелачиванию различными реагентами (серная и соляная кислоты, сульфат и гидросульфат аммония) с целью перевода магния в раствор с оставлением хрома в кеке. По результатам опытов выбраны наиболее перспективные способы выщелачивания – серной кислотой при 68 °С и гидросульфатом аммония при 68 °С. Полученные от сернокислотного и гидросульфатного выщелачивания кеки (47 % Cr_2O_3) могут использоваться в производстве хромсодержащих огнеупоров, а также при выплавке феррохрома как заменитель хромового концентрата.

Зарубежные исследования подтверждают перспективность данного направления. Так, в работах [12, 13] приведён анализ современных технологий утилизации хромсодержащих пылей и шлаков, включая гидрометаллургические

методы, основанные на сернокислотном выщелачивании, и показана их эффективность для комплексного извлечения ценных компонентов. В работе [14] показано, что использование сернокислотного выщелачивания обеспечивает высокие степени извлечения основных ценных компонентов из хромсодержащих остатков переработки: до 94,8 % железа, 75,1 % алюминия и 76 % хрома при оптимальных условиях. Установлено, что выделение железа и хрома ограничивается кинетически поверхностно-химической реакцией, тогда как растворение алюминия контролируется диффузией через продуктовый слой. Авторы отмечают, что применение механической активации обеспечивает разрушение спинельных структур и повышение реакционной способности материала, что позволяет существенно интенсифицировать процесс выщелачивания.

Дополнительно, в работах [15, 16] показано, что сернокислотное выщелачивание природного хромита является более экологичной технологией, поскольку исключает образование отходов, содержащих токсичный Cr(VI). Однако при этом возможно выпадение в осадок безводного сульфата хрома, что приводит к потерям металла. Для решения данной проблемы предложено аммонийное выщелачивание остатка после кислотного разложения. Установлено, что повышение температуры и кислотности среды улучшает извлечение хрома. Предложенная технология обеспечивает почти полное использование хрома без образования опасных отходов [14].

Анализ литературных данных показывает возможность использования серной кислоты для переработки хромсодержащих отходов с получением из них товарных продуктов. Для разработки способа переработки хромсодержащей пыли, уловленной мокрым методом из отходящих газов руднотермической печи при выплавке углеродистого феррохрома, авторами статьи были проведены лабораторные эксперименты, целью которых явилось определение возможности применения серной кислоты для разделения хрома и магния по промежуточным продуктам согласно схемы (рисунок 1).

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовалась пыль от газоочисток, уловленная мокрым методом при выплавке углеродистого феррохрома в печах постоянного тока на Актюбинском заводе ферросплавов АО «ТНК «Казхром». Для определения вещественного состава пыли использовались методы химического и рентгенофазового анализа. Результаты химического анализа проб пыли на содержание в ней оксида хрома (III) и других веществ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав хромсодержащей пыли, уловленной мокрым методом из отходящих газов, %

Cr_2O_3	Fe	SiO_2	AI_2O_3	CaO	MgO	S	P
34,91	7,50	14,91	12,13	1,84	21,90	0,18	0,005

Рентгенофазовый анализ (РФА) проб пыли проводился на дифрактометре Malvern PANalytical Empyrean. Дифрактометр оснащен рентгеновской трубкой, материал анода Cu (Kα1= 1,541874 Å). Измерения проводились при комнатной температуре в интервале углов 0-90° (2 θ), в режиме пошагового сканирования с шагом 0,013 градуса. Из результатов РФА следует, что в исследованных пробах пыли присутствуют хромсодержащие фракции – металлический феррохром, хромит, дихромат калия. Основными сопутствующими минералами являются форстерит, периклаз, кварц. Фазовый состав пыли представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Фазовый состав хромсодержащей пыли, уловленной мокрым методом из отходящих газов

Наименование	%
Форстерит	38,9
Периклаз	17,1
Хромит	31,4
Дихромат калия	4,4
Кварц	5,5
Феррохром	2,7

Возможность применения серной кислоты для переработки хромсодержащей пыли определяли по двум направлениям. Первое направление предусматривало использование концентрированной кислоты (96 % $H2SO_4$), а второе – использование растворов серной кислоты разной концентрации.

В ходе экспериментов по первому направлению пыль подвергалась сульфатизирующему обжигу с последующим выщелачиванием спека. Пыль, добавив в нее концентрированную серную кислоту, подвергали выдержке при различных температурах в электрокамерной печи ЭКПС-10 с целью сульфатизации содержащихся в ней металлов. Полученный спек затем выщелачивали в воде с целью растворения полученных сульфатов металлов. Выщелачивание спека проводили при разных температурах и продолжительности процесса. Для выщелачивания использовались стеклянный стакан емкостью 300 мл и лабораторное перемешивающее устройство ER 10 со стеклянной мешалкой. Стакан с пульпой помещали в термостат U 10, позволяющий задавать необходимую температуру процесса. Мешалку помещали в пульпу, устанавливали выбранное число оборотов (60 об/мин) и фиксировали начало эксперимента.

В ходе экспериментов по второму направлению проводилось выщелачивание пыли в растворах серной кислоты разной концентрации при разных температурах и продолжительности процесса. В обоих способах масса пыли, отбираемой для экспериментов, составляла 20 г. После выщелачивания пульпу фильтровали на вакуум-фильтре, затем нерастворившийся при выщелачивании осадок (кек) промывали водой, высушивали и анализировали на содержание оксидов Cr2O3 и MgO по стандартным методикам.

Результаты и обсуждение

По каждому из двух направлений эксперименты проводились с вариацией значений таких параметров, как температура и продолжительность процесса, а также концентрация кислоты.

По первому направлению варьировались значения таких параметров эксперимента, как количество добавленной серной кислоты в пыль (5,8 мл; 6,0 мл; 8,5 мл), температура выдержки в печи (150 0С; 300 °С; 340 °С; 600 °С; 700 °С), продолжительность выдержки в печи (30 мин; 60 мин; 90 мин), продолжительность выщелачивания спека в воде (30 мин; 60 мин), температура выщелачивания (20 °С; 70 °С). Соотношение Ж:Т во всех опытах составляло 3:1. По результатам проведенных экспериментов установлены оптимальные условия переработки пыли по первому направлению, при котором степень удаления оксида магния из пыли будет максимальной. Они предусматривают переработку пыли по следующему режиму. В пыль массой 20 г добавляется 8,5 мл концентрированной серной кислоты. Количество кислоты брали из расчета образования сульфата магния, т.е. в пыль добавляли стехиометрически необходимое количество кислоты для полного перевода оксида магния в водорастворимый сульфат. Обработанная кислотой пыль подвергается выдержке в печи при температуре 150 °С в течение 60 мин. Затем полученный спек выщелачивается водой (t = 70 °С, Ж:Т=3:1). Продолжительность выщелачивания составляет 60 мин. После фильтрации пульпы кек весом 15,605 г имеет следующий химический состав, %: 40,56 Cr_2O_3; 7,2 Fe; 16,38 MgO. Кек после выщелачивания представляет собой хромсодержащий продукт, который можно использовать в качестве добавки в шихту для выплавки углеродистого феррохрома.

По второму направлению варьировались значения таких параметров эксперимента, как концентрация кислоты в растворе (14 %; 17 %), температура выщелачивания (70 0С; 95 °С), продолжительность выщелачивания (30 мин; 120 мин) и соотношение Ж:Т (3:1;5:1). По результатам проведенных экспериментов установлены оптимальные условия реализации второго способа переработки пыли, при котором степень удаления оксида магния из пыли будет максимальной. Они предусматривают выщелачивание пыли в растворе серной кислоты (14 % $H2SO_4$) при температуре 70 °С (Ж:Т=5:1) в течение 120 мин. Так как пульпу после выщелачивания практически невозможно было отфильтровать, кислотоупорный осадок (кек) выделяли после непродолжительного отстаивания пульпы декантацией, т.е. сливая пульпу с неосажденным мелкодисперсным осадком. При этом выделился крупнодисперсный осадок массой 9,72 г следующего химического состава, %: 44,82 Cr_2O_3; 7,89 Fe; 13,05 MgO. С целью выделения мелкодисперсного осадка пульпа отстаивалась в течение суток, затем осветленный раствор сливали, а осадок направлялся на сушку. Высушенный мелкодисперсный осадок массой 3,47 г имеет следующий химический состав, %: 64,30 Cr_2O_3; 5,78 Fe; 17,64 MgO; 9,18 SiO_2. Крупнодисперсный осадок можно использовать в качестве добавки в шихту для выплавки углеродистого феррохрома, а мелкодисперсный осадок представляет собой хромовый концентрат. При смешивании крупно-

и мелкодисперсного осадка получается продукт с содержанием Cr_2O_3 около 50 %, что соответствует параметрам хромового концентрата. Осветленный раствор, содержащий 11,89 г/дм3 MgO, может быть переработан известными способами с получением магниевого товарного продукта.

Информация о финансировании

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования научных исследований на 2024–2026 гг по программе BR 24992882 «Разработка новых технологий по переработке техногенных отходов с улучшением экологической обстановки в регионе».

Выводы

Накопленные на полигонах хромсодержащие промышленные отходы оказывают негативное влияние на окружающую среду. К числу таких отходов относится хромсодержащая пыль, уловленная из отходящих газов руднотермической печи при выплавке углеродистого феррохрома. Она характеризуется повышенным содержанием хрома и может быть использована как вторичный сырьевой ресурс для получения хромового концентрата. Анализ литературных данных показывает возможность получения хромового концентрата из хромсодержащих отходов с применением в качестве реагента серной кислоты, получаемой из отходящих газов предприятий цветной металлургии. Проведенные авторами статьи лабораторные эксперименты с хромсодержащей пылью показали, что при сульфатизирующем обжиге пыли с последующим выщелачиванием спека в воде возможно получение хромсодержащего продукта (40,56 % Cr_2O_3), а при сернокислотном выщелачивании – получение хромового концентрата (50 % Cr_2O_3). Установленная возможность применения такого недорого реагента, как серная кислота, позволит вовлечь в переработку большие объемы хромсодержащей пыли, и отчасти снизить количество накапливаемых на промышленных полигонах хромсодержащих отходов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Лазаревский, П. П., Романенко, Ю. Е.** Получение хромового концентрата химического обогащения путем переработки пыли производства углеродистого феррохрома // Инновации в материаловедении и металлургии: Материалы IV Междунар. интерактивной науч.- практ. конф. – Екатеринбург, 2015. – С. 16–20.

2 **Омарова, С. А., Гладышев, С.В., Жолдасбай, Е.Е., Досмухамедов Н.К.** Формы нахождения Cr, Fe, цветных и редкоземельных металлов в хромитсодержащих шламах обогащения // Фундаментальные исследования. – 2018. - № 6. – С. 15–22. – https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42159

3 **Беляев, С. В., Фомин, В. Н., Рожковой, И. Е., Каргина, Н. А.** Извлечение магния из хроматного шлама // Химия и металлургия комплексной переработки

минерального сырья: материалы Междунар. науч.- практ. конф. (Караганда, 25-26 июня 2015). Алматы: типография ИП Серикбаева А.М., 2015. – С. 110–114.

4 **Воскобойников, В. Г.** Общая металлургия. М.: Академкнига, 2005. – 768 с.

5 **Акбердин, А. А., Ким, А. С., Конуров, У., Сарекенов, К. З., Сулейменов, А. Б., Султангазиев, Р. И.** Влияние оксидов бора и марганца на фазовый состав шлаков производства углеродистого феррохрома // АБИШЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2011 «Гетерогенные процессы в обогащении и металлургии»: Материалы междунар. научн.-практ. конф. (Караганда, 22–23 июня 2011). – Караганды : Карагандинская полиграфия, 2011. – С. 101–102.

6 **Толымбеков, А. М., Такенов, Т. Д., Толымбеков, М. Ж.** Вязкость и электропроводность расплавов системы MgO – SiO_2 – AI_2O_3 и особенности формирования шлаков при выплавке высокоуглеродистого феррохрома // Комплексная переработка минерального сырья: Мат. межд. науч.- прак. конф., посвященной 50-летию Химико-металлургического института им. Ж. Абишева (Караганда, 25–26 сентября 2008). Караганда: Экожан, 2008. – С. 269–278.

7 **Заякин, О. В.** Особенности технологии получения хромсодержащих ферросплавов из различного хроморудного сырья // Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Караганда, 25–26 июня 2015). Алматы : типография ИП Серикбаева А.М., 2015. – С. 252–257.

8 **Такенов, Т. Д., Толымбеков, М. Ж., Байсанов, А. С.** О влиянии глинозема на электротермический процесс и отношения содержаний MgO и AI_2O_3 в шлаках при выплавке высокоуглеродистого феррохрома // Комплексная переработка минерального сырья: Мат. межд. науч.- прак. конф., посвященной 50-летию Химико-металлургического института им. Ж. Абишева (Караганда, 25–26 сентября 2008). Караганда : Экожан, 2008. – С. 285–292.

9 Патент РФ № 2083497. Способ переработки шлама хроматного производства / Середа Б. П., Демидова О. В., Попов Б. А., Пономарева И. М., Горяйнов В. Э., Середа А. Б., Решетников Б. С., Коминова Л. В. Опубл. 10.07.1997. RU2083497C1 - Способ переработки шлама хроматного производства – Google Patents

10 **Досмухамедов, Н. К., Жолдасбай, Е. Е., Омарова, С. А.** Термодинамика сульфатизирующего обжига хромитсодержащего шлама в присутствии восстановителя // Вестник КазНИТУ. – 2019. - № 3. – С. 693–699. View of Vol. 133. – № 3 (2019): Vestnik KazNRTU.

11 **Козловских, Е. Ю., Доронин, А. В., Богомолова, А. Л., Земляной, К. Г.** Гидрометаллургическая переработка отходов с мокрой газоочистки ферросплавных заводов // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (Екатеринбург, 16-19 декабря 2014 г.): в 2-х томах. – Екатеринбург: УрФУ, 2015 – Т. 2 – С. 53–56. – [Электронный ресурс]. – https://elar.urfu.ru/handle/10995/88716

12 **Xu, J., Liu, M., Ma, G., Zheng, D., Zhang, X., Hou, Y.** Valuable Recovery Technology and Resource Utilization of Chromium-Containing Metallurgical Dust and Slag: A Review // Metals. – 2023. – Vol. 13. – № 10. – Article 1768. – https://doi.org/10.3390/met13101768

13 **Miao, X.W., Bai, Z.T., Lu, G.H., Liu, L., Guo, M., Cheng, F.Q., Zhang, M.** Review of Comprehensive Utilization of Typical Ferroalloy Slags // Chin. J. Eng. – 2020. – Vol. 42. – P. 663–679. – https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.03.10.003

14 **Zhang, X., Li, G., Wu, J., Xiong, N., Quan, X.** Leaching of Valuable Elements from the Waste Chromite Ore Processing Residue: A Kinetic Analysis // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5, № 31. – P. 19633–19638. – https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02194

15 **Zhao, Q., Liu, C. J., Li, B. K., Zevenhoven, R., Saxén, H., Jiang, M. F.** Recovery of chromium from residue of sulfuric acid leaching of chromite // Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – Vol. 113. – P. 78-87. – https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.002

16 **Zhang, B., Shi, P., Jiang, M.** Advances towards a Clean Hydrometallurgical Process for Chromite // Minerals. – 2016. – Vol. 6, № 1. – Article 7. – https://doi.org/10.3390/min6010007

REFERENCES

1 **Lazarevskij, P. P., Romanenko, Yu. E.** Poluchenie xromovogo koncentrata ximicheskogo obogashheniya putem pererabotki py`li proizvodstva uglerodistogo ferroxroma [Obtaining chromium concentrate of chemical enrichment by processing carbonaceous ferrochrome production dust] // Innovacii v materialovedenii i metallurgii: Materialy` IV Mezhdunar. interaktivnoj nauch. – prakt. konf. – Ekaterinburg, 2015. – P. 16–20.

2 **Omarova, S. A., Glady`shev, S. V., Zholdasbaj, E. E., Dosmuhamedov, N. K.** Formy` naxozhdeniya Cr, Fe, czvetny`x i redkozemel`ny`x metallov v xromitsoderzhashhix shlamax obogashheniya [The forms of Cr, Fe, non-ferrous, and rare-earth metals in chromite-containing enrichment slurries]// Fundamental`ny`e issledovaniya. – 2018. – № 6. – P. 15–22. – [Electronic resource]. – https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42159

3 **Belyaev, S. V., Fomin, V. N., Rozhkovoj, I. E., Kargina, N. A.** Izvlechenie magniya iz xromatnogo shlama [Extraction of magnesium from chromate sludge] // Himiya i metallurgiya kompleksnoj pererabotki mineral`nogo sy`r`ya: materialy` Mezhdunar. nauch.- prakt. konf. (Karaganda, 25-26 iyunya 2015). Almaty`: tipografiya IP Serikbaeva A. M., 2015. – P. 110–114.

4 **Voskobojnikov, V. G.** Obshhaya metallurgiya. [General metallurgy] M. : Akademkniga, 2005. – 768 p.

5 **Akberdin, A. A., Kim, A. S., Konurov, U., Sarekenov, K. Z., Sulejmenov, A. B., Sultangaziev, R. I.** Vliyanie oksidov bora i margancza na fazovy`j sostav shlakov proizvodstva uglerodistogo ferroxroma [The effect of boron and manganese oxides on the phase composition of carbonaceous ferrochrome production slags] // ABIShEVSKIE ChTENIYa – 2011 «Geterogenny`e processy` v obogashhenii

i metallurgii»: Materialy` mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. (Karaganda, 22-23 iyunya 2011). – Karagandy`: Karagandinskaya poligrafiya, 2011. – P. 101–102.

6 **Toly`mbekov, A. M., Takenov, T. D., Toly`mbekov, M. Zh.** Vyazkost` i e`lektroprovodnost` rasplavov sistemy` MgO – SiO_2 – AI_2O_3 i osobennosti formirovaniya shlakov pri vy`plavke vy`sokouglerodistogo ferroxroma [Viscosity and electrical conductivity of melts of the MgO – SiO_2 – AI_2O_3 system and features of slag formation during smelting of high-carbon ferrochrome]// Kompleksnaya pererabotka mineral`nogo sy`r`ya: Mat. mezhd. nauch. – prak. konf., posvyashhennoj 50-letiyu Himiko-metallurgicheskogo instituta im. Zh. Abisheva (Karaganda, 25–26 sentyabrya 2008). Karaganda: E`kozhan, 2008. – P. 269–278.

7 **Zayakin, O. V.** Osobennosti texnologii polucheniya xromsoderzhashhix ferrosplavov iz razlichnogo xromorudnogo sy`r`ya [Features of the technology for producing chromium-containing ferroalloys from various chromium ore raw materials] // Himiya i metallurgiya kompleksnoj pererabotki mineral`nogo sy`r`ya: materialy` Mezhdunar. nauch.- prakt. konf. (Karaganda, 25-26 iyunya 2015). Almaty`: tipografiya IP Serikbaeva A. M., 2015. – P. 252–257.

8 **Takenov, T. D., Toly`mbekov, M. Zh., Bajsanov, A. S.** O vliyanii glinozema na e`lektrotermicheskij process i otnosheniya soderzhanij MgO i AI_2O_3 v shlakax pri vy`plavke vy`sokouglerodistogo ferroxroma [On the effect of alumina on the electrothermal process and the ratio of the contents of MgO and AI_2O_3 in slags during the smelting of high-carbon ferrochrome] // Kompleksnaya pererabotka mineral`nogo sy`r`ya: Mat. mezhd. nauch. – prak. konf., posvyashhennoj 50-letiyu Himiko-metallurgicheskogo instituta im. Zh. Abisheva (Karaganda, 25-26 sentyabrya 2008). Karaganda: E`kozhan, 2008. – P. 285–292.

9 Patent RF № 2083497. Sposob pererabotki shlama xromatnogo proizvodstva [The method of processing sludge from chromate production] / Sereda, B. P., Demidova, O. V., Popov, B. A., Ponomareva, I. M., Goryainov, V. E., Sereda, A. B., Reshetnikov, B. S., Kominova L, V. Opubl. 10.07.1997. RU2083497C1 – Способ переработки шлама хроматного производства – Google Patents.

10 **Dosmuhamedov, N. K., Zholdasbaj, E. E., Omarova, S. A.** Termodinamika sul`fatiziruyushhego obzhiga xromitsoderzhashhego shlama v prisutstvii vosstanovitelya [Thermodynamics of sulfatizing firing of chromite-containing sludge in the presence of a reducing agent] // Vestnik KazNITU. – 2019. – № 3. – P. 693–699. – View of Vol. 133. – № 3 (2019): Vestnik KazNRTU

11 **Kozlovskih, E. Yu., Doronin, A. V., Bogomolova, A. L., Zemlyanoj, K. G.** Gidrometallurgicheskaya pererabotka otxodov s mokroj gazoochistki ferrosplavny`x zavodov [Hydrometallurgical waste treatment from wet gas treatment of ferroalloy plants] // E`nergo- i resursosberezhenie. E`nergoobespechenie. Netradicionny`e i vozobnovlyaemy`e istochniki e`nergii: Materialy` Vserossijskoj nauch.- prakt. konf. studentov, aspirantov i molody`h ucheny`h s mezhdunar. uchastiem (Ekaterinburg, 16-19 dekabrya 2014 g.): v 2-x tomah. – Ekaterinburg: UrFU, 2015 – Vol. 2 – P. 53–56. – http://elar.urfu.ru/handle/10995/88716

12 **Xu, J., Liu, M., Ma, G., Zheng, D., Zhang, X., Hou, Y.** Valuable Recovery Technology and Resource Utilization of Chromium-Containing Metallurgical Dust and Slag: A Review // Metals. – 2023. – Vol. 13. – № 10. – Article 1768. – https://doi.org/10.3390/met13101768

13 **Miao, X.W., Bai, Z.T., Lu, G.H., Liu, L., Guo, M., Cheng, F.Q., Zhang, M.** Review of Comprehensive Utilization of Typical Ferroalloy Slags // Chin. J. Eng. – 2020. – Vol. 42. – P. 663–679. – https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.03.10.003

14 **Zhang, X., Li, G., Wu, J., Xiong, N., Quan, X.** Leaching of Valuable Elements from the Waste Chromite Ore Processing Residue: A Kinetic Analysis // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5, № 31. – P. 19633–19638. – https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02194

15 **Zhao, Q., Liu, C. J., Li, B. K., Zevenhoven, R., Saxén, H., Jiang, M. F.** Recovery of chromium from residue of sulfuric acid leaching of chromite // Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – Vol. 113. – P. 78-87. – https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.002

16 **Zhang, B., Shi, P., Jiang, M.** Advances towards a Clean Hydrometallurgical Process for Chromite // Minerals. – 2016. – Vol. 6, № 1. – Article 7. – https://doi.org/10.3390/min6010007

Поступило в редакцию 07.11.25.
Поступило с исправлениями 07.11.25.
Принято в печать 03.02.26.

К. Жұмашев[1], А. Нарембекова[2], Е. У. Жұмағалиев[3],
****Е. Ж. Шабанов[4], Б. М. Орынбаев[5]***
[1]Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[3,4,5]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.
07.11.25 ж. баспаға түсті.
07.01.25 ж. түзетулерімен түсті.
03.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФЕРРОХРОМ ӨНДІРУІНЕН КЕЙІНГІ ГАЗ ТАЗАРТУ ШАҢЫН КҮКІРТ ҚЫШҚЫЛЫМЕН ХРОМ КОНЦЕНТРАТЫНА ӨҢДЕУ

Жиналған хромқұрамды қалдықтарды өңдеудің оңтайлы тәсілдерін іздеу металлургия саласының өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Феррохромға деген сұраныстың артуын ескере отырып, хромқұрамды қалдықтарды тауарлық хром концентратын алу арқылы қайта өңдеу ең тиімді бағыт болып саналады. Қазіргі уақытта мұндай қалдықтарды қайта өңдеудің белгілі әдістері арзан әрі қолжетімді реагент – күкірт қышқылын қолданудың мүмкіндігін көрсетеді. Хромқұрамды қалдықтардың бір түрі – көміртекті

феррохром қорыту кезінде руднотермиялық пештердің қалдық газдарынан дымқыл әдіспен ұсталып алынатын хромқұрамды шаң. Бұл шаңның жиналуы қоршаған ортаға теріс әсер ететін экологиялық проблема туындатады, себебі оның құрамында айтарлықтай мөлшерде хром және басқа да зиянды компоненттер бар. Мақалада хромқұрамды шаңның химиялық және фазалық құрамы зерттеліп, күкірт қышқылын қолдану арқылы жүргізілген зертханалық тәжірибелердің нәтижелері ұсынылған. Тәжірибелік зерттеулер күкірт қышқылын қолданудың тиімділігін дәлелдеп, хромның едәуір бөлігін ерітіндіге көшіруге және хром концентратын бөліп алуға мүмкіндік береді. Арзан реагентті пайдалану процесс құнын төмендетіп, феррохром өндірісі кезінде түзілетін қалдықтардың үлкен көлемін өңдеуге жағдай жасайды. Бұл тәсіл екінші металлургиялық шикізат алуға мүмкіндік берумен қатар, полигондарда шаңның жиналуын азайтып, экологиялық қауіпсіздікті арттыруға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: жоғары көміртекті феррохром, құрамында хром бар шаң, сульфаттау, шаймалау, хром концентраты.

K. Zhumashev[1], A. Narembekova[2], Ye. U. Zhumagaliev[3],
****Ye. Zh. Shabanov[4], B. M. Orynbaev[5]***
[1]Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[2]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3,4,5]K. Zhubanov Aktobe regional university, Republic of Kazakhstan, Aktobe
Received 07.11.25.
Received in revised form 07.11.25.
Accepted for publication 03.02.26.

FERROCHROME PRODUCTION GAS CLEANING DUST PROCESSING WITH SULFURIC ACID INTO CHROME CONCENTRATE

Finding optimal methods for processing accumulated chromium-containing waste is a pressing issue in the metallurgical industry. Considering the growing demand for ferrochrome, recycling chromium-containing wastes to produce commercial chromium concentrate is considered the most feasible approach. Existing processing methods demonstrate the possibility of using an inexpensive and widely available reagent – sulfuric acid. Chromium-containing waste also includes dust collected by the wet method from the exhaust gases of ore-smelting furnaces during the smelting of carbon ferrochrome. The accumulation of this dust poses a serious environmental problem, as it contains significant amounts of chromium and other components that can negatively impact the environment. This article presents the results of a study of the chemical and phase composition of chromium-containing dust and presents laboratory experiments on its sulfuric acid leaching. The research was conducted in two areas: sulfatizing roasting followed by sinter leaching and direct leaching of dust with sulfuric acid solutions. Experimental data confirmed the high efficiency of sulfuric acid, which ensures the conversion of a significant portion of the chromium

into solution and the subsequent recovery of chromium concentrate. The use of an inexpensive reagent reduces the cost of the process and makes it possible to recycle large volumes of waste generated during ferrochrome production. Implementing this approach will not only yield secondary raw materials for metallurgical production but also significantly reduce the environmental impact associated with the storage and accumulation of dust in landfills, thereby improving the environmental safety of enterprises.

Keywords: high-carbon ferrochrome, chromium-containing dust, sulfatization, leaching, chromium concentrate.

SRSTI 53.31.21

https://doi.org/10.48081/BGQF1925

S. Kabylkanov[1], Ye. Makhambetov[2], S. Abdulina[3],
Ye. Zhumagaliev[4], O. Yucel[5]
[1,2]Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Republic of Kazakhstan, Karaganda
[1,3]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;
[4]Zhubanov Aktobe Regional University, Republic of Kazakhstan, Aktobe;
[5]Istanbul Technical University, Turkey, Istanbul
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1272-2065
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8613-9932
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6328-8652
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2227-0661
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3879-0410
*e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF CHROMIUM-MANGANESE LIGATURE PRODUCTION UNDER LARGE-SCALE LABORATORY SMELTING CONDITIONS

This study presents the development of a technology for producing chromium-manganese ligature under large-scale laboratory smelting conditions using a 100 kVA refining electric furnace. The charge materials included ferromanganese ore from the Kerege-Tas deposit and ferrosilicochrome (FeSiCr) dust generated during crushing. FeSiCr dust was used as a reducing agent due to its high silicon content. Seven smelting runs were carried out, resulting in the production of chromium-manganese ligature with the desired composition. The average chemical composition of the obtained alloy was: Fe – 35.63 %, Mn – 40.30 %, Cr – 20.94 %, Si – 4.54 %. The physico-chemical properties of the alloy were studied using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). XRD analysis revealed the presence of an α-solid solution (Fe, Cr, Mn), as well as silicide phases FeSi and Cr_5Si_3. SEM images showed pronounced microstructural heterogeneity, porosity, and contaminant inclusions, which are associated with the uneven distribution of major elements within the alloy volume. The results confirm the feasibility of efficiently producing chromium-manganese ligature using FeSiCr dust and low-grade manganese ore, which is relevant for resource-saving metallurgical technologies in the context of Kazakhstan.

Keywords: chromium-manganese ligature, reducing agent; iron-manganese ore, ferrosilicochromium dust, phase analysis, scanning electron microscopy, X-ray diffraction.

Introduction

In recent years, the global steel industry has demonstrated consistent growth, driven by the progress in key industrial sectors such as mechanical engineering, construction, and defense, along with broader technological advancements that continue to elevate the demand for high-performance metal products. This growing demand has intensified the need for various ferroalloys and alloying agents, which are essential in producing steels with enhanced mechanical and physical properties. Among these, chrome-manganese ligatures have gained significant prominence due to their positive impact on the strength, wear resistance, corrosion resistance, and thermal durability of steels [1; 2; 3].

Chromium- and manganese-based alloys are considered indispensable in modern ferrous metallurgy, serving as strategic alloying elements with extensive application across a wide spectrum of steel grades – from standard structural steels to highly alloyed tool steels, including stainless and heat-resistant variants. These ligatures are especially vital in manufacturing high-strength materials for industries such as heavy machinery, aerospace, transportation infrastructure, and power generation [4; 5; 6; 7].

For the Republic of Kazakhstan, which possesses vast but underexploited reserves of chromium and manganese ores, the development of advanced processing technologies and alloy production methods holds particular significance [8; 9]. In particular, the utilisation of low-grade local ores with elevated impurity levels can be realised through the implementation of innovative smelting techniques tailored to chrome-manganese ligature production [10, p. 24].

Previous studies [11] were aimed at developing an efficient technology for producing chromium-manganese ligature. The initial materials included iron-manganese ore from the Kerege-Tas deposit and FeSiCr dust, which was considered as a reducing agent. Based on the results of thermodynamic modeling, laboratory smelting was carried out in a Tamman furnace. The experiments confirmed the high reducing activity of FeSiCr dust, and the phase and chemical compositions of the obtained ligature were analyzed. A high recovery rate of the main elements was confirmed by both calculations and experimental results. These findings demonstrated the feasibility of further scaling up the process and using this reductant under higher thermal and energy conditions.

In the present article, building upon the previous results [11], large-scale laboratory smelting experiments were conducted. The main objective of the study is to comprehensively investigate the technological and physicochemical properties of the obtained chromium-manganese ligature using a refining furnace, as well as to assess the prospects for scaling up the process to an industrial level.

Materials and methods

As part of the large-scale laboratory smelting experiments, the initial materials used included iron-manganese ore from the Kerege-Tas deposit as the primary ore component, and FeSiCr dust as the reducing agent due to its high content of active silicon, which ensures the reduction of metal oxides in the charge. The FeSiCr dust used in this study is a fine-grained by-product formed during the crushing and processing of FeSiCr at the stage of its industrial production. To adjust the slag composition and reduce its viscosity,

lime was added to the charge as a fluxing material. The chemical compositions of the initial materials are presented in Table 1.

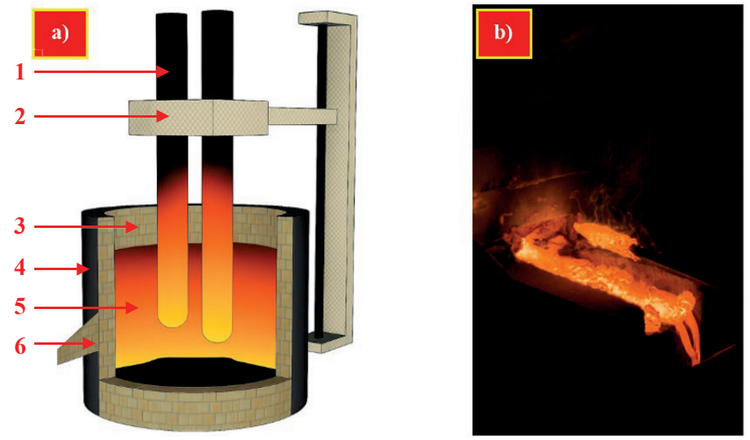
Table 1 – Chemical compositions of the initial materials, wt.%

Material	Content, %							
	Mn_{tot}	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	P_2O_5	S
Iron-manganese ore	26,62	21,78	16,74	2,57	0,15	2,34	0,43	0,17
Material	Content, %							
	Cr	Fe	Si	Al	C	S	P	
FeSiCr dust	24,10	14,18	32,22	1,51	2,48	0,049	0,018	

The iron-manganese ore from the Kerege-Tas deposit is characterized by a high content of manganese and iron, which makes it suitable as the main ore component for the production of chromium-manganese ligature. The ore also contains calcium, aluminum, and magnesium oxides in minor quantities, which may affect the thermochemical properties of the slag. The relatively low phosphorus (P) and sulfur (S) content has a positive impact on the quality of the final metal product by reducing the risk of forming harmful impurities.

FeSiCr dust was added to the ore component of the charge as a reducing agent. Its chemical composition plays a significant role during the smelting process. This material contains a considerable amount of active silicon, as well as chromium and iron, making it effective for reducing metal oxides. The levels of harmful impurities such as P and S in the dust are minimal, allowing its use as a reductant without the need for additional purification.

The large-scale laboratory smelting was carried out in a 100 kVA refining electric furnace (Figure 1a). The furnace is equipped with two self-baking electrodes that can be raised and lowered using electrode holders. The inner surface of the working zone is lined with heat-resistant magnesite-based refractory bricks, which provide thermal resistance during high-temperature smelting. The furnace is also equipped with a tapping hole for discharging the molten metal and slag phases.



1 – self-baking electrode; 2 – electrode holder; 3 – refractory lining; 4 – furnace shell; 5 – molten bath (metal and slag); 6 – tapping hole.

Figure 1 – Cross-sectional view of the refining furnace (a) and tapping of molten bath (b)

The phase composition of the obtained chromium-manganese ligature was determined using XRD analysis with a DRON-2 diffractometer. The instrument is equipped with a copper anode (Cu Kα, λ = 1.5418 Å) and performs scanning over a 2θ angle range from 10° to 90°. The scanning step was 0.05°, which ensured sufficient accuracy for qualitative phase analysis.

To gain a more detailed understanding of the internal structure and elemental distribution within the alloy, microstructural and elemental characterization was carried out using a scanning electron microscope (SEM) «ZEPTOOLS – ZEM20» (China), equipped with an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) system. This provided high-resolution imaging and significant magnification of the investigated area.

Results and discussion

The smelting of chromium-manganese ligature was carried out in a 100 kVA refining electric furnace. Prior to the process, the furnace was preheated for 5 hours. The preparation of the charge components included preliminary crushing and sieving according to the calculated ratio. After preheating, the charge materials were manually loaded into the working zone in layers, based on thermodynamic calculations of the component proportions.

The electric parameters of the process were maintained at a working current of 80–90 A, ensuring stable reduction reactions and uniform temperature distribution throughout the charge volume. The electrodes were deeply immersed into the reaction zone, and the melting zone was sustained by uniform heat transfer and a stable electric regime at a voltage of 18–24 V.

The smelting was carried out in a semi-continuous mode, with periodic tapping of molten metal and sampling every 1.5–2 hours. Samples of the alloy and slag were collected after each tap for chemical and phase analysis. The chemical composition of the metal and slag phases obtained from the experimental heats is presented in Table 2.

A total of seven heats were carried out during the large-scale smelting campaign, during which the metal and slag phases were separated and extracted from the furnace in each run. After cooling, the products were carefully weighed to determine the mass yield. Information on the mass of the charged raw materials, as well as the resulting metal and slag phases, is presented in Table 3.

Table 2 – Chemical composition of the products from experimental heats

№	Metal, %					
	Fe	Cr	Mn	Si	P	S
1	36,62	21,4	39.1	3.61	0.025	0.01
2	35,68	21,23	41.78	3.24	0.024	0.01
3	36,78	22,3	40.49	4.44	0.018	0.01
4	33,07	19,78	41.99	3.11	0.014	0.01
5	35,5	20,98	41.13	6.04	0.040	0.01
6	35,75	20,73	38.89	5.29	0.045	-
7	36,0	20,17	38.69	6.03	0.021	-

№	Slag, %							
	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	MnO	FeO	P
1	58.95	32.74	0.13	2.01	1.26	1.32	0.30	0.02
2	57.04	33.10	0.10	1.96	1.74	1.53	0.43	0.02
3	60.03	34.74	0.11	1.84	1.60	1.49	0.25	0.01
4	59.55	34.87	0.12	2.04	1.57	1.49	0.04	0.01
5	60.54	33.70	0.14	2.18	1.50	1.85	0.33	0.02
6	56.81	32.86	0.13	1.95	1.33	1.28	0.31	0.02
7	58.82	33.29	0.10	1.92	1.65	1.68	0.03	-

Based on the chemical compositions obtained from the seven experimental heats, the average chemical composition of the chromium-manganese ligature was determined as follows: 35.63 wt.% Fe, 40.30 wt.% Mn, 20.94 wt.% Cr, and 4.54 wt.% Si. The basicity of the slag, calculated using the formula $(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)$, ranged from 1.6 to 1.8.

Table 3 – Mass of the charged materials and yield of smelting products

Materials	kg	Products	kg
Iron-manganese ore	84,0	Metal	65,35
FeSiCr dust	42,0	Slag	141,20
Lime	84,0	Garnissage	2,90
∑	210,0	∑	209,45

As shown in Table 3, the total mass of charge materials loaded into the furnace was 210.0 kg. As a result of the smelting process, 65.35 kg of metallic phase and 141.20 kg of slag were obtained. In addition, 2.90 kg of garnissage remained as deposits on the walls and bottom of the furnace. The total yield of products was 209.45 kg, indicating minimal losses during smelting. The appearance of the obtained metal and slag phases is shown in Figure 2.

Figure 2 – External view of the metal and slag phases obtained after smelting

The obtained metal and slag phases were well separated from each other. The slag was detached compactly, did not crumble, and exhibited a dense, stone-like structure, indicating normal shrinkage and sufficient fluidity during the smelting process.

To further investigate the properties of the obtained chromium-manganese ligature, microstructural and phase identification of the samples was performed using appropriate analytical methods. Below is the XRD result (Figure 3) of the obtained chromium-manganese ligature, which enables the determination of its phase composition. For the analysis, the metal sample from the 4th heat was selected, as it exhibited a stable chemical composition close to the average values across all smelting runs.

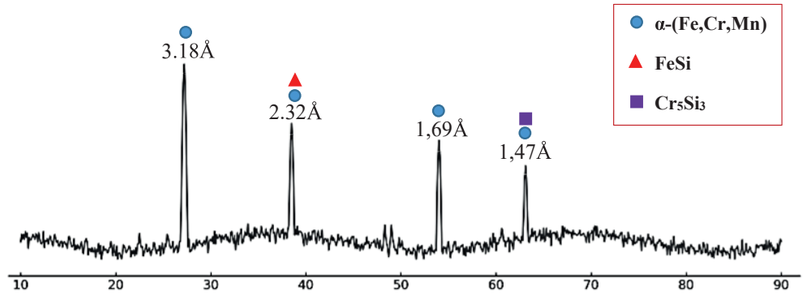


Figure 3 – X-ray diffraction pattern of the metal phase sample

The XRD pattern of the metal phase shows the main peaks at d-values of 3.18 Å, 2.32 Å, 1.69 Å, and 1.47 Å, which correspond to the α-(Fe,Cr,Mn) solid solution with a body-centered cubic (BCC) lattice. The detected phase is in good agreement with the chemical composition of the obtained ligature, confirming the formation of a single-phase metallic solid solution based on iron, chromium, and manganese.

Additionally, weak reflections of FeSi and Cr_5Si_3 phases were recorded, which are associated with the presence of silicon and chromium in the alloy composition. All phases are labeled on the graph: α-(Fe,Cr,Mn) – blue circles, FeSi – red triangles, Cr_5Si_3 – violet squares.

Subsequently, a microstructural characterization was performed on the metal alloy sample selected for XRD analysis. The SEM image and element distribution maps are shown in Figure 4.

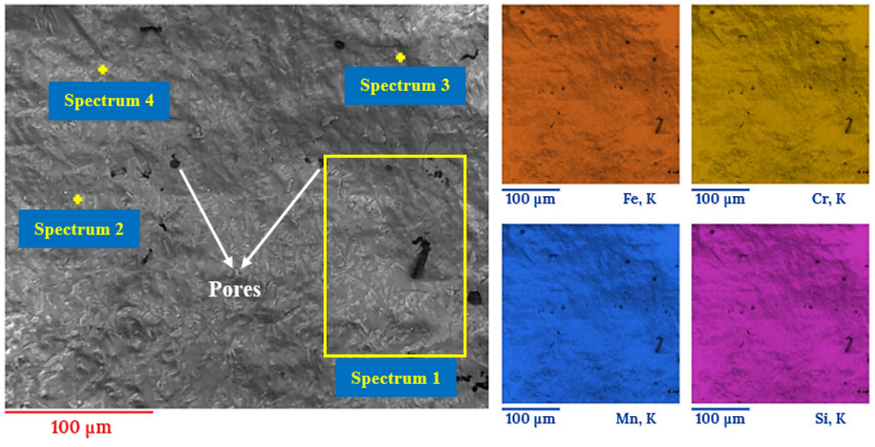


Figure 4 – SEM image of the metallic phase and corresponding elemental distribution maps

Table 3 – Elemental composition results from EDS analysis

Spectrum, №	Content, wt.%				
	Fe	Cr	Mn S	i	Al
1	50.25	15.67	26.24	7.84	-
2	50.28	7.81	35.40	6.51	-
3	34.55	38.48	23.02	6,01	-
4	47.32	15.71	33.02	3.95	0,05

To study the microstructural features and the distribution of alloying elements in the obtained ligature, analysis was performed using scanning electron microscopy (SEM) with magnification up to 100 nanometers. The elemental composition of specific surface regions was determined by energy-dispersive EDS.

A total of four spectra were recorded (Table 3). The main elements present in all spectra are iron (Fe), manganese (Mn), chromium (Cr), and silicon (Si). The Fe content ranges from 34.55 to 50.28 wt.%, Mn from 23.02 to 35.40 wt.%, Cr from 7.81 to 38.48 wt.%, and Si from 3.95 to 7.84 wt.%. In one case, a minor aluminum content of 0.05 wt.% was detected.

Pores of various shapes and sizes were visually observed in certain areas of the microstructure, indicating the presence of residual porosity within the ligature structure.

Fluctuations in the concentrations of the main elements indicate microstructural heterogeneity and the presence of regions with varying degrees of alloying. The observed chromium- and manganese-enriched areas confirm the complex nature of phase distribution within the ligature structure. The presence of silicon and traces of aluminum may be attributed to the use of reducing additives during smelting.

Thus, based on the results of SEM analysis, it was established that the obtained chromium-manganese ligature possesses a multiphase structure with an uneven distribution of alloying elements, reflecting the characteristics of its formation under electrometallurgical processing conditions.

Information about financing

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Re-public of Kazakhstan (Grant No. AP23488918)

Conclusions

As a result of experimental remelting conducted in a 100 kVA refining electric furnace, a chromium-manganese ligature with the desired chemical composition was obtained. The use of silicon-aluminum-based reductants ensured deep reduction of manganese and chromium from the ore charge. The resulting metal and slag phases were easily separated; the slag had a dense, stone-like structure. The experiments confirmed the feasibility of producing a refined ligature with a high content of alloying elements and minimal impurities (S, P) under optimized smelting conditions.

XRD analysis showed that the structure of the metallic phase consisted of an α-solid solution based on (Fe,Cr,Mn), as well as intermetallic compounds FeSi and Cr_5Si_3.

The presence of silicide phases indicates the active role of silicon in the structure formation of the alloy.

SEM analysis provided a detailed view of the microstructure of the studied alloy. The images obtained at magnifications up to 100 nm revealed signs of phase heterogeneity, interphase boundaries, and variations in chemical composition. Spectral analysis showed fluctuations in the concentrations of alloying elements (Fe, Cr, Mn, Si), confirming the complex multiphase nature of the ligature. Additionally, pores of various shapes and sizes were identified, along with contaminant inclusions in certain areas, indicating the presence of defects formed during sample preparation.

Overall, based on the results of the present work, a chromium-manganese ligature was obtained with an average chemical composition of: Fe – 35.63 %, Mn – 40.30 %, Cr – 20.94 %, Si – 4.54 %. Further work is planned to include a series of smelting trials with an increased number of heats, as well as a transition to a furnace with higher power and volume to improve production efficiency and expand the scope of research.

REFERENCES

1 **Koval, Yu. M., Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A.** Regularities of Formation of Structure, Phase Composition and Properties of Chromium–Manganese Alloys in the Initial Cast State during the Process of Friction Wear // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2021. – Vol. 43. – № 3. – P. 407–423. – https://doi.org/10.15407/mfint.43.03.0407.

2 **Hu, W.-J., Zhou, M.-F., Yudovskaya, M. A., Vikentyev, I. V., Malpas, J., Zhang, P.-F.** Trace Elements in Chromite as Indicators of the Origin of the Giant Podiform Chromite Deposit at Kempirsai, Kazakhstan // Economic Geology. – 2022. – Vol. 117, № 7. – P. 1629–1655. – https://doi.org/10.5382/econgeo.4955.

3 **Sariyev, O., Tolymbekova, L., Dossekenov, M., Kelamanov, B., Yessengaliyev, D., Davletova, A., Abdirashit, A.** Analysis and Chromium Recovery from Ferrochrome Waste (Stockpiled Refined Ferrochrome Slags) // Metals. – 2025. – Vol. 15. – № 7. – P. 740. – https://doi.org/10.3390/met15070740.

4 **Wang, Y., Karasev, A., Park, J. H., Jonsson, P. G.** Non-metallic inclusions in different ferroalloys and their effect on the steel quality: A review // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2021. – Vol. 52. – № 6. – P. 2892–2925.

5 **Kabylkanov, S. K., Abdullina, S. A., Makhambetov, Ye. N., Gorban, E. E., Burumbayev, A. G.** Research of obtaining a chromo-manganese ligature using a complex silicon-aluminum reducing agent // Innovations and complex processing of mineral raw materials are relevant components of economic diversification. – Almaty: RSE «NC CPMRM RK», 2024. – P. 92–94.

6 **Makhambetov Y., Zhakan A., Gabdullin S., Akhmetov A., Burumbayev A., Zhunusov A.** Study on the synthesis of FeCrMnSi ferroalloy using technogenic raw materials // Acta Metallurgica Slovaca. – 2025. – Vol. 31. – № 2. – P. 113–118. – https://doi.org/10.36547/ams.31.2.2137.

7 **Zhang J., Zhang Y., Long Y., Tian C., Du P., Ren Q.** Characterization of physical and chemical properties of multi-source metallurgical dust and analysis of resource utilization pathways // Metals. – 2024. – Vol. 14. – № 12. – Article № 1378. – https://doi.org/10.3390/met14121378.

8 **Nath S. K.** Geopolymerization behavior of ferrochrome slag and fly ash blends // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 181. – P. 487–494. – https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.070.

9 **Yu Y., Li B., Liu Z., Qi F., Liu C., Rong W., Kuang S.** Analysis of electrical energy consumption in a novel direct current submerged arc furnace for ferrochrome production // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. – 2023. – Vol. 54. – P. 2370–2382. – https://doi.org/10.1007/s11663-023-02838-w.

10 Chrome ore of Kazakhstan // Kazchrome. – [Electronic resource]. – https://www.kazchrome.com/ru/business-overview/ (accessed: 25.10.2024).

11 **Kabylkanov S., Makhambetov Y., Abdulina S., Burumbayev A., Zhakan A., Omuralp Y.** Production of chrome–manganese ligature using ferrosilicochrome dust as a reducing agent // Acta Metallurgica Slovaca. – 2025. – Vol. 31, No. 3. – P. 141–148. – https://doi.org/10.36547/ams.31.3.2221.

Received 02.08.25.
Received in revised form 06.08.25.
Accepted for publication 11.08.25.

С. К. Кабылканов[1], Е. Н. Махамбетов[2], С. А. Абдулина[3], Е. У. Жумагалиев[4], О. Yucel[5]
[1,3]Д. Серікбаева атындағы Шығыс-Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;
[1,2]Ж. Әбішев атындағы Химия-Металлургия институты, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.;
[4]Ыстамбұл техникалық университеті, Турция, Ыстамбұл қ.
02.08.25 ж. баспаға түсті.
06.08.25 ж. түзетулерімен түсті.
11.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ІРІ ЗЕРТХАНАЛЫҚ БАЛҚЫТУ ЖАҒДАЙЫНДА ХРОМ-МАРГАНЕЦТІ ЛИГАТУРА АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл зерттеуде қуаттылығы 100 кВА рафинирлік электр пешінде ірі-зертханалық жағдайларда хром-марганецті лигатура алу технологиясын әзірлеу қарастырылған. Шикіқұрам материалдары ретінде Кереге-Тас кен орнынан алынған темірлі-марганец кені және ұнтақтау процесінде түзілетін ферросиликохром (ФСХ) шаңы пайдаланылды. ФСХ шаңы құрамындағы белсенді кремний мөлшерінің жоғары болуына байланысты тотықсыздандырғыш ретінде қолданылды. Балқыту нәтижесінде жеті шығарылым жүргізіліп, қажетті құрамдағы хром-марганецті лигатура алынды. Алынған қорытпаның орташа химиялық құрамы келесідей: Fe – 35,63 %, Mn – 40,30 %, Cr – 20,94 %, Si – 4,54 %.

Қорытпаның физика-химиялық қасиеттері рентгенфазалық талдау (РФА) және сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдістері арқылы зерттелді. РФА нәтижелері бойынша қорытпа құрамында α-қатты ерітіндісі (Fe, Cr, Mn) және FeSi мен Cr_3Si_3 силицидті фазалары бар екені анықталды. СЭМ кескіндерінде микроструктуралық біркелкісіздік, кеуектілік және бөгде қоспалардың болуы байқалды, бұл элементтердің көлем бойынша біркелкі таралмауымен байланысты. Алынған нәтижелер ФСХ шаңы мен кедей марганец кенін пайдалану арқылы хром-марганецті лигатураны тиімді алуға болатынын растайды. Бұл отандық жағдайда ресурсты үнемдеуші металлургиялық технологиялар үшін өзекті болып табылады.

Кілтті сөздер: хром-марганецті лигатура, тотықсыздандырғыш, темірлі-марганец кені, ферросиликохром шаңы, фазалық талдау, сканерлеуші электрондық микроскопия, рентгенфазалық талдау.

С. К. Кабылканов[1], Е. Н. Махамбетов[2], С. А. Абдулина[3], Е. У. Жумагалиев[4], О. Yucel[5]

[1,3]Вочточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Уст-Каменогорск;

[1,2]Химико-Металлургический институт имени Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда;

[4]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республика Казахстан, г. Актобе;

[4]Стамбульский технический университет, Турция, г. Стамбул

Поступило в редакцию 02.08.25.
Поступило с исправлениями 06.08.25.
Принято в печать 06.08.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ХРОМОМАРГАНЦЕВОЙ ЛИГАТУРЫ В УСЛОВИЯХ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ ПЛАВКИ

В настоящем исследовании представлена разработка технологии получения хромомарганцевой лигатуры в условиях крупномасштабной лабораторной плавки с использованием рафинировочной электропечи мощностью 100 кВА. В качестве шихтовых материалов использовались железомарганцевая руда месторождения Кереге-Тас и пыль ферросиликохрома (ФСХ), образующаяся в процессе дробления. Пыль ФСХ применялась в качестве восстановителя благодаря высокому содержанию кремния. Было проведено семь плавок, в результате которых получена хромомарганцевая лигатура требуемого состава. Средний химический состав полученного сплава составил: Fe – 35,63 %, Mn – 40,30 %, Cr – 20,94 %, Si – 4,54 %.

Физико-химические свойства сплава были исследованы с использованием рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). По результатам РФА установлено наличие α-твёрдого раствора (Fe, Cr, Mn), а также силицидных фаз FeSi и Cr_3Si_3. СЭМ-изображения показали выраженную микроструктурную неоднородность, пористость и загрязняющие включения, что связано с неравномерным распределением основных элементов по объему сплава. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного получения хромомарганцевой лигатуры с использованием пыли ФСХ и низкосортной марганцевой руды, что актуально для ресурсосберегающих металлургических технологий в условиях Казахстана.

Ключевые слова: хромомарганцевая лигатура, восстановитель, железомарганцевая руда, пыль ферросиликохрома, фазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ.

МРНТИ 53.03.09:53.03.03

https://doi.org/10.48081/BGQF1926

***В. В. Толоконникова[1], С. О. Байсанов[2], Г. И. Нарикбаева[3], А. С. Орлов[4], В. А. Салина[5]**

[1,2,3,4]Филиала «РГП «НЦ КПМС РК» «ХМИ им. Ж.Абишева», Республика Казахстан, г. Караганда;

[5]Институт металлургии имени академика Н. А. Ватолина УО РАН, Российская Федерация, г. Екатеринбург

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7328-2921

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3386-0966

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1055-3448

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7563-357X

[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7415-717X

*e-mail: tolokon-splav@bk.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ВИД ЛИНИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-КРЕМНИЙ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ БЬЕРРУМА-ГУГГЕНГЕЙМА

Недостаточная обоснованность анализа фазовых равновесий является причиной слабого использования обширной термодинамической информации, заключенной в диаграмме состояния.

На примере системы железо-кремний показана применимость разработанной методики расчета линий фазовых равновесий для оценки структуры расплава через степень диссоциации или ассоциации конгруэнтно плавящихся химических соединений. Показано, что если в расплаве присутствует явление диссоциации конгруэнтно плавящегося соединения, то полученные новые данные для осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма с учетом степень диссоциации или ассоциации этого соединения в расплаве приобретают прямолинейный характер зависимости. Характерной особенностью линии кристаллизации соединения FeSi является наличие образования ассоциатов (первоначальные графики Фі имели вогнутый характер изменения).

Цель работы - выявить закономерные особенности поведения кремния вдоль линии кристаллизации с позиции осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма и получить универсальное математическое выражение для прогнозирования фазового состава сплава при различных концентрациях кремния через степень диссоциации (ассоциации) конгруэнтного соединения FeSi.

Впервые предложено математическое выражение линии кристаллизации кремния в системе железо–кремний в виде полуэмпирической зависимости уравнения Шредера-Ле-Шателье, связывающей температуру ликвидуса с концентрацией кремния. На примере системы железо-кремний проведен обоснованный выбор функционального вида аналитического описания

поверхности кристаллизации кремния с применением коэффициента Бьеррума - Гуггенгейма. Осуществлена аппроксимация экспериментальных данных диаграммы состояния Fe–Si с оценкой точности и области применимости полученной модели. Выявлены характерные особенности поведения линии кристаллизации кремния, связанные с изменением механизмов кристаллизации и взаимодействием компонентов. Полученные результаты в перспективе могут быть в численном моделировании кристаллизации и прогнозировании свойств железокремнистых сплавов.

Ключевые слова: диаграмма состояния, степень ассоциации (диссоциации), линии фазовых равновесий, энергия Гиббса, коэффициент Бьеррума-Гуггенгейма, поля кристаллизации фаз.

Введение

Система железо–кремний (Fe–Si) изучена достаточно полно и является одной из ключевых в металлургии, поскольку железокремнистые сплавы широко применяются в производстве ферросплавов (FeSi-45,65,75), комплексных ферросплавов (AlFeSi, AlSiMn, AlSiCr и т.д.), электротехнической стали, магнитных материалах и полупроводниковых технологиях [1]. Фазовые превращения в данной системе, особенно процессы кристаллизации кремния, существенно влияют на структуру, физико-механические и электромагнитные свойства конечного металла [2;3]. Недостаточная обоснованность анализа фазовых равновесий является причиной слабого использования обширной термодинамической информации, заключенной в диаграмме состояния. Так, отсутствие универсального математического описания линии кристаллизации кремния в системе Fe-Si ограничивает возможности численного моделирования процессов кристаллизации, прогнозирования фазового состава сплавов при различных концентрациях кремния, интеграции фазовых данных для компьютерного моделирования. В условиях развития цифровых технологий в металлургии, задача получения аналитического математического выражения линии кристаллизации кремния является актуальной и перспективной с точки зрения численного моделирования кристаллизации и прогнозирования свойств железокремнистых сплавов.

В данной работе предложен новый метод количественной оценки степени образования ассоциатов или продуктов диссоциации химического соединения в зависимости от кривизны кривой линии ликвидус. Суть данного метода заключается в установлении, на основе общепринятых термодинамических соотношений, конкретных выражений для параметров ассоциации в соответствии с математической моделью линии кристаллизации соединения на диаграмме состояния [4; 5].

На примере двухкомпонентной системы железо-кремний рассмотрен принцип работы данного метода и получены численные результаты степени ассоциации конгруэнтного соединения FeSi с помощью энергии Гиббса реакции ассоциации и константы равновесия реакции для области кристаллизации кремния.

Материалы и методы

Равновесный метод расчета параметров диссоциации (ассоциации) конгруэнтного соединения на основе анализа линии моновариантного равновесия

Для анализа сложных систем, где происходят химические реакции с изменением состава, необходимо использовать специальные параметры [6]. Одним из таких параметров является степень завершенности процесса. Её можно выразить через степень диссоциации или, для обратной реакции, ассоциации. Математические модели для обоих случаев схожи, разница заключается лишь в расчете константы равновесия, которая зависит от соотношения продуктов реакции и исходных веществ.

Степень диссоциации – это доля молекул вещества, распавшихся к моменту установления равновесия, по отношению к их исходному количеству. Она вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{\mathrm{dn_i}}{\mathrm{n_i^0}}, \tag{1}$$

где $\mathrm{dn_i}$ – число диссоциированных молекул;

$\mathrm{n_i}$ – исходное количество молекул.

В качестве примера рассмотрена реакция образования химического соединения AB или диссоциации, которое имеет конгруэнтный вид плавления (т.е. без изменения состава):

$$A + B = AB \tag{2}$$

Были выведены формулы для расчета количества молей каждого вещества в состоянии равновесия, а также их мольных долей в смеси. Эти расчеты включают в себя степень диссоциации:

$$\begin{aligned} n_A &= z_A - \alpha \\ n_B &= z_B - \alpha \\ n_{AB} &= \alpha \end{aligned} \tag{3}$$

где n_{AB}, n_A, n_B – число молей веществ AB, A, B в равновесном состоянии;

z_B, z_A – число молей веществ B и A в исходном состоянии;

α – степень диссоциации.

Общее количество молей AB, A и B в смеси будет равно:

$$\sum n = z_A - \alpha + z_B - \alpha + \alpha = 1 - \alpha \tag{4}$$

Мольная доля каждого компонента смеси составит:

$$\begin{aligned} x_A &= \frac{z_A - \alpha}{1 - \alpha} \\ x_B &= \frac{z_B - \alpha}{1 - \alpha} \\ x_{AB} &= \frac{\alpha}{1 - \alpha} \end{aligned} \tag{5}$$

Для точного определения степени образования соединения AB необходимо знать, как константа равновесия реакции ассоциации зависит от температуры $K_p = f(T)$):

$$\ln K_p = -\frac{\Delta G_p(T)}{RT}, \tag{6}$$

$$K_P = \frac{x_{AB}}{x_A x_B} = \exp\left(-\frac{\Delta G(T)}{RT}\right) \tag{7}$$

Проведем преобразования формулы (8) и выразим константу равновесия в реакции диссоциации через мольные доли компонентов смеси:

$$K_P = \frac{\alpha(1-\alpha)(1-\alpha)}{(1-\alpha)(z_A-\alpha)(z_B-\alpha)} = \frac{\alpha - \alpha^2}{(z_A-\alpha)(z_B-\alpha)} \tag{8}$$

Константа равновесия выражается через мольные доли компонентов, что позволяет вывести уравнение для расчета степени ассоциации соединения AB:

$$\alpha_{1,2} = \frac{(1+\mathrm{K}_p) \pm \sqrt{\mathrm{K}_p^2(1-4Z_{\mathrm{A}}Z_B) + 2\mathrm{K}_p(1-2Z_AZ_{\mathrm{B}}) + 1}}{2+2\mathrm{K}_p}$$

Или

$$\alpha_{1,2} = \frac{\sqrt{1+K_p} \pm \sqrt{1+\mathrm{K}_p - 4\mathrm{K}_p Z_A Z_{\mathrm{B}}}}{2\sqrt{1+K_p}} \tag{9}$$

В результате на примере образования соединения AB была продемонстрирована методика, позволяющая рассчитать реальное положение линий ликвидус и солидус на фазовой диаграмме на основе степени образования химического соединения. Этот подход позволяет более точно определять фазовые равновесия в системах с протекающими химическими реакциями.

Результаты и обсуждение

Для получения данных о характере межчастичного взаимодействия в расплавах и вывода аналитических выражений линии ликвидус и солидус были обработаны экспериментальные данные равновесных составов жидкой и твёрдой фаз с интервалом 25 °C от температуры плавления кремния до стабильной эвтектики с координатами $\mathrm{T_{эвт.}}$ = 1480 K, $\mathrm{X_{эвт.}}$ = 0,735 ат. долей [1]. При обработке

этих данных по специально составленной программе, использовали значения энтальпии плавления кремния $\Delta H_{пл}$ = 50210 Дж/моль ($T_{пл}$ = 1687 К) [7;8].

Многолетние исследования поведения осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма Φ'_{Fe} и Φ''_{Fe} вдоль линии ликвидус и солидус на диаграмме состояния показали, что прямолинейный характер изменения величин Φ'_{Fe} и Φ''_{Fe} чаще обнаруживается в системах, в расплавах которых преобладает только ван-дер-ваальсовские силы взаимодействия между элементарными структурными единицами.

Когда же в расплавах будет иметь место образование различных группировок (ассоциатов) из исходных элементов или, наоборот, диссоциация изучаемого соединения, то коэффициент Бъеррума-Гуггенгейма описывается полинаминальной зависимостью второго порядка [4;5].

С точки зрения поведения осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма рассмотрена область кристаллизации кремния в системе Fe-Si (рисунок – 1):

Диаграмма состояния Fe-Si (рисунок – 1) играет важную роль при оценке структуры ферросплавов и их температурных характеристик [1:9]. В сплавах этой системы присутствуют следующие фазы: α- и γ-растворы на основе железа, упорядоченная α_2-фаза, Fe_3Si, Fe_2Si, Fe_5Si_3, FeSi, $FeSi_2$, Fe_2Si_5 и Si. В работах [3; 9] представлен обширный обзор исследований о влиянии кремния на α↔γ превращения в железе. Учитывая практическую значимость этой системы для ферросплавного производства и её сложность, она была детально изучена с точки зрения структуры расплавов в соответствии с целью данной работы [10;12].

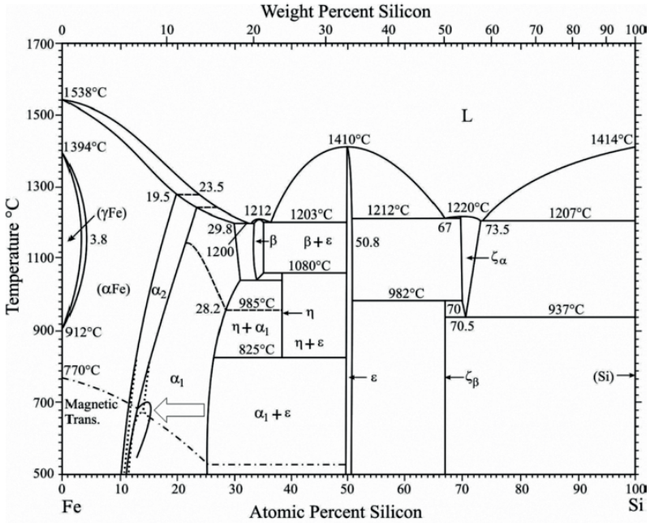


Рисунок 1 – Диаграмма состояния системы Fe-Si

Цель работы – выявить закономерные особенности поведения кремния вдоль линии кристаллизации с позиции осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма и получить универсальное математическое выражение для прогнозирования фазового состава сплава при различных концентрациях кремния через степень диссоциации (ассоциации) конгруэнтного соединения FeSi.

1 В области кристаллизации FeSi термодинамическая устойчивость или прочность кластеров [Fe_xSi_γ] варьируется. Наиболее стабильными являются кластеры, образующиеся при плавлении конгруэнтно плавящегося соединения FeSi. Построены графические зависимости осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма от активности для квазибинарных систем Fe-FeSi и FeSi-Si [13]. Показано, что для данной области кристаллизации характерно образование ассоциатов FeSi (график зависимости Ф от активности имеет вогнутую форму). По разработанной методике количественной оценки степени образования ассоциатов соединения в зависимости от кривизны линии ликвидус [14] получены численные значения степени ассоциации конгруэнтного соединения FeSi с использованием энергии Гиббса реакции ассоциации и константы реакции. При этом установлено, что степень ассоциации соединения FeSi с ростом температуры увеличивается и при температуре плавления составляет 46 %, что также хорошо согласуется с выводами Н. С. Курнакова об плавном максимуме для соединения FeSi [13].

2. С точки зрения математического описания области кристаллизации α-Si на основе концепции Бьеррума-Гуггенгейма вырисовывается очень интересная картина. Строение жидких сплавов системы Si-Fe вблизи температуры ликвидус проанализировано в работе [5, 6, 15,16]. Предположено, что при таких температурах преобладает взаимодействие атомов одного сорта и то, только при небольших перегревах выше линии ликвидуса. При дальнейшем нагревании происходит коллективизация валентных электронов, после чего возможен переход к преобладанию взаимодействия атомов разного сорта.

Таким образом, в области кристаллизации Si система ведет себя необычно (рис.2 а). График Φ''_{Si} от a^L_{Si} показывает, что при снижении температуры от температуры плавления чистого кремния 1685 К до температуры эвтектики 1481 К происходит образование ассоциатов Fe_xSi_y. Причем «нарастание» происходит очень интенсивно. Отсюда, фактическая концентрация кремния, взятая на линии ликвидус, не отражает его реальной атомной доли в расплаве. В результате наблюдается отклонение осмотических коэффициентов Бьеррума-Гуггенгейма от линейности (10):

$$\Phi''_{Si} = -15.68 + 11.86 \cdot a^L_{Si} - \frac{6.143}{(0-a^L_{Si})} \pm \delta, \quad (10)$$

δ=0,04174

Указанное может быть учтено введением уравнения (10), поправки на степень образования ассоциированных комплексов с получением нового уравнения Φ''_{Si} в виде корреляционной зависимости:

$$\Phi''_{Si} = = 1\,534 - 1.235 \cdot a_{Si}^{L}, \quad R_{xy} = -0{,}9978 \tag{11}$$

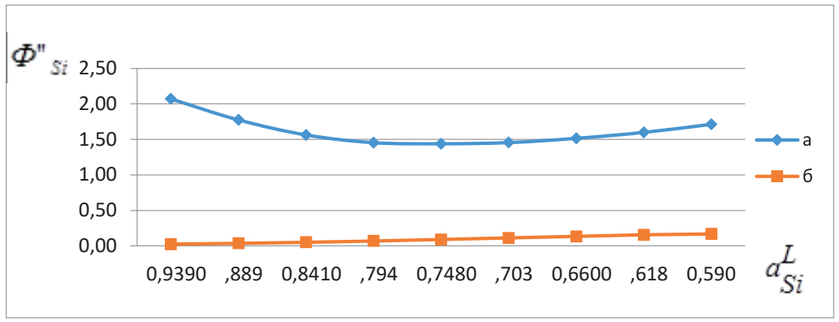


Рисунок 2 – Зависимость осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма

Φ''_{Si} от a_{Si}^{L} для области кристаллизации α-Si

По методике, представленной выше, получены численные значения степени ассоциации конгруэнтного соединения FeSi для линии кристаллизации кремния с использованием энергии Гиббса реакции ассоциации и константы реакции. Результаты расчётов степени образования химического соединения приведены в таблице 2. Построена новая графическая зависимость Φ''_{Si} от a_{Si}^{L} на рисунке 2, б которая показывает, что учёт только одного устойчивого соединения FeSi дает прямолинейную зависимость R=0,9978.

Таблица 2 – Расчетные значения термодинамических параметров и скорректированных концентраций вдоль линии кристаллизации кремния

T	G_0	K_p	α	$X_{(нов.)Si}^{(L)}$	$\Phi''_{Si\,нов.)}$
1687	-25481	6,14512	0,91197	0,476979654	0,04256637
1683	-25612	6,2366	0,90906	0,476182898	0,05679551
1682	-25679	6,27338	0,90847	0,476020645	0,05964334
1677	-26014	6,46084	0,90549	0,475200133	0,07389257
1672	-26347	6,6547	0,90343	0,474631399	0,08822414
1667	-26680	6,85519	0,90229	0,474316871	0,10266982
1660	-27148	7,1499	0,89407	0,472036063	0,12235978
1650	-27816	7,59621	0,88673	0,469983625	0,15085392
1640	-28479	8,07445	0,87729	0,467317335	0,17906111
1630	-29140	8,58726	0,86865	0,464853436	0,20731579
1620	-29798	9,13741	0,8579	0,461756789	0,23511877
1610	-30452	9,72799	0,84504	0,458005096	0,26231325
1600	-31103	10,3624	0,83494	0,455021872	0,28990859
1590	-31751	11,0442	0,82273	0,451373882	0,31681667
1580	-32396	11,7775	0,80843	0,4470346	0,34287234

1570	-33038	12,5667	0,79007	0,441362611	0,36728446
1560	-33776	13,5203	0,78255	0,439006264	0,39484695
1550	-34311	14,3324	0,77053	0,435197427	0,42073079
1540	-34943	15,3199	0,75763	0,4310531	0,44601045
1530	-35571	16,3856	0,75148	0,429055333	0,47385124
1520	-36197	17,5364	0,74425	0,426686536	0,50125952
1510	-36819	18,7800	0,73396	0,423284668	0,52719692
1500	-37438	20,1250	0,72947	0,421788788	0,55592033
1490	-38053	21,5805	0,72391	0,419924287	0,5842221
1481	-38665	23,1078	0,71725	0,417672224	0,6088346

Практически прямолинейный характер изменения Φ''_{Si} с температурой (11) указывает на корректность выбранной формулы для расчета степени ассоциации, преобладание в расплаве ван-дер-ваальсовых сил взаимодействия между частицами Fe и Si, а также на постоянство степени ассоциации ферросилиция при изменении состава расплава вдоль линий ликвидус. Уравнение поверхности кристаллизации кремния представлено модифицированным уравнением Шредерале-Шателье (12):

$$\ln x_{Si}^{L} = \frac{\frac{50210}{8{,}3143}\left(\frac{1}{1687}-\frac{1}{T}\right)+\int_{T}^{T_{m,i}}\left[\frac{1}{RT^2}\int_{T}^{T_{m,i}}\Delta C_p\,dT\right]dT}{-8{,}9041+4{,}3125*\exp\left[\frac{50210}{8{,}3143}\left(\frac{1}{1687}-\frac{1}{T}\right)+\int_{T}^{T_{m,i}}\left[\frac{1}{RT^2}\int_{T}^{Tm,i}\Delta C_p\,dT\right]dT\right]} \tag{12}$$

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом Науки Министерства Науки и Высшего Образования Республики Казахстан (грант № AP26194293).

Выводы

На основе концепции осмотического коэффициента Бьеррума–Гуггенгейма разработан и апробирован термодинамически обоснованный подход к математическому описанию линии кристаллизации кремния в системе Fe–Si, учитывающий процессы ассоциации и диссоциации конгруэнтно плавящегося соединения FeSi в расплаве.

Показано, что кривизна линии ликвидус и нелинейный характер зависимости осмотического коэффициента Бьеррума–Гуггенгейма от активности кремния являются прямым следствием образования ассоциированных комплексов Fe_xSi_γ в расплаве. Количественно определена степень ассоциации конгруэнтного соединения FeSi вдоль линии кристаллизации кремния с использованием энергии Гиббса реакции ассоциации и соответствующей константы равновесия. Показано, что учет степени ассоциации FeSi приводит к трансформации нелинейной зависимости осмотического коэффициента Бьеррума–Гуггенгейма в практически прямолинейную, что свидетельствует о корректности выбранной

модели и адекватном описании структуры расплава в рассматриваемой области концентраций и температур.

Получено модифицированное полуэмпирическое уравнение линии кристаллизации кремния на основе уравнения Шредера–Ле Шателье, в которое введена поправка на степень ассоциации конгруэнтного соединения FeSi. Установлено, что фактическая атомная доля кремния в расплаве вдоль линии ликвидус существенно отличается от номинальной концентрации, что обусловлено интенсивным образованием ассоциатов Fe–Si при понижении температуры от температуры плавления кремния к эвтектической точке.

Полученные результаты расширяют представления о структуре жидких сплавов системы Fe–Si и могут быть использованы для численного моделирования процессов кристаллизации, прогнозирования фазового состава и свойств железокремнистых сплавов при различных концентрациях кремния, а также при разработке цифровых термодинамических моделей металлургических процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Кубашевски, О.** Диаграммы состояния двойных систем на основе железа. Справочник. Перев.с англ. – М.: Металлургия, 1985. –184 с.

2 **Шовский, В. А., Казимиров, В. П., Ятанский, С. П. и др.** О строении жидкого кремния // Изв.АН СССР. Металлы, 1983. – № 6. – С. 63–65.

3 **Неверов, В. В., Чернов, А. А.** Природа фазовых превращений в кремнии // ФТТ. – 1986. – Т. 26. – № 1. – С. 176–179.

4 **Байсанов, С., Толоконникова, В., Нарикбаева, Г. Т., Корсукова, И. Я.** Методы исследования линий гетерогенных фазовых равновесий на диаграмме состояния через осмотический коэффициент Бьеррума-Гуггенгейма. Монография - Караганда: «Экожан» 2020. – 74с.

5 **Толоконникова В.** Исследование термической стабильности конгруэнтно-плавящихся соединений для модельных систем на основе концепции осмотического коэффициента Бьеррума-Гуггенгейма. Монография. – Караганда : «Санат-полиграфия». – 2022. – 117 с.

6 Исследование степени диссоциации конгруэнтных соединений в металлургических шлаках в расплавленном состоянии на основе концепции Бьеррума-Гуггенгейма: отчет о НИР (заключительный) / ХМИ им. Ж. Абишева : рук. Байсанов С. О.; исполн. Толоконникова В. В и др.– № ГР 121РК00426. – Инв. № 0223РК00256. – Караганда, 2023. – 113 с.

7 **Рузинов Л. П., Гуляницкий В. С.** Равновесные превращения металлургических реакций.-Москва: Металлургия, 1975. – 417 с.

8 **Глушко В. П.** Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. – М : ВИНИТИ Институт высоких температур АН СССР, 1982. – Т. 4. – 456 с.

9 **Денисов В.М., Истомин С.А., Подхопаев О.И. и др.** Кремний и его сплавы. – Екатеринбург : УрО РАН. 2005 . – 467 с.

10 **Makhambetov Ye., Timirbayeva N., Baisanov S., Baisanov A., Shabanov E.** Thermodynamic modeling of phase composition for Fe-Ca-Si-Al system // Metalurgija. 2020. – Vol. 60. – № 1–2. – P. 117–120.

11 **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. – 61(2), P. 305–308.

12 **Akberdin, A. A., Kim, A. S., Orlov, A. S., Sultangaziev, R. B.** Diagram of the phase composition of the Fe-Si-Al system and its isothermal sections CIS Iron and Steel Review, 2022. – 23. – P. 76–80.

13 Метод расчета термической устойчивости конгруэнтных соединений через осмотический коэффициент Бьеррума-Гуггенгейма на примере системы железо-кремний/ Толоконникова В. В [и др.]// Теоретическая и экспериментальная химия. – 2023. – материалы VII Междунар. Науч.-практ.конф., посвящ. 50-летию факультета и 100-летию Первого декана проф. Р. Г. Омаровой, 26–28 мая. – С. 329–331.

14 **Куликов, И. С.** Термическая диссоциация соединений. М. : Металлургия, 1966. – 251 с.

15 **Mekhtiev, A., Shabanov, Ye., Issagulov, A., Baissanov, S. et al.** Development of technology of complex aluminum-silicon-chrome alloy with utilization of offgrade raw materials // Metalurgija, 2015. – Vol. 54. – № 1. – P. 157–160.

16 **Makhambetov, Ye., Timirbayeva, N., Baisanov, S., Baisanov, A., Shabanov E.** Thermodynamic modeling of phase composition for Fe-Ca-Si-Al system // Metalurgija. 2020. – Vol. 60. – № 1–2. – P. 117–120.

REFERENCES

1 **Kubashevski, O.** Diagrammy sostoyaniya dvojnyh sistem na osnove zheleza [Iron–Binary Phase Diagrams]. Spravochnik. Perev.s angl. – M. : Metallurgiya, 1985. –184 s.

2 **SHovskij, V. A., Kazimirov, V. P., YAtanskij, S. P., et al.** O stroenii zhidkogo kremniya [On the structure of liquid silicon] // Izv.AN SSSR. Metally, 1983. – № 6. P. 63–65.

3 **Neverov V. V., CHernov A. A.** Priroda fazovyh prevrashchenij v kremnii [Nature of phase transformations in silicon] // FTT. – 1986. – T. 26. – № 1. – P. 176–179.

4 **Bajsanov S., Tolokonnikova V., Narikbaeva G. T., Korsukova I. Ya.** Metody issledovaniya linij geterogennyh fazovyh ravnovesij na diagramme sostoyaniya cherez osmoticheskij koefficient B'erruma-Guggengejma [Methods for Investigating Lines of Heterogeneous Phase Equilibria in Phase Diagrams Using the Bjerrum–Guggenheim Osmotic Coefficient]. Monografiya - Karaganda: «Ekozhan», 2020. – 74 p.

5 **Tolokonnikova V.** Issledovanie termicheskoj stabil'nosti kongruentno-plavyashchihsya soedinenij dlya model'nyh sistem na osnove koncepcii osmoticheskogo

koefficienta B’erruma-Guggengejma [Study of Thermal Stability of Congruently Melting Compounds for Model Systems Based on the Concept of the Bjerrum–Guggenheim Osmotic Coefficient]. Monografiya - Karaganda: «Sanat-poligrafiya», 2022. – 117 p.

6 Issledovanie stepeni dissociacii kongruentnyh soedinenij v metallurgicheskih shlakah v rasplavlennom sostoyanii na osnove koncepcii B’erruma-Guggengejma: otchet o NIR (zaklyuchitel’nyj) [Research on the Degree of Dissociation of Congruent Compounds in Metallurgical Slags in the Molten State Based on the Bjerrum–Guggenheim Concept: Final Research Report] / HMI im. ZH. Abisheva: ruk. Bajsanov S. O.; ispoln. Tolokonnikova V.V i dr. – № GR 121RK00426,– Inv. № 0223RK00256. – Karaganda, 2023. – 113 p.

7 **Ruzinov, L. P., Gulyanickij, V. S.** Ravnovesnye prevrashcheniya metallurgicheskih reakcij [Equilibrium Transformations of Metallurgical Reactions.]. – M. : Metallurgiya, 1975. – 417 p.

8 **Glushko, V. P.** Termodinamicheskie svojstva individual’nyh veshchestv [Thermodynamic Properties of Individual Substances]. Spravochnik. - M: VINITI Institut vysokih temperatur AN SSSR, 1982. – T. 4. – 456 p.

9 **Denisov, V. M., Istomin, S. A., Podhopaev, O. I., et al.** Kremnij i ego splavy [Silicon and Its Alloys]. – Ekaterinburg: UrO RAN. 2005 . – 467 s.

8 Glushko, V.P. Thermodynamic Properties of Individual Substances: Handbook. Moscow : VINITI, Institute of High Temperatures of the USSR Academy of Sciences, 1982, Vol. 4. – 456 p.

9 **Denisov, V. M., Istomin, S. A., Podkhopaev, O. I., et al.** Silicon and Its Alloys. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005, 467 p.

10 **Makhambetov Ye., Timirbayeva N., Baisanov S., Baisanov A., Shabanov E.** Thermodynamic modeling of phase composition for Fe-Ca-Si-Al system // Metalurgija. 2020. – Vol. 60. – № 1–2. – P. 117–120.

11 **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. – 61(2), P. 305–308.

12 **Akberdin, A. A., Kim, A. S., Orlov, A. S., Sultangaziev, R. B.** Diagram of the phase composition of the Fe-Si-Al system and its isothermal sections CIS Iron and Steel Review, 2022. – 23. – P. 76–80.

13 Metod rascheta termicheskoj ustojchivosti kongruentnyh soedinenij cherez osmoticheskij koefficient B’erruma-Guggengejma na primere sistemy zhelezo-kremnij [Method for calculating the thermal stability of congruent compounds using the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient on the example of the iron–silicon system]/ Tolokonnikova V.V [et al.] // Teoreticheskaya i eksperimental’naya himiya. – 2023. – materialy VII Mezhdunar. Nauch.-prakt.konf., posvyashch. 50-letiyu fakul’teta i 100-letiyu Pervogo dekana prof. R.G.Omarovoj, 26–28 maya. – P. 329–331.

14 **Kulikov, I. S.** Termicheskaya dissociaciya soedinenij [Thermal Dissociation of Compounds]. M. : Metallurgiya, 1966. – 251 p.

15 **Mekhtiev, A., Shabanov, Ye., Issagulov, A., Baissanov, S., et al.** Development of technology for complex aluminum–silicon–chromium alloy using off-grade raw materials. Metalurgija, 2015. – Vol. 54. – № 1. – P. 157–160.

16 **Makhambetov, Ye., Timirbayeva, N., Baisanov, S., Baisanov, A., Shabanov, E.** Thermodynamic modeling of phase composition for the Fe–Ca–Si–Al system. Metalurgija, 2020. – Vol. 60. – № 1–2. – P. 117–120.

Поступило в редакцию 18.11.25.
Поступило с исправлениями 19.11.25.
Принято в печать 03.02.26.

В. В. Толоконникова[1], С. О. Байсанов[2], Г. И. Нәрікбаева[3], А. С. Орлов[4], В. А. Салина[5]

[1,2,3,4]ХМИ атындағы Ж. Әбішев, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[5]Академик Н. А. Ватолина атындағы металлургия институты РҒА УО Ресей Федерациясы, Екатеринбург қ.

18.11.25 ж. баспаға түсті.
19.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
03.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БЬЕРРУМ–ГУГГЕНГЕЙМ КОНЦЕПЦИЯСЫ НЕГІЗІНДЕ ТЕМІР–КРЕМНИЙ ЖҮЙЕСІНДЕ КРЕМНИЙДІҢ КРИСТАЛЛАНУ СЫЗЫҒЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ТҮРІ

Фазалық тепе-теңдіктерді талдаудың жеткіліксіз негізделуі күй диаграммасында жинақталған ауқымды термодинамикалық ақпараттың толық пайдаланылмауына әкеледі. Темір–кремний жүйесі мысалында конгруэнтті балқитын химиялық қосылыстардың диссоциациялану немесе ассоциациялану дәрежесі арқылы балқыманың құрылымын бағалау үшін фазалық тепе-теңдік сызықтарын есептеудің әзірленген әдістемесінің қолданбалығы көрсетілді. Балқымада конгруэнтті балқитын қосылыстың диссоциациялану құбылысы болған жағдайда, осы қосылыстың балқымадағы диссоциация (немесе ассоциация) дәрежесін ескере отырып алынған Бьеррум–Гуггенгеймнің осмостық коэффициенті тәуелділігінің түзу сызықты сипат алатыны анықталды. FeSi қосылысының кристалдану сызығына тән ерекшелік ассоциаттардың түзілуі болып табылады (бастапқы Φ_i графиктері өзгерістің ойыс сипатына ие болған).

Жұмыстың мақсаты – Бьеррум–Гуггенгеймнің осмостық коэффициенті тұрғысынан кремнийдің кристалдану сызығы бойындағы мінез-құлық заңдылықтарын анықтау және FeSi конгруэнтті қосылысының диссоциация (ассоциация) дәрежесі арқылы кремнийдің әртүрлі концентрацияларында қорытпаның фазалық құрамын болжауға арналған әмбебап математикалық өрнек алу.

Алғаш рет темір–кремний жүйесіндегі кремнийдің кристалдану сызығы ликвидус температурасы мен кремний концентрациясын байланыстыратын Шредер–Ле Шателье теңдеуінің жартылай эмпирикалық тәуелділігі түрінде математикалық түрде ұсынылды. Темір–кремний жүйесі мысалында Бьеррум–Гуггенгейм коэффициентін қолдану арқылы кремнийдің кристалдану бетінің аналитикалық сипаттамасының функционалдық түрі негізделіп таңдалды. Fe–Si күй диаграммасының эксперименттік деректеріне аппроксимация жүргізіліп, алынған модельдің дәлдігі мен қолдану аймағы бағаланды. Кремнийдің кристалдану сызығының мінез-құлқына тән ерекшеліктері, кристалдану механизмдерінің өзгеруі және компоненттердің өзара әрекеттесуімен байланысты екені анықталды. Алынған нәтижелер болашақта кристалдану процестерін сандық модельдеуде және теміркремнийлі қорытпалардың қасиеттерін болжауда пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: күй диаграммасы, ассоциация (диссоциация) дәрежесі, фазалық тепе-теңдік сызықтары, Гиббс энергиясы, Бьеррум–Гуггенгейм коэффициенті, фазалардың кристалдану аймақтары.

V. V. Tolokonnikova[1], S. O. Baisanov[2], G. I. Narikbaeva[3], I. Y., Korsukova[4], V. A. Salina[5]

[1,2,3,4]CMI named after Zh. Abishev, Republic of Kazakhstan, Karaganda

[5]Institute of Metallurgy named after Academician N. A. Vatolina UO RAS, Russian Federation, Ekaterinburg

Received 18.11.25.

Received in revised form 19.11.25.

Accepted for publication 03.02.26.

MATHEMATICAL FORM OF THE SILICON CRYSTALLIZATION LINE IN THE IRON–SILICON SYSTEM BASED ON THE BJERRUM–GUGGENHEIM CONCEPT

The insufficient substantiation of phase equilibrium analysis results in the underutilization of the extensive thermodynamic information contained in phase diagrams. Using the iron–silicon system as an example, the applicability of the developed methodology for calculating phase equilibrium lines to evaluate the melt structure through the degree of dissociation or association of congruently melting chemical compounds is demonstrated. It is shown that when dissociation of a congruently melting compound occurs in the melt, the newly obtained values of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient, accounting for the degree of dissociation or association of this compound in the melt, exhibit a linear dependence. A characteristic feature of the crystallization line of the FeSi compound is the formation of associates, as evidenced by the initially concave shape of the Φ_i curves.

The aim of this study is to identify the regular features of silicon behavior along the crystallization line from the standpoint of the Bjerrum–Guggenheim osmotic coefficient and to derive a universal mathematical expression for predicting the phase composition of alloys at various silicon concentrations through the degree of dissociation (association) of the congruently melting FeSi compound.

For the first time, a mathematical expression for the silicon crystallization line in the iron–silicon system is proposed in the form of a semi-empirical Schröder–Le Chatelier equation relating the liquidus temperature to the silicon concentration. Based on the iron–silicon system, a justified selection of the functional form for the analytical description of the silicon crystallization surface is carried out using the Bjerrum–Guggenheim coefficient. Experimental data from the Fe–Si phase diagram are approximated, and the accuracy and applicability range of the obtained model are evaluated. Characteristic features of the silicon crystallization line behavior associated with changes in crystallization mechanisms and component interactions are identified. The obtained results can be used for numerical modeling of crystallization processes and for predicting the properties of iron–silicon alloys.

Key words: phase diagram; degree of association (dissociation); phase equilibrium lines; Gibbs energy; Bjerrum–Guggenheim coefficient; phase crystallization fields.

КӨЛІК

ҒТАМР 73.29.51

https://doi.org/10.48081/BGQF1927

***А. Т. Камысбаева[1], С. Е. Бекжанова[2], Ә. Тәжібайұлы[3]**

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

[3]Қызылорда «Болашақ» университеті, Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.;

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0800-374X

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6272-9567

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0139-8252

*e-mail: ayzhan_kamysbaeva@mail.ru

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ӨНІМДЕРІН ИНТЕРМОДАЛЬДЫ ТАСЫМАЛДАУДЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫНА ӘСЕР ЕТЕТІН ФАКТОРЛАР: ҚАЗАҚСТАН ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ТАЛДАУ

Бұл мақала Қазақстан жағдайында ауыл шаруашылығы өнімдерін интермодальды тасымалдаудың тұрақтылығын айқындайтын факторларды жүйелі талдайды. Жұмыста үшөлшемді тұжырымдамалық негіз ұсынылады (экономикалық, операциялық және сыртқы – геосаяси/экологиялық), ал бағалау индикаторлары уақтылық, зақымдану үлесі, жалпы құн (USD/m), бос қайту үлесі, кешігу жиілігі, көміртек ізі (CO_2, кг/m) және интегралды тәуекел деңгейі (1–5) ретінде бекітіледі. Географиялық ерекшелік (теңізге тікелей шығудың жоқтығы, ұзын маршруттар, климат), маршрут күрделілігі, модальдық комбинациялар, цифрлық шешімдер (Astana-1, CIM/SMGS, KTZ Express, IoT/AI/WMS), нормативтік-құқықтық орта (TIR, COTIF/OTIF, ЕАЭО) және операциялық «тар орындар» (вагон/контейнер тапшылығы, порт/паром өткізу қабілеті, шекаралық рәсімдер, кадр/автоматтандыру, контейнер айналымы) кешенді түрде қарастырылады. Кейстер (KTZ Express – Xi'an Dry Port; DHL Rail Connected; Astana Agro – Үндістан; «Транско» – Ауғанстан; KTZ Express – Түркия, LCL) салыстырмалы талданады; халықаралық бенчмарк (Германия, Қытай, Финляндия, Польша, Сингапур) негізінде саясат және менеджментке арналған KPI панелі мен жол картасы ұсынылады. Талдау интермодальды тұрақтылықтың инфрақұрылымнан бөлек құқықтық-институционалдық және цифрлық интероперабельдікке тәуелді екенін дәлелдейді. Дайындалған индикаторлар мен KPI панелі нақты мониторинг жүргізуге бейімделген. 2025–2027 жылдарға арналған жол картасы тұрақтылық профилін өлшенетін деңгейде жетілдіруге жағдай жасайды.

Кілтті сөздер: интермодальды тасымал; агрологистика; тұрақтылық; цифрлық құжат айналымы; CIM/SMGS; TIR; Орта дәліз; контейнер банкі.

Кіріспе

Ауыл шаруашылығы өнімдерінің логистикасы «уақыт–температура–сақталу» триадасына сүйенеді. Бұзылғыштық пен маусымдық ауытқулар жеткізу тізбегін қатаң ритмге және жоғары сенімділікке итермелейді. Қазақстанның геоэкономикалық конфигурациясы – теңізге тікелей шығудың жоқтығы, құрлықаралық коридорлардың түйінінде орналасуы, 2–7 мың км. экспорттық иіндер және -40°C…+40°C климаттық амплитуда – интермодальды тасымалды құрылымдық түрде күрделендіреді [1,2]. Осы контексте «интермодальды тұрақтылық» ұғымы тек қуатқа (жол, вагон) емес, құқықтық-цифрлық интероперабельдікке, шекара мен порттағы операциялық тәртіпке және модальдық үйлесім сапасына тәуелді кешен ретінде ұғынылуы тиіс [3; 4; 5].

Бұл зерттеудің мақсаты – Қазақстан жағдайында агроөнім интермодаліне әсер ететін факторларды үшөлшемділік арқылы жүйелеу, индикаторлар картасын ұсыну және қолданбалы шешімдер мен саясаттық импликацияларды негіздеу.

Ұсынылатын гипотеза: тұрақтылық деңгейі «құқықтық-цифрлық интероперабельдік × хабтық басқару × контейнерлік айналым теңгерімі × шекара-порт автоматтандыруы» функциясымен анықталады [6].

1. Теориялық негіз және индикаторлар рамкасы

Интермодальды тұрақтылық – әртүрлі көлік түрлерін (т/ж, авто, теңіз/паром, авиа) логистикалық хабтар арқылы үйлестіру қабілеті, оның нәтижесі жеткізу уақыты, құны, сақталуы және экологиялық ізі бойынша өлшенеді. Ғылыми әдебиеттер интермодальды жүк логистикасындағы жоспарлау міндеттерін үш деңгейде жүйелейді: стратегиялық (терминалдардың орналасуы мен желі архитектурасы), тактикалық (қызмет жиілігі, ағымдарды үлестіру) және операциялық (маршруттау мен кестелеу). Осы деңгейлердің интеграциясы транзит уақытының вариативтілігін азайтып, қайта тиеу тәуекелін төмендетеді, нәтижесінде интермодальды тізбектің тұрақтылығы артады [7].

Ұсынылатын индикаторлар төмендегі кестеде келтірілген.

1-кесте – Тұрақтылық индикаторлары және өлшеу логикасы

Индикатор	Мазмұны	Дерек/өлшеу	Басқарушылық әсер
Уақтылық	Жоспардан ауытқу	Станциялық журнал, TMS/EMS	Хаб қуатын, графикті түзету
Сақталу	Бүлінген жүк үлесі	Тіркеу, қабылдау актілері	Орау/температуралық режим, тоңазыту тізбегі
Құн (USD/тг)	Толық шығын	Келісім, тариф картасы	Маршрут/модальдық қайта жоспарлау
Бос қайту	Бос контейнер үлесі	Хаб статистикасы	Кері жүктемені белсендіру
Кешігу жиілігі	Кідіріс жайттары	Оқиға реестрі	«Тар орындарды» жою
CO_2 (кг/т)	Экологиялық із	Эмисс.коэф./LCA	Жасыл модальдық үлесті арттыру
Тәуекел (1–5)	Интегралды баға	Сараптама/оқиға	Қамтамасыз ету, шекті сценарий

Материалдар мен әдістері

Дереккөздер және шектеулер: шолу интермодальды тұрақтылықтың концепциясы мен факторларын сипаттайтын ішкі материалдар мен операциялық бақылауларға сүйенеді; сандық мәндердің бөлігі агрегатталған түрде берілді.

Әдіснама: шолу және факторлық жүйелеу; индикаторлық карта құру; кейстерді бірыңғай критерий бойынша салыстыру; халықаралық тәжірибені шоғырландыру; саясат және менеджмент үшін KPI панелі мен 2025–2027 жж. жол картасын құрастыру.

Жеткізу тізбегінің нәтижелілігін өлшеу стратегия-тактика-операция деңгейлерінде жүргізілуі тиіс; көрсеткіштер құн, уақыт, сапа және икемділік блоктарына біріктіріледі. KPI мақсаттары басқарушылық әрекетпен тікелей байланыстырылғанда ғана тиімділікті арттырады – бұл тәсіл ұсынылған индикаторлар картасын (уақтылық, USD/тг, CO_2, бүліну, бос қайту) институционалды етеді, яғни ресмилендіріп, тұрақтандырады [8].

Нәтижелер және талқылау

География және маршрут күрделілігі

Қазақстанның әлемдік теңізге тікелей шығуы жоқ; Каспийдегі Ақтау-Құрық арқылы ғана пароммен байланыс орнайды. Экспорттық иіндердің ұзындығы 2 000–7 000 км аралығында, бұл уақыт пен құнға кері әсерін тигізеді; климаттың экстремалды өзгеру амплитудасы тоңазытқыштық тәртібі мен арнайы ортада сақтауды талап етеді. Шекаралық өткелдер саны шектеулі және жол табаны айырмашылығы бар бағыттарда вагондарды ауыстыру қажет. Маршруттағы әрбір модальдық ауысу – уақыт пен тәуекелді көбейтетін фактор, сондықтан «ауысуларды минимизациялау» және «хабтық консолидация» – тұрақтылықтың негізгі қағидасы екені белгілі [9, 10].

2-кесте – Қазақстан жағдайында географиялық факторлардың логистикаға әсері

Факторлар	Көрсеткіштер	Логистикалық әсері	Әсерді азайту
Теңізге тікелей шығу жоқ	Тек Каспий (Ақтау/Құрық)	Паромға тәуелділік, ауа райы факторы	Паром графигін тұрақтандыру, порт қуатын өсіру
Ұзын маршруттар	2–7 мың км	Уақыт/құн өсуі	Хабтық консолидацияны, тиімділікті қамтамасыз ету
Климат	-40…+40°C	Тоңазытқышты контейнерлер, арнайы орау, қаптау	Хладотізбектің үздіксіздігі, мониторинг жасау
Шекара өткелдері	Достық, Алтынкөл, т.б.	Кезекте тұру, рәсімдеу уақыты	Алдын ала декларация жасау, сканерлеу

Көлік түрлерінің үйлесімі: жылдамдық–құн–тәуекел комбинациясы. «Теміржол+авто» жүйесі ішкі тарату мен «соңғы миляны» жылдам әрі икемді етеді; «теміржол+теңіз+авто» жүйесі алыс нарықтарға қол жеткізеді, бірақ қайта тиеу көп; «теміржол+әуе» жүйесі бұзылатын және құнды өнімдер үшін уақытты минимумға түсіреді, алайда қымбат. Үйлесімнің сапасы хаб қуатына, контейнерлік айналымға және құжаттық рәсімдеудің бірізділігіне тәуелді.

3-кесте – Интермодальды комбинациялар және қолданылу аймақтары [14]

Комбинация	Қолдану аясы	Артықшылық	Шектеу/тәуекел
Т/ж + авто	Ішкі нарық, соңғы миля	Икемді/жедел	Жол жүктемесі, экология
Т/ж + теңіз + авто	Экспорт (Орта дәліз)	Нарық ауқымы	Көп ауысу, ауа райы
Т/ж + авиа	Бұзылатын/құнды жүк	Ең қысқа транзит	Тариф жоғары, көлем аз
Теңіз + т/ж	Транскаспий	Көлемді партия	Уақыт ұзағырақ

Цифрландыру: Astana-1, CIM/SMGS, KTZ Express, IoT/AI/WMS. «Astana-1» е-кеден арқылы декларацияны онлайн жүргізіп, шекарадағы құжаттық кідірістерді қысқартады [11]. CIM/SMGS екіжүйелі жүккұжаты бюрократияны (қағазбастылықты) азайтып, Еуропа–Азия дәліздерінде бірізділікті күшейтеді [12]. KTZ Express платформасы IoT трекерлерін (температура, соққы, орналастыру) және AI-негізді маршруттау/жүктемені қайта үлестіру алгоритмдерін қолданады; бұл транзит уақытын қысқартуға және «тар орындардағы» кезекті жоюға мүмкіндік береді [13].

Синхромодальды логистиканың табысты болуы нақты бір уақыт деректеріне қолжетімділікке, мүдделі тараптардың бір деңгейлі үйлестіруіне және технологиялық платформа арқылы «үйлестіруші» рөлін күшейтуге тәуелді. Ғылыми еңбектер алты технологиялық амалдарды бөліп көрсетеді: ICT/ITS, Track&Trace/IoT, предиктивті аналитика және оңтайландыру, шешім қабылдауды қолдау жүйелері, стандартталған интерфейстер және интеграциялық платформалар [14].

4-кесте – Негізгі цифрлық шешімдер және әсері

Шешім	Қолданылуы	Әсері	Басқарушылық нәтиже
Astana-1	Е-кеден	Рәсім уақыты азаяды	Кешігуді қысқарту
CIM/SMGS	Біріккен жүккұжат	Қағаз азаяды	Құжаттық қателер азаяды
KTZ Express	Трекинг, жоспарлау	Ашықтық, болжам	Ресурсты дәл бөлу
IoT/WMS/AI	Контейнер/қойма	Температура, соққы, LCA	Бүлінуді азайту, CO_2 төмендету

Нормативтік-құқықтық орта: интероперабельді режимдер

Интермодальды тасымал теміржол, автокөлік, кеден құқығы қиылысында реттеледі; арнайы «интермодальды тасымал туралы» заң жоқ. Халықаралық деңгейде TIR (кедендік транзит), COTIF/OTIF (теміржол тасымалдарының халықаралық құқығы) және CIM/SMGS (біріккен жүккұжат) құжаттық интероперабельділікті қамтамасыз етеді. ЕАЭО ұсынымдары терминологияны, тарифтік үйлесімділікті және «цифрлық көлік дәліздерін» дамыту бағытын айқындайды [9, 14].

5-кесте – Нормативтік-құқықтық режимдер және ықпалы [8: 9; 14; 15; 16]

Құжат/режим	Қамту аясы	Интермодальға әсері	Практикадағы нәтиже
TIR	Кедендік транзит	Пломба/бұзылмай өту	Шекара уақытын қысқарту
COTIF/OTIF	Халықаралық т/ж	Бірлескен кеңістік	Стандарт/ережелерді ұстау
CIM/SMGS	Біріккен жүккұжат	Құжатты біріздендіру	Қағазсыз логистикаға өту
ЕАЭО ұсынымдары	Аймақтық саясат	Терминология/тариф үйлесімі	Кросс-бордер цифрландыру

Агроэкспорттағы интермодальды модельдер. Өнім қасиеттері логистика шешімін айқындайды. Көлемді және аз бұзылатын өнімдер (дән, ұн, май) үшін «т/ж+теңіз» комбинациясы тиімді; бұзылатын және құнды өнімдер (ет, сүт, дайын тағам) үшін т/ж+әуе/тоңазытқыш контейнерлер» қажет; жоғары қосылған құнды тауарлар (бал, кептірілген жеміс) үшін LCL-консолидациясы (жинақталған жүк) ыңғайлы.

Бұзылатын азық-түлік тізбегінде сапа мен қауіпсіздіктің негізгі детерминанты – температуралық менеджмент: TTI-индикаторлар, деректер логгерлері және тәуекелге негізделген мониторинг тоңазыту тәртібінің сақталуын дәлелді түрде бақылауға мүмкіндік береді. Температуралық «зиян» жайттарын азайту халықаралық тәжірибеде бүліну үлесін және қайтарым шығындарын қысқартады [17].

6-кесте – Агроөнімдерге арналған интермодальды модельдер [13;18]

Модель түрі	Өнімдер	Негізгі бағыт	Артықшылық	Шектеу
Т/ж + теңіз	Дән, ұн, май, шрот	Ақтау–Баку–Қара теңіз/Түркия/Үндістан	Көлемдік экономика	Ауа райы/ паромға тәуелді
Т/ж + авто	Ұн, арпа, жем	Қостанай–ОА елдері	Икемділік, соңғы миля	Көп шекара, қауіпсіздік тәуекелі
Т/ж + авиа	Ет/сүт, дайын өнім	Алматы–аймақ/ОА	Уақыт минимумы	Қымбат, аз көлем
LCL (хаб)	Бал, кептірілген өнім	Шымкент–Стамбұл т.б.	Консолидация	Хаб өткізу шегі

Операциялық тұрақтылық: «тар орындар» картасы. Маусымдық науқанда жабық вагондарға сұраныс ұсыныстан артқандықтан жүк айналымы баяулайды; контейнерлер жиі Қытай бағытына жүктеліп, кері бағыт бос қайтады. Ақтау/Құрық порттарының өткізу қабілеті паром кестесіне және крандық жабдықтарға тәуелді; шекарада құжатты қолмен рәсімдеу, жол табаны айырмашылығы, мерекелік/карантиндік шектеулер кезектер тудырады.

Ауылдық/шекаралық хабтарда кадр мен автоматтандыру тапшылығы бар. Контейнер айналымы 18–22 күнге созылуы – агроөнім үшін тым ұзақтық етеді [19].

Интермодальды жүк ағындарының сенімділігі бұзылуларға сезімтал және оны өлшеудің негізгі метрикаларына орташа кешігу уақыты мен жойылған пойыздар саны жатады. Тұрақтылықты арттыру үшін буфер-уақыт, баламалы маршруттар және резервтік қуатты («hot-standby») жоспарлау ұсынылады [3].

7-кесте – Операциялық «тар орындар» және ықтимал шешімдер

«Тар орын»	Сипаттама	Ықтимал шешім	Күтілетін әсер
Вагон/контейнер тапшылығы	Маусымдық, тозған парк	Паркті жаңарту, флотты теңгеру	Экспорт шығыны ↓, ритм ↑
Порттан өткізу	Паром/кран/ автотерминал	Графикті тұрақтандыру, кран паркі	Кідіріс ↓, өткізу қабілеті ↑
Шекара рәсімдері	Қолмен жүктеу/көп тексеріс	Алдын ала декларациялау, сканерлеу	Өту уақыты ↓, вариатив ↓
Кадрлық тапшылық/ автоматтандыру	Қол еңбегі басым	WMS/IoT енгізу, оқыту	Сапа ↑, уақыт ↓
Контейнер айналымы	18–22 күн аралығында	Контейнерлер банкі, кері жүк	Бос қайту ↓, айналым циклы ↓

Кейстерді салыстырмалы талдау

8-кесте – Кейстер матрицасы (операциялық/техникалық/құжат/қауіпсіздік/экономика)

Кейс	Операциялық тұрақтылық	Техникалық үйлесім	Құжаттық режим	Сақталу/ қауіпсіздік	Экономика
KTZ Express – Xi'an Dry Port	Жоғары (контейнерлік пойыз)	Т/ж инфра-құрылым бар	CIM/ SMGS қолданысы	Жақсы, кері бос қайту бар	Орташа–жақсы
DHL Rail Connected	Өте жоғары (LCL, авто -маттандыру)	Көп ел стандарты	Қағазсыз -дыққа жақын	Жақсы	Жоғары тариф
Astana Agro – Үндістан	Орташа (5 модаль)	Паром+т/ж+ теңіз+авто	Күрделі	Тоңазыту тәртібі қажет	Шығын жоғары
«Транско» – Ауғанстан	Төмен (қауіпсіздік)	Т/ж+авто	Рәсімдеу күрделілігі	Қауіп/ тәуекел жоғары	Вариатив жоғары
KTZ Express – Түркия (LCL)	Жоғары (тұрақты сервис)	Т/ж+теңіз+ авто	Біріздендіру бар	Жақсы	Орташа

Халықаралық бенчмарк және локализация. Германия: «порт–т/ж» интеграциясының бірыңғай цифрлық платформасы ресурс бөлуді автоматтандырып, «stay time»-ды қысқартады.

Қытай: кері жүктемені институционалды теңгеру контейнер айналымын жылдамдатады.

Финляндия: электронды кезек және алдын ала декларациялау шекарадағы тоқтаусыз тексеруге мүмкіндік береді [20].

Польша: агрологистика орталықтары өнімді консолидациялап, экспортқа толық дайын күйге келтіреді.

Сингапур: Smart Logistics Hub – WMS/IoT/AI синергиясы арқылы уақыт пен адам ресурсын 40–50 % қысқартады.

Қазақстан үшін бұл тәжірибелер коридор/хаб/шекара спецификасына бейімдеу арқылы іске асыруға болады.

SWOT-қорытындылар

9-кесте Қазақстан жағдайында интермодальды агрологистиканың SWOT-профилі

Мықты жақтары: – Геостратегиялық көпір (Қытай–Еуропа); – агроэкспорт әлеуеті; – ҚТЖ/KTZ Express желілері; – аймақтық және халықаралық келісімдерге қатысу	Әлсіз жақтары: – Порт/қойма инфрақұрылымының шектеулілігі; – контейнер теңгерімсіздігі (бос қайту); – кадр/ИТ тапшылығы; – е-құжаттандырудың жеткіліксіздігі
Мүмкіндіктер: – WMS/IoT/AI енгізу; – өңірлік агрохабтар; – LCL және Rail-Air; – кері жүктемені ынталандыру; – жасыл логистика	Қауіптер: – Геосаяси/ауа райылық форс-мажор; – инфрақұрылым тозуы; – бәсекелес дәліздер; – стандарттардың алшақтығы

Саясат және менеджментке арналған жол картасы (2025–2027 ж.ж.)

Қойылатын мақсат: «кешігу жиілігі – бос қайту – USD/тг – CO_2» төрттігін бір мезгілде жақсарту.

Белгіленген бағыттар:

(1) Құжат айналымын толық цифрландыру (CIM/SMGS, TIR);

(2) Шекаралық қызметті автоматтандыруы;

(3) Порт–паром–терминал қуатын арттыру;

(4) Контейнер айналымын теңгеру;

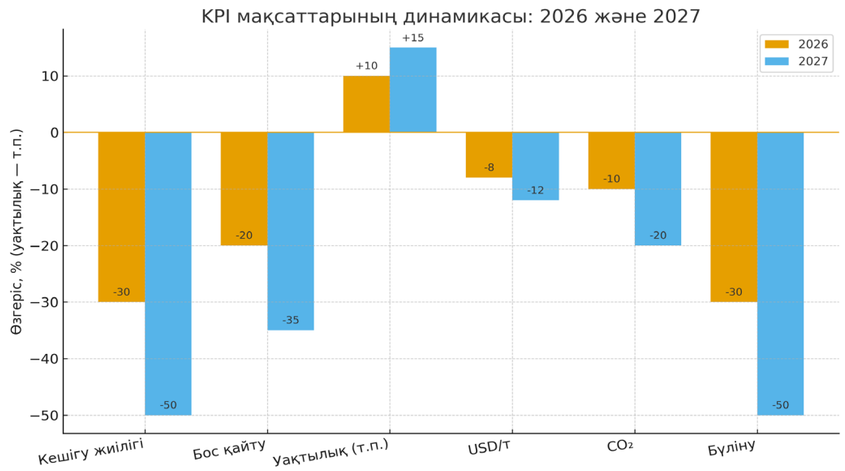
(5) WMS/IoT/AI толық циклі.

Аталған мақсат сәтті орындалатын жағдайда 10-кестеде көрсетілгендей KPI панелі оң динамикалық өзгерістерге алып келеді.

10-кесте – KPI панелі (базалық жағдай → мақсат)

KPI	2026	2027	Ескерту
Кешігу жиілігі (рет/ай)	↓ 30%	↓ 50%	Шекара/порт
Бос қайту (%)	↓ 20%	↓ 35%	Контейнер банкі
Уақтылық (%)	↑ 10%	↑ 15%	Хабтық жоспарлау
USD/тг	↓ 8%	↓ 12%	Техникалық/құжаттық
CO_2 (кг/т)	↓ 10%	↓ 20%	Жасыл микс
Бұлiну (%)	↓ 30%	↓ 50%	Тіркеу/IoT

1-суретте 2026 және 2027 жылдарға болжанған KPI мақсаттарының динамикасы көрсетілген.



1 сурет – KPI мақсаттарының динамикасы: 2026, 2027 жылдарға

Интермодальды тасымалдардың тұрақтылығын интегралдық бағалау әдістемесі. Интермодальды тасымалдардың тұрақтылығын интегралдық бағалау әдістемесі ретінде көрсеткіштерді қалыпқа келтіру (нормализациялау) амалын қолдануға болады. Ол үшін әрбір көрсеткіш келесі өрнекпен өлшемсіз түрге келтіріледі:

$$N_i = \frac{X_i - X_i^{min}}{X_i^{max} - X_i^{min}},$$

мұнда:

X_i – көрсеткіштің нақты немесе мақсатты мәні,

X_i^{max}, X_i^{min} – эталондық шектер (бенчмарк бойынша).

«Неғұрлым аз болғаны жақсы» көрсеткіштер үшін (кешігулер, CO_2, USD/тг) қалыпқа келтіру өрнегі:

$$N_i = \frac{X_i^{max} - X_i}{X_i^{max} - X_i^{min}}.$$

Интермодальды тасымалдың тұрақтылығын сипаттайтын интегралдық индекс ұсынылады:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \Delta N_i,$$

мұнда: ΔS – тұрақтылықтың интегралдық индексінің өзгеруі;
ΔN_i – қалыпқа келтірілген KPI-дің салыстырмалы жақсаруы;
w_i – көрсеткіштің салмақ коэффициенті, $\sum w_i = 1$.

Ұсынылатын салмақтар үлесінің жүйесі 11-кестеде көрсетілген.

11-кесте

Көрсеткіштер тобы	Көрсеткіштер	Салмақ үлесі
Уақыттық	уақтылылық, кешігу жиілігі	0,30
Экономикалық	USD/тг, бос қайту	0,25
Сапалық	зақымданулар, тоңазыту тізбегін сақтау	0,20
Экологиялық	CO_2	0,15
Тәуекел	интегралдық тәуекел (1–5)	0,10

Салмақтар үлесінің жүйесін ұсынуда агрологистика уақыт факторына және жүктің сақталуына аса сезімтал, одан кейін құн және экологиялық факторларының маңыздылығы ескерілген.

Тұрақтылық индексін интерпретациялау үшін келесі деңгейлерге бөлеміз (кесте 12):

12-кесте

S мәні	Тұрақтылық деңгейі
$S \geq 0,80$	жоғары
$0,60 \leq S < 0,80$	орташа
$0,40 \leq S < 0,60$	төмен
$S < 0,40$	критикалық

Осылайша, уақтылылық, құн, экологиялық тиімділік және жүктің сақталуы көрсеткіштерінің кешенді жақсаруы интермодальды тасымалдардың тұрақтылығының интегралдық индексінің аддитивті өсуіне алып келеді. 10-кестеде ұсынылған KPI мақсатты бағдарларына қол жеткізілген жағдайда тұрақтылық индексі орта есеппен 0,18÷0,25 тармаққа өсіп, орташа-төмен деңгейден тұрақты деңгейге өтуді қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Интермодальды агрологистикадағы тұрақтылық – инфрақұрылым қуатының ғана емес, құқықтық-цифрлық интероперабельдік пен операциялық тәртіптің синергиясы. Қазақстан үшін құжат айналымын цифрландыру, шекаралық рәсімдерді автоматтандыру, порттық-хабтық инфрақұрылымды дамыту және контейнер паркін теңгерімдеу шаралары кешенін («е-құжат–шекара автоматтандыруы–порттық қуат–контейнер айналымы–WMS/IoT/AI» пакетін) ойдағыдай іске асыру уақтылықты арттырып, құн мен CO_2-ті төмендетеді, ал сапа мен қауіпсіздік көрсеткіштерін жақсартады.

KPI болжамды мәндері (кешігулердің 30÷50 %-ға, бос қайтудың 20÷35 %-ға, CO_2 көлемінің 10÷20 %-ға төмендеуі) 2026–2027 жылдарға арналған жол картасы іске асырылған жағдайда тұрақтылықтың интегралдық индексінің 0,55÷0,60

(орташа-төмен деңгей) диапазонынан 0,75÷0,82 (тұрақты деңгей) диапазонына өтуіне сәйкес келеді.

Яғни, ұсынылған индикаторлар мен KPI панелі практикалық мониторингтеуге дайын, ал жол картасының жобасына сәйкес 2026–2027 жылдары интермодальды тасымалдардың тұрақтылық индексінің базалық сценариймен салыстырғанда 20÷30 %-ға өсуіне сәйкес келеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Қазақстан Республикасының «Теміржол көлігі туралы» Заңы [Электронды ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

2 Қазақстан Республикасының «Автомобиль көлігі туралы» Заңы [Электронды ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

3 **Kramarz M., Przybylska E., Wolny M.** Reliability of the intermodal transport network under disrupted conditions in the rail freight transport // Research in Transportation Business & Management. – 2022. – Vol. 44. – Art. 100686. – https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100686

4 Интермодальды комбинациялар (т/ж+теңіз+авто; т/ж+авто; т/ж+авиа «Rail–Air»): анықтамалық-әдістемелік материал [Электронды ресурс]. – Салалық түсіндірме материалдары.

5 Қазақстан Республикасының «Көлік туралы» Заңы (1994) [Электронды ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

6 Қазақстан Республикасының Кеден кодексі (ЕАЭО негізінде) [Электронды ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

7 **Caris A., Macharis C., Janssens G. K.** Planning Problems in Intermodal Freight Transport: Accomplishments and Prospects // Transportation Planning and Technology. – 2008. – Vol. 31. – № 3. – P. 277–302. – https://doi.org/10.1080/03081060802086397

8 **Gunasekaran A., Patel C., Tirtiroglu E.** Performance measures and metrics in a supply chain environment // International Journal of Operations & Production Management. – 2001. – Vol. 21. – № 1–2. – P. 71–87. – https://doi.org/10.1108/01443570110358468

9 ЕАЭО «Цифрлық көлік дәліздері»: тұжырымдамалық құжаттар мен материалдар [Электронды ресурс]. – Еуразиялық экономикалық комиссия. – URL: https://eec.eaeunion.org (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

10 ҚР ҚМ Мемлекеттік кірістер комитеті. «Астана-1» ақпараттық жүйесі (электронды кеден): ресми бет және анықтамалық материалдар [Электронды ресурс]. – URL: https://kgd.gov.kz (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

11 CIM/SMGS Consignment Note Manual (GLV-CIM/SMGS) [Электрон. ресурс]. – Халықаралық теміржол көлігі комитеті (CIT). – URL: https://www.cit-rail.org (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

12 KTZ Express. Мультимодальды/интермодальды сервистер, онлайн-трекинг, IoT/WMS/AI туралы мәлімет [Электронды ресурс]. – Ресми сайт. – URL: https://www.ktzexpress.kz (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

13 **Manerba D., Giusti R., Bruno G.** Synchromodal logistics: Critical success factors and enabling technologies // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2019. – Vol. 129. – P. 92–110. – https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.07.009

14 Customs Convention on the International Transport of Goods under Cover of TIR Carnets (TIR Convention, 1975) [Электронды ресурс]. – UNECE ресми порталы. – URL: https://unece.org (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

15 COTIF 1999 – Convention concerning International Carriage by Rail [Электрон. ресурс]. – OTIF ресми сайты. – URL: https://otif.org (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

16 **Aung M. M., Chang Y. S.** Temperature management for the quality assurance of a perishable food supply chain// Food Control. – 2014. – Vol. 40. – P. 198–207. – https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.016

17 KTZ Express. Ақтау–Баку бағыты бойынша жүктің қайта үлестірілуі және транзит уақытының қысқаруы туралы хабарлама [Электронды ресурс]. – Ресми сайт / жаңалықтар бөлімі. – URL: https://www.ktzexpress.kz (Қолжетімділік күні: 02.02.2026).

18 Операциялық тұрақтылық факторлары (контейнер айналымы, «контейнер банкі» тұжырымдамасы): ұсыныстар блогы [Ішкі жұмыс материалы].

19 Екіжақты келісімдер (ҚХР, Түркия, Әзербайжан–Грузия) бойынша ТМТМ/Орта дәліздің құжат/тариф үйлесімі жөніндегі ресми баспасөз хабарламалары [Электронды ресурс]. – Үкіметтік және салалық уәкілетті органдар сайттары. – (қолжетімділік күні: 02.02.2026).

REFERENCES

1 Qazaqstan Respublikasy. Temirzhol koligi turaly Zany [Law of the Republic of Kazakhstan «On Railway Transport»] [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz (accessed 02.02.2026).

2 Qazaqstan Respublikasy. Avtomobil koligi turaly Zany [Law of the Republic of Kazakhstan «On Automobile Transport»] [Electronic resource]. – Adilet legal information system. – https://adilet.zan.kz (accessed 02.02.2026).

3 **Kramarz, M., Przybylska, E., Wolny, M.** Reliability of the intermodal transport network under disrupted conditions in the rail freight transport. Research in Transportation Business & Management, 2022, Vol. 44. – Art. 100686. – https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100686

4 Intermodaldy kombinaciyalar (t/zh + teniz + avto; t/zh + avto; t/zh + avia «Rail–Air»): anyqtamalyq-adistemelik material [Intermodal combinations (railway + sea + road; railway + road; railway + air «Rail–Air»): reference and methodological material] [Electronic resource]. Industry explanatory materials.

5 Qazaqstan Respublikasy. Kolik turaly Zany (1994) [Law of the Republic of Kazakhstan «On Transport»] Adilet legal information system. – [Electronic resource]. https://adilet.zan.kz (accessed 02.02.2026).

6 Qazaqstan Respublikasy. Keden kodeksi (EAEO negizinde) [Customs Code of the Republic of Kazakhstan (based on the EAEU)] Adilet legal information system. [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz (accessed 02.02.2026).

7 C**aris, A., Macharis, C., Janssens, G. K.** Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects. Transportation Planning and Technology, 2008, Vol. 31(3). – P. 277–302. – https://doi.org/10.1080/03081060802086397

8 **Gunasekaran, A., Patel, C., Tirtiroglu, E.** Performance measures and metrics in a supply chain environment. International Journal of Operations & Production Management, 2001, Vol. 21(1–2). – P. 71–87. – https://doi.org/10.1108/01443570110358468

9 EAEO. Cifrlyq kolik dalizderi: tuzhyrymdamalyq quzhattar men materialdar [Digital transport corridors: conceptual documents and materials] Eurasian Economic Commission. [Electronic resource]. – https://eec.eaeunion.org (accessed 02.02.2026).

10 Memlekettik kirister komiteti QR QM. Astana-1 aqparattyq zhuyesi (elektrondy keden): resmi bet zhane anyqtamalyq materialdar [«Astana-1» information system (electronic customs): official page and reference materials] [Electronic resource]. – https://kgd.gov.kz (accessed 02.02.2026).

11 International Rail Transport Committee (CIT). CIM/SMGS Consignment Note Manual (GLV-CIM/SMGS) [Electronic resource]. – https://www.cit-rail.org (accessed 02.02.2026).

12 KTZ Express. Multimodaldy/intermodaldy servister, onlain-treking, IoT/WMS/AI turaly malimet [Multimodal/intermodal services, online tracking, IoT/WMS/AI information] Official website. – [Electronic resource]. – https://www.ktzexpress.kz (accessed 02.02.2026).

13 **Manerba, D., Giusti, R., Bruno, G.** Synchromodal logistics: critical success factors and enabling technologies. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019. – Vol. 129. – P. 92–110. – https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.07.009

14 Customs Convention on the International Transport of Goods under Cover of TIR Carnets (TIR Convention, 1975) [Electronic resource]. – https://unece.org (accessed 02.02.2026).

15 OTIF. Convention concerning International Carriage by Rail (COTIF 1999) [Electronic resource]. – https://otif.org (accessed 02.02.2026).

16 **Aung M. M., Chang Y. S.** Temperature management for the quality assurance of a perishable food supply chain. Food Control, 2014. – Vol. 40. – P. 198–207. – https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.016

17 KTZ Express. Aqtau–Baku bagyty boiinsha zhuktin qaita uilestirilui zhane tranzit uaqytynyn qysqaruy turaly habarlama [Notice on cargo redistribution and reduction of transit time on the Aktau–Baku route] Official website / news section. [Electronic resource]. – https://www.ktzexpress.kz (accessed 02.02.2026).

18 Operaciyalyk tyraktylyk faktorlary (kontejner ajnalymy, «kontejner banki» tyzhyrymdamasy): ysynystar blogy [Ishki zhymys materialy]. Operaciyalyq turaqtylyq faktorlary (konteiner ainalymy, «konteiner banki» tuzhyrymdamasy): usynystar blogy

[Operational resilience factors (container turnover, «container bank» concept): proposal block] [Internal working material].

19 Ekizhaqty kelisimder (QHR, Turkiya, Azerbaizhan–Gruziya) boiinsha TMTM/Orta dalizdin quzhat/tarif uilesimi zhonindegi resmi baspasoz habarlamalary [Official press releases on document and tariff harmonization of the TITR/Middle Corridor under bilateral agreements (PRC, Türkiye, Azerbaijan–Georgia)] [Electronic resource]. Governmental and sectoral authorized bodies' websites. Accessed 02.02.2026.

05.01.26 ж. баспаға түсті.
03.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
13.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. Т. Камысбаева[1], С. Е. Бекжанова[2], Ә. Тәжібайұлы[3]
[1,2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Кызылординский университет «Болашақ», Республика Казахстан, Кызылорда қ.
Поступило в редакцию 05.11.26.
Поступило с исправлениями 03.12.26.
Принято в печать 13.02.26.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ИНТЕРМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ: АНАЛИЗ НА ПРИМЕРЕ КАЗАХСТАНА

В данной статье системно анализируются факторы, определяющие устойчивость интермодальных перевозок сельскохозяйственной продукции в условиях Казахстана. В исследовательской работе предлагается трёхмерная концептуальная основа (экономическая, операционная и внешняя – геополитическая/экологическая), а в качестве индикаторов оценки закреплены: своевременность, доля повреждений, совокупная стоимость (USD/m), показатель порожнего возврата, частота задержек, углеродный след (CO_2, кг/m) и интегральный уровень риска (по шкале 1–5).

Комплексно рассматриваются географические особенности (отсутствие прямого выхода к морю, протяжённость маршрутов, климатические условия), сложность маршрутов, модальные комбинации, цифровые решения (Astana-1, CIM/SMGS, KTZ Express, IoT/AI/WMS), нормативно-правовая среда (TIR, COTIF/OTIF, ЕАЭС) и операционные «узкие места» (дефицит вагонов и контейнеров, пропускная способность портов и паромов, пограничные процедуры, кадровые вопросы и автоматизация, оборот контейнеров).

В статье проведён сравнительный анализ кейсов (KTZ Express – Xi'an Dry Port; DHL Rail Connected; Astana Agro – Индия; «Транско» – Афганистан; KTZ Express – Турция, LCL). На основе международного бенчмарка (Германия, Китай, Финляндия, Польша, Сингапур) предложена дорожная карта и KPI панель для политики и менеджмента. Анализ показывает, что устойчивость интермодальных перевозок зависит не только от инфраструктуры, но и от правово-институциональной базы и цифровой интероперабельности. Разработанные индикаторы и панель KPI адаптированы для практического мониторинга. Дорожная карта на 2025–2027 годы создаёт условия для измеримого укрепления профиля устойчивости.

Ключевые слова: интермодальные перевозки; агрологистика; устойчивость; электронный документооборот; CIM/SMGS; TIR; Средний коридор; контейнерный банк.

A. T. Kamysbayeva[1], S. E. Bekzhanova[2], A. Tazhibayuly[3]
[1,2]Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Bolashak University, Republic of Kazakhstan, Kyzylorda
Received 05.01.26.
Received in revised form 03.02.26.
Accepted for publication 13.02.26.

FACTORS AFFECTING THE SUSTAINABILITY OF INTERMODAL TRANSPORTATION OF AGRICULTURAL PRODUCTS: AN ANALYSIS OF THE CASE OF KAZAKHSTAN

This article systematically analyzes the factors that determine the sustainability of intermodal transportation of agricultural products in Kazakhstan. The study proposes a three-dimensional conceptual framework (economic, operational, and external – geopolitical/ecological), while the evaluation indicators are defined as timeliness, damage rate, total cost (USD/t), share of empty return, delay frequency, carbon footprint (CO_2, kg/t), and integrated risk level (1–5). Geographic specifics (lack of direct sea access, long routes, climate), route complexity, modal combinations, digital solutions (Astana-1, CIM/SMGS, KTZ Express, IoT/AI/WMS), regulatory and legal environment (TIR, COTIF/OTIF, EAEU), and operational "bottlenecks" (shortage of wagons/containers, port/ferry capacity, border procedures, workforce/automation, container turnover) are considered comprehensively. Case studies (KTZ Express – Xi'an Dry Port; DHL Rail Connected; Astana Agro – India; "Transco" – Afghanistan; KTZ Express – Turkey, LCL) are comparatively analyzed; based on the international benchmark (Germany, China, Finland, Poland, Singapore), a roadmap and a KPI dashboard for policy and management have been proposed. The analysis demonstrates that intermodal sustainability depends not only on infrastructure but also on legal-institutional and digital interoperability. The developed indicators and KPI dashboard are tailored for practical monitoring. The 2025–2027 roadmap provides conditions for measurable enhancement of the sustainability profile.

Keywords: intermodal transportation; agrologistics; sustainability; digital document flow; CIM/SMGS; TIR; Middle Corridor; container bank.

ҒТАМР 73.31.41

https://doi.org/10.48081/BGQF1928

У. А. Мурзахметова[1], Н. С. Сембаев[2], А. Р. Қабашев[3], М. Р. Қабашева[4], А. М. Алшынова[5]

[1,3,4]Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты»,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[5]Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5429-023X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3032-1094
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7097-9292
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1860-5211
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0161-0244
*e-mail: u_murzakhmetova@mail.ru

КӨЛІК ҚҰРАЛДАРЫНЫҢ БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ІСТЕН ШЫҒУЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ҚОСЫМША БӨЛШЕКТЕРДІ ПАЙДАЛАНУ

Автомобиль көлігін пайдалану тиімділігі көбінесе оның жылжымалы құрамының техникалық пайдалану сенімділігіне байланысты. Көлік құралдарының сенімділігі олардың дұрыс құрылысына және жұмыс кезінде олардың жұмыс қабілеттілігін сақтаудың дұрыс стратегиясына байланысты. Бұл стратегияны іске асыру көбінесе көлік құралдарының сенімділік сипаттамаларын (ақауларын) диагностикалық болжау әдістері мен құралдарын қамтитын заманауи ақпараттық технологияларды қолданумен анықталады. Автокөліктердің жұмыс қабілеттілігін сақтау саласында қазіргі заманғы технологияларды қолдану олардың қауіпсіздік жағдайларын қамтамасыз етуге, құрамдас бөліктердің ұзақ мерзімділігін пайдалану дәрежесін арттыруға, жөндеу кезінде тоқтап қалуды азайтуға, қосалқы бөлшектер мен материалдардың шығынын азайтуға және т.б.

Жұмыста тіркемесімен автокөліктің екі түрлі маркасының элементтерінің істен шығуын зерттеудің статистикалық талдауы берілген. Автомобильдердің бөлшектерінің, тораптары мен зерттелген ақаулары анықталған қосалқы бөлшектерге қажеттіліктің пайда болуының кездейсоқ шамаларының таралу заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді. Элементтердің істен шығуының және автомобильдердің қосалқы бөлшектерінің пайдаланылуының қарастырылған себептері асимметриялық болу заңдылықтары бар ақаулардың пайда болу себептерінің көпшілігі конструкцияның жетілмегендігін, технологиялық құрастыру үдерістерінің бұзылуын және жылжымалы құрамның жұмыс жағдайларына жарамсыздығын көрсететінін анықтауға мүмкіндік берді.

Кілтті сөздер: жүк тасымалдайтын көліктер, қосалқы бөлшектер, бөлшектер диагностикасы, тораптар диагностикасы, бөлшектердің істен шығуы, техникалық қолдану, жөндеу.

Кіріспе

Машина жасаудың жалпы қағидаларына сәйкес машина бөлшектерін тексеріп, оның бөлшектерін дайындау және жөндеудің сапасына ерекше назар аудару – бұл автокөліктік кәсіпорындарының негізгі мақсатының бірі – болып табылады. Автокөліктерді жөндеуге жұмсалатын уақытты қысқарту және оның диагностикасын өз мезгілінде дұрыс жасаумен өндірістің экономикалық тиімділігін арттыруға болады. Ол үшін автокөлік өндірісінің қоймасындағы көлікті жөндеуге қажетті бөлшектері мен тораптарының қосалқы бөлшектерінің болуын қамтамасыз ету қажет.

Кәсіпорынның стратегиясына қол жеткізу үшін, көбінесе көлік құралдарының сенімділік сипаттамаларын, олардың ақауларын диагностикалық болжау әдістері мен құралдарын қамтитын заманауи ақпараттық технологияларды қолданумен анықтаймыз. Автокөліктердің жұмыс қабілеттілігін сақтау саласында қазіргі заманғы технологияларды қолдану олардың қауіпсіздік жағдайларын қамтамасыз етуге, құрамдас бөліктердің ұзақ мерзімділігін пайдалану дәрежесін арттыруға, жөндеу кезінде тоқтап қалуды азайтуға, қосалқы бөлшектер мен материалдардың шығынын азайтуға және т.б. болады.

Бұл әсіресе қалааралық және халықаралық тасымалдауды жүзеге асыратын ауыр жүкті көліктер үшін өте маңызды, өйткені мұндай көліктерді жөндеу олар сапардан оралғанға дейін алдын ала жоспарлануы керек. Дегенмен, шектеулі айналым қаражаты және қосалқы бөлшектердің жоғары құны жағдайында кәсіпорындар қосалқы бөлшектердің қоймалық қорын қалыптастыруға және бұрынғы пайдалану тәжірибесі мен интуициясына сүйене отырып, қосалқы бөлшектерді сатып алуға мәжбүр болады [1; 2].

Қосалқы бөлшектерге және басқа қажетті ресурстарға қажеттілікті есептеумен көліктерге техникалық қызмет көрсету және жөндеуде қолданылатын қосалқы бөлшектерге сұраныстың өзгеруі туындайды. Есептеу барысында көлік құралының техникалық жағдайына жүйелі бақылауды қамтамасыз ететін, құрастыру қондырғыларының тозу уақытын баяулату бойынша жұмыстарды орындауды, компоненттердің істен шығуы мен бұзылуының нақты уақыттарын анықтайды

Нақты тұтынушының сұранысы негізінде қосалқы бөлшектердіңқажеттілігін экспоненциалды тегістеумен болжау әдістерінің негізінде анықтауға мүмкін бар [2;3]. Осы мақсатта қосалқы бөлшектерді тұтынудың динамикалық қатарын, жылжымалығын экстраполяциялау әдістерін қолданумен анықтайды [4; 5].

Зерттеу мақсаттары – ауыстырылатын бөлшектердің түрі мен санын анықтау, тораптар мен агрегаттар құрамдас бөлшектерін қаншалықты жиі ауыстырылатынын және ақауларының себептерін анықтаумен пайдаланудың мерзімін бағалау болып отыр.

Аталып отырған мақсаттар автокөліктерге техникалық қызмет көрсету мен жөндеуді жақсартуға ғана емес, сондай-ақ олардың сенімділігін арттыру және ұзақ мерзімді пайдалануды қамтамасыз ету бойынша ұсыныстар жасауға көмектеседі.

Материалдар және әдістері

Зерттеуді жүргізу үшін «Жүк тасымалы» компаниясының автокөлік гаражынан, 2009 және 2014 жылдары шығарылған Mercedes-Benz 1844 Actros LS және Volvo FH 1242 автокөліктерін Schmitz және Krone жартылай тіркемелерімен таңдалды. Автокөліктердің істен шыққан бөлшектерінің ауыстырылуы туралы деректерді кәсіпорынның 2020 жылдан 2024 жылға дейінгі кезеңде қолданылған көліктер санынан жиналған. Автокөліктердің орташа жүрісі шамамен 700 мың шақырымды құрады. Автокөліктер 1-ші және 2-ші санаттағы жолдарда жұмыс жасады. Автокөліктердің басқару топтары – агрегаттар, механизмдер мен жүйелер тораптарын ауыстыру туралы деректерді жинаумен орындалды [6; 7].

Ақаулардың статистикалық сипаттамаларын құру үшін жұмыс уақыты (жүріс) туралы ақпарат индикатордың ең жоғары және ең төменгі мәндерін, тәжірибелік ықтималдықты, тәжірибелік жиілікті, стандартты ауытқуды және вариация коэффициентінің мәнін анықтау арқылы аралықтарға бөлінді.

Нәтижелер және талқылау

Іштен шығуытуралы деректер бойынша мәліметтерді олардың интервал аралықорташа уақытпен мына формуламен анықтайды:

$$n = 1 + 1{,}44 \cdot ln(N) \quad (1)$$

Бөлшектердің істен шығу жылдамдығы төмендегі формуламенанықталынады:

$$\lambda = \frac{n(l)}{N(l) \cdot \Delta l} \quad (2)$$

мұндағы: $n\ (l)$ $-\Delta l$ – жүріс бірлігіндегі іштен шығу саны;
$N(l)$ –істен шыққан тораптар саны, бірлік саны.

Тәжірибеде негізгі таралу заңын бір мағыналы таңдау үшін априорлық ақпарат жеткіліксіз болғандықтан, олар қолайлылық критерийлеріне жүгінеді. Бұл жағдайда 0,05-тен асатын маңыздылық деңгейі бастапқы таңдалған гипотезаның дұрыстығын көрсетеді.

Таңдалған гипотезаларды бағалау AIC ақпараттық критерийі (Akaike›s information criterion) негізінде жүргізілді [2]:

$$AIC = -2lnL(\hat{\theta}) + 2k + \frac{2k(k+1)}{(n-k-1)} \quad (3)$$

мұндағы: k–гипотеза сипаттамаларының саны;
$(\hat{\theta})$ – таңдалған гипотезаның сипаттамаларын бағалау векторы;

$lnL(\hat{\theta})$ – максималды ықтималдық функциясының логарифмі.

Соңғысын көбінесе ескермейді және қолданылмайды, өйткені формуланың бұл бөлігі шағын үлгілерді талдау кезінде критерийді теңестіру үшін қажет.

Максималды ықтималдық функциясының логарифмін келесі түрде жазып беруге болады:

$$lnL(\hat{\theta}) = \sum_{i=1}^{n} \delta_i \, lnf(t_i, \hat{\theta}) + \sum_{i=1}^{n} (1 - \delta_i) lnS(t_i, \hat{\theta}) \quad (4)$$

мұндағы: t_i,i = 1, 2, …, n – ұзақтылықтардыңэмпириялық массиві,сағ.;
n – ұзақтылықтың массив саны;
$\delta_i, i = 1, 2, \ldots, n$ – сәйкесті цензурлеу индикаторының массиві;

$f(t_i, \hat{\theta})$ – нөлдік гипотезаның тығыздық функциясы;

$S(t_i, \hat{\theta})$ – таңдалған өмірлік функциясын бағалау.

Бірнешестатистикалық модельдердің ішінде ең төменгі AIC критерий мәні бар модель ең адекваттысы болып саналады.

Автокөліктердің агрегаттары мен тораптарының қосалқы бөлшектерінің істен шығуын және ауыстырылуын бағалау және жұмыс барысында агрегаттар мен элементтердің сенімсіздігін анықтауға мүмкіндік береді (1-сурет).

Зерттелетін автокөліктердің жалпы сипаттамалары алынды (1-кесте).

1-кесте – Зерттелетін автокөліктердің жалпы сипаттамалары

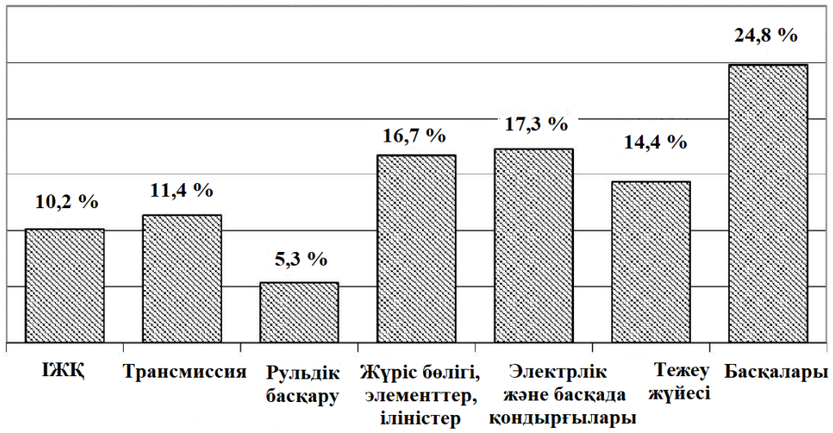
Көрсеткіші	Volvo FH 1242	Mercedes-Ben-zActros LS
Автокөліктер саны, бірлік саны	15	16
Бір автокөлікке шағылатын істен шыққан бөлшектердің орташа саны, бірлік саны	13,29	33,11
Орташа жүрісі, км	455010	703450
Бөлшектің алғашқы істен шығуына дейінгі жүрісінің орташа мәні, км	141750	171881

Қолданыстағы Mercedes-Benz 1844 Actros LS тіркемесімен автокөліктің ақауларын зерделеу барысында мына бөлшектер ауыстырылды: руль штангалары, бас берістің тісті білігінің тығыздағышын ауыстыру, турбокомпрессорды ауыстыру немесе жөндеу, жанармай багын ауыстыру, кабинаның бұралу жолағын ауыстыру, тәуелсіз жылытқышты жөндеу немесе ауыстыру, тахографты ауыстыру, жөндеу, ауа құбырлары мен тетіктерін, датчиктер мен құрылғыларды ауыстыру, ABS кабелі, генератор, амортизаторлар, тежегіш механизмдер және аккумулятор (2-кесте).

Сондай-ақ, беріліс қорабы мен қозғалтқышты басқару блогы да ауыстырылды [3].

2-кесте – Ауыстыралатын бөлшектер, түйіндер және агрегаттар кестесі

№	Бөлшектер, түйіндер, агрегаттар атауы	Жалпы К общему количеству, %
1	ІЖҚ	10,2
2	Трансмиссия	11,4
3	Рульдік басқару	5,2
4	Жүріс бөлімі	16,7
5	Электр жабдығы	17,3
6	Тежеу жүйесі	14,4
7	Басқалары (ілініс және кабинаның жарық жүйесі, жүргізушінің жайлылық жүйесі)	24,8



1-сурет – Mercedes-Benz Actros 1844 LS автокөлігінің жүйелер бойынша механизмдер мен қораптарының істен шығуының мөлшері

Көлік құралдарының техникалық жағдайының бұзылыстарын, олардың пайда болу түрімен, сипатымен, олардың нақты себептері, сонымен қатар, аталған бұзылыстарды жою уақыты бойынша бір-бірінен айтарлықтай ерекшеленеді [4; 7; 8]. Оларды талдау, физикалық табиғатын және қайталану жиілігін зерттеу көлік құралын пайдалану тиімділігіне сауатты әсер етуге мүмкіндік берді.

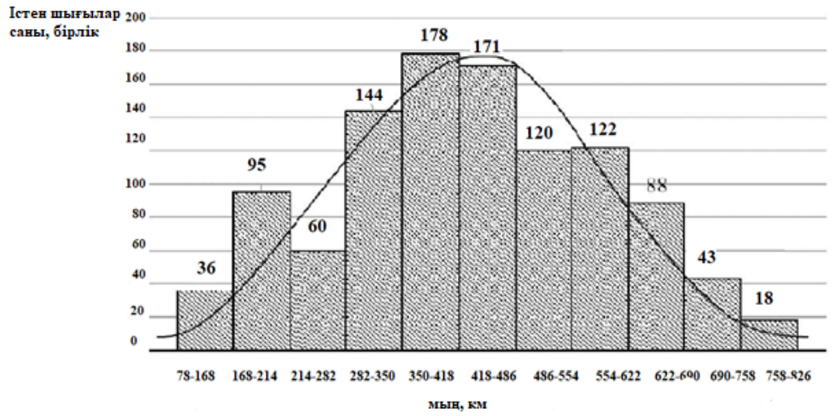
Көлік құралының құрамдас бөліктерінің бастапқы кезеңдегі істен шығу себептерін жіктеу кезінде олардың көпшілігі сыну, бекітудің босауы, тозуы, мерзімінен бұрын тозуына байланысты екенін атап өткен жөн. Тозу ақауларының үлесі шамамен 20% құрайды, ал бекітіп, тартылуының босауы 60 % -дан астам. Соңғыларының саны жүгіріспен азаяды және алғашқы 60 мың км-ден кейін енді 15 % аспайды.

Істен шығу заңдылықтарын білу көлікті жобалау және олардың жұмысындағы қосалқы бөлшектердің санын жоспарлау салаларындағы тәжірибелік мәселелерді шешуге мүмкіндік береді [9; 10; 11].

Электр жүйесінде, әсіресе электронды жабдықтар жүйесінде де бөлщектердің алмастырып ауыстырылуы жүргізіледі. Аккумуляторлық батареяларды дұрыс орналастырмау салдарынан олардың үнемі ластануына және тығындардың

желдету саңылауларының бітелуіне әкеледі. Кабиналардағы қажетті жылу оқшаулауының болмауы төмен температурада конденсацияның пайда болуына әкелді, ол аспаптар тақтасына түскен кезде электр құрылғыларының өздігінен жұмыс істеуіне әкеледі. Нәтижесінде аккумуляторлық батареялар, сенсорлар, тахографтар, ABS кабельдері ауыстырылады, борттық компьютерлер қайта бағдарламаланды.

Ақаулардың 17 % электр жабдықтарына қатысты болса, басым бөлігі (178 ауыстырылым) айнымалы генератордың белдік кергіш шығыршығын ауыстыруға, 124-і генератордың мойынтіректерін ауыстыруға, 119-ы генератор белдігін ауыстыруға байланысты. Автокөліктерді пайдаланудың барлық кезеңінде 58 генератор ауыстырылды – бұл іс жүзінде әрбір 3-ші көлікте ауыстырудың орындалғаны деп білеміз. Сондай-ақ, 105 ауыстырылым тахографты жөндеуде тіркелді, оның 10-ы толық тахографтарды ауыстыруға қатысты. Бұл бөлшектердің істен шығуы қалыпты таралу заңына бағынатындығы анықталды (2-сурет).



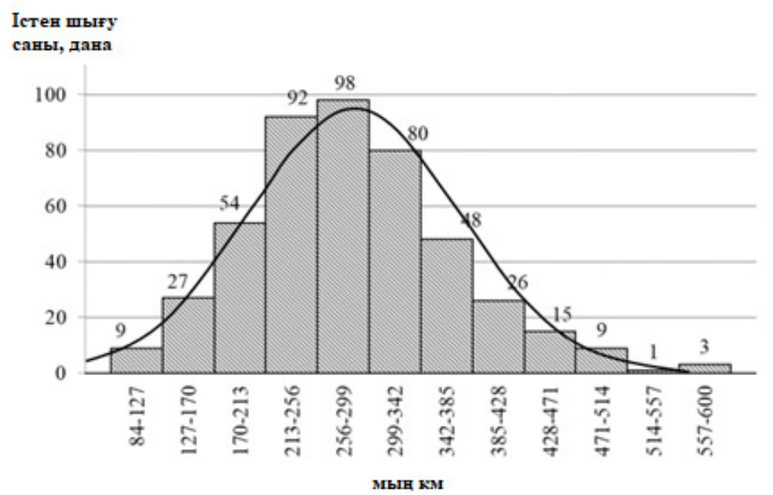
2-сурет – Электр жабдықтарының ақауларының таралымы

Осыған ұқсас зерттеу Volvo FH 1242 тракторларының жұмысындағы ақауларға қатысты да жүргізілді.

«Volvo» тіркемесімен автокөліктерді пайдаланудың бірінші жылында мынай ақаулар анықталды: көлбеу жолдарда жүру кезінде тіркемелер қуатының жеткіліксіздігі, ТМД елдеріндегі жолдармен жүру кезінде іліністерінің қанағаттанарлықсыз өнімділігі, сонымен қатар, аккумуляторларды, амортизаторларды, бекіткіштерді ауыстыру, жетекші доңғалақ шиналарының жылдам тозуы, кабинаның жылыту жүйесінің сенімділігінің болмауы болып отыр. Автокөліктің жүгірісі 80 мың км-ге дейін ұлғаюымен көлік бөліктеріндегі ақауларды жою туралы өтініштер саны арта бастады. Ауа-райының құбылмалы жағдайында автономды жылытқышты пайдалану, оны жөндеуге сұраныстардың санын күрт арттырды. Және де электр жабдықтарының ақаулары тіркелді [6; 7].

Volvo FH 1242 тіркемесімен автокөліктердің істен шығу көрсеткішін талдаудағы анықталған типтік ақаулар мыналар: қозғалтқыштың жұмысындағы ақаулар (36,4 %), электр жабдықтары (21,8 %), трансмиссия (8,6 %), жүріс бөліміндегі және қорап көтергіштерінің істен шығуы мен жылу жүйесінің ақаулары да жиі кездесетінін көрсетті.

Іс жүзінде әрбір үшінші ақауды құрайтын қозғалтқыш жүйесінің ақауларының ішінде 34,6 % жанармай қоспасын беру және дайындау жүйесіндегі ақаулар (инжекторларды, табақтарды және тығыздағыштарын ауыстыру) екені анықталды (3-сурет). Жұмыс барысында көптеген ақаулар өңделіп қолданылған газдың салдарынан, әсіресе дыбысты басатын гофрды және сору коллекторының тығыздағыштарын ауыстырудан тұрады. Іштен жану қозғалтқыштарында негізгі және шатундық төсемдердіауыстырылды. Майлау жүйесіндегі ауыстырулар май қысымының сенсорының істен шығуымен сипатталады. Ауыстырулардың көпшілігі жүгірістің алғашқы 300 мың шақырымында болғаны анық. Бірлік ақаулары логнормальдық таралу заңына бағынады. Трансмиссияны ауыстыру ілініс дискілерін, босату мойынтіректерін және пневматикалық-гидравликалық ілінісу күшейткішіне арналған жөндеу жинақтарын ауыстыруды қамтиды. Жағдайлардың жартысында тежеу жүйесіне араласу тежегіш жастықша серіппелерін ауыстыруды қамтиды. Сондай-ақ, жиі ауыстырылуға жартылай тіркеме тежегішін басқару модуляторлары мен EBS модуляторлары ауыстырылады. Электр жабдықтарының істен шығуы таспа мен кергіш роликті, мойынтіректерді және генератор анкерін ауыстырумен сипатталады. Сондай-ақ, осы марканың автомобильдері үшін автономды ішкі жылытқыштың элементтерін ауыстыру қолданыстың барлық кезеңіне тән [8, 9, 10].



3-сурет – Жүріс аралығы бойынша бөлшектердің істен шығуының таралуы

Тежеу жүйесінің құрамдас бөліктерінің ақаулары 3-кестеде көрсетілген. Статистикалық талдауда Volvo FH 1242 тежеу блогының тозу сенсорының ақауларының біркелкі таралуын көріп отырмыз, ал Mercedes-Benz Actros 1844 LS тежегіш жүйесінің құрамдас бөліктері логарифмдік-қалыпты үлестіріммен сипатталады.

3-кесте. Электронды жабдықтардың тежеу жүйесінің элементтерінің істен шығуы

Маркасы	Бөлшектер	Істен шығуы, бірлік	%	Істен шығуға дейінгі орташа жұмыстық жүрісі, км
Mercedes-BenzActros 1844 LS	EBS блогы	30	23,8	359400
	ABS датчигі	46	36,5	514717
	Тежеу модуляторы	50	39,7	533460
Volvo FH 1242	Тежеу блогының тозуының датчигі	26	56,5	312923
	Тежеу модуляторы	12	26,1	256583
	ABS датчигі	4	8,7	270750
	EBS блогы	4	8,7	286750

Тіркемелі автокөліктерінің істен шыққан бөлшектері мен тораптарын зерттеуде, анықталған ақаулары қосалқы бөлшектерді қажет ететіндігі кездейсоқ шамаларының таралу заңдылықтарымен анықтауға мүмкіндік береді.

Жүк көліктерінің қосалқы бөлшектерін пайдалану және онда ақаулардың туындауының қарастырылған себептері асимметриялық бөлу заңдарысай ақаулардың пайда болу себептерінің көпшілігі конструкцияның жетілмегендігімен, технологиялық құрастыру үдерістерінің бұзылуымен және жылжымалы құрамның жұмыс жағдайларының жарамсыздығымен көрсеткіштерін анықтауға мүмкіндік береді. Қалыпты таралу заңы істен шығуы тәуелсіз (немесе әлсіз тәуелді) элементарлы факторлардың салыстырмалы түрде көп саны әсер ететіндігін көрсетеді, олардың әрқайсысы басқаларының жалпы әсерімен салыстырғанда жеке-жеке аз ғана үлес қосады.

Қорытынды

Автокөлік құралдарының өнімділігін жақсарту үшін заманауи автомобильдердің дизайнына электронды және микропроцессорлық жүйелер көбірек енгізілуде. Дегенмен, қоладныс тәжірибесі көрсеткендей, басқа жүйелердегі ақаулардың 35 %-ы электр жабдықтарының элементінің істен шығуынан туындауы мүмкін.

Қосалқы бөлшектерді жеткізу мерзімін талдау көрсеткендей, мұндай жағдайларда қосалқы бөлшектердің қорын барынша азайту қажетті қосалқы бөлшектерді күтіп тұрған көліктердің тұрып қалуының артуына және кәсіпорын жұмысының тиімділігінің төмендеуіне әкеледі. Автокөліктерге арналған қосалқы бөлшектердің көпшілігі зауытқа 24 сағат ішінде жеткізілетініне қарамастан, жөндеуді орындауға кететін уақыт әдетте қосалқы бөлшектерді жеткізу уақытынан әлдеқайда аз. Кейбір қосалқы бөлшектер бар, олар тез ауыстырылады, бірақ

жеткізу уақыты екі аптаға дейін болуы мүмкін. Бұл жөндеу жұмыстары кезінде және қажетті қосалқы бөлшекті күту кезінде тоқтау уақытын азайту үшін қойманы оңтайландыруды қажет етеді.

Ақаулар туралы жүйеленген деректер жөндеу шараларының санын, жұмыс күшіне, кеңістікке, материалдар мен қосалқы бөлшектерге қажеттілікті болжауға және жоспарлауға мүмкіндік береді. Жиналған статистикалық мәліметтер автомобиль көлігі кәсіпорнының қосалқы бөлшектер қоймасын оңтайландыру үшін қажетті бөлшектердің пайдалану кезеңдерінде істен шығу ықтималдығын анықтау үшін пайдаланылды.

ПАЙДАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Власов, В. М., Жанказиев, С. В., Круглов, С. М.** Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: учебник [Текст] –М.: Издательский центр «Академия», 2017. –322 с.

2 **Akaike, H. A.** Bayesian analysis of the minimum AIC procedure / H.A. Akaike // Annals of the Institute of Statistical Mathematics [Text]. – 2007. – Vol. 30. – part A, № 1. – P. 9–14.

3 **Бажинов, А. В.** Управление потребностью в запасных частях [Spare Parts Demand Management] / Автомобильный транспорт. – 2009. – Вып.25. – С. 155–158.

4 **Кравченко, А. П.** Статистический анализ надежности автомобилей тягачей Mersedes-benz 1844 Actros LS [Текст] // Материалы VII международной научно-технической конференции «Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств». – 2012. – С. 188–192.

5 **Хасанов, Р. Х.** Основы технической эксплуатации автомобилей: учебное пособие [Текст]. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 193 с.

6 **Иванов, В. П.** Ремонт автомобилей: учеб. пособие [Текст] / В. П. Иванов, В. К. Ярошевич, А. С. Савич. – Мн. : Высш. шк., 2009. – 383 с.

7 **Ли, С. В., Рабат, О. Ж., Салманова, А. Н., Мурзахметова, У. А., Ыскакова, М. Ш.**Техническая эксплуатация транспортной техники: Учебное пособие [Текст]. – Алматы : Printmaster, 2018. – 308 с.

8 **Мурзахметова У. А., Алшынова А. М. Кабашев А. Р., Кабашева М. Р., Изембаева А. Қ.** Повышение восстановленных коленвалов с учетом их напряженно-деформированного состояния [Текст] // Наука и техника Казахстана. – Павлодар. – 2024. – № 2. – С. 243–352.

9 **Murzakhmetova U. A., Seitkazenov K. K., Alshynova A. M.** Durability of materials under repeated dynamic loading [Текст] // Сборник Международной конференции соискателей высшей образования и молодых ученых «Современные материалы и технологии их обработки», 20-21 апреля 2023 года. – Харьков, Украина. – С. – 175–181.

10 **Верительник, Е. А.** Определение количества хранимых запасных частей на автопредприятиях с учетом ограниченности оборотных средств [Текст] // Вестник Луганского национального университета имени В. Даля. – 2019. – №1 (19). – С. 132–136.

11 **Кузнецов Е. С., Болдин В. М., Власов А. П.** Техническая эксплуатация автомобилей[Текст]: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и дополн. – М. : Наука, 2001. – 535 с.

REFERENCES

1 **Vlasov, V. M., Zhankaziev, S.V., Kruglov, S. M.** Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobilei [Maintenance and Repair of Motor Vehicles]: uchebnik [Text] /– M. : Izdatelskii thentr «Academiya», 2008. – 302 p.

2 **Akaike, H. A.** Bayesian analysis of the minimum AIC procedure / H.A. Akaike // Annals of the Institute of Statistical Mathematics [Text]. – 2007. – Vol. 30. – part A, № 1. – P. 9–14.

3 **Bazhinov, A. V.** Upravlenie potrebnostua v zhapasnych chastyach / A.V.Bazhinov, E.M.Gethovich[Text] // Avtomobilnyi transport. – 2009. – Byp. 25. – P. 155–158.

4 **Kravchenko, A. P.** Statisticheskii analiz nadezhnosti avtomobilei tiagachei Mersedes-benz 1844 Actros LS [Statistical Analysis of the Reliability of Mercedes-Benz Actros 1844 LS Tractor Units] [Text] // Materialy VII mezhdunarognyi nauchno-tekhnicheskoi konferenthii «Problemy kachestva i expluatathii avtotransportnych sredstv». – 2012. – P. 188–192.

5 **Khasanov, R. Kh.** Osnovytekhnicheskoi expluatathii avtomobilei: uchebnoe posobie [Fundamentals of Vehicle Technical Operation] [Text]. – Orenburg : GOUOGU, 2003. – 193 p.

6 **Ivanov, V. P.** Remontavtomobilei [Automobile Repair]: uchebnoe posobie / V. P. Ivanov, V. K. Yaroshevich, A. S. Savich. – Mn. : Vyssh. shk., 2009. – 383 p.

7 **Li, S. V., Rabat, O. Zh., Salmanova, A. N., Murzakhmetova, U. A., Yskakova M. Sh.**/ Tekhnicheskaya ekspluatathiya transportnoi tekhniki [Technical Operation of Transport Equipment]: Uchevnoe posovie [Text]. – Almaty : Printmaster, 2018. – 308 p.

8 **Murzakhmetova U. A., Alshynova A. M., Kabasheva A. R., Kabasheva M. R., Izembayeva A. K.** Povyshenie vosstanovlennych kolenvalov s uchetom ich napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Increasing the durability of restored crankshafts considering their stress–strain state] [Text] // Nauka I tekhnika Kazakstana. – Pavlodar. – 2024. – № 2. – P. 243–352.

9 **Murzakhmetova U. A., Seitkazenov K. K., Alshynova A. M.** Durability of materials under repeated dynamic loading [Текст] // Сборник Международной конференции соискателей высшей образования и молодых ученых «Современные материалы и технологии их обработки», 20-21 апреля 2023 года. – Харьков, Украина. – С. – 175–181.

10 **Veretelnik E. A.** Opredeleniekolichestva khranimych zapasnykh chastei na avtopredpriyatiyach s uchetom ogranichennosti oborotnych sredstv [Determination of the required number of spare parts stored at motor transport enterprises under limited working capital conditions] [Text] // Vestnik Luganskogo universiteta imeni Вестник Луганского национального университета имени V. Dalya. – 2019. – №1 (19). – P. 132–136.

11 **Kuznethov E. S., Boldin A. P., Vlasov V. M. i dr.** Tekhnicheskaya ekspluatathiya avtomobilei [Technical Operation of Automobiles: Textbook for Higher Education Institutions] [Text]. – Uchebnik dlya vuzov. 4-e izd., pererab. I dopoln. – M. : Nauka, 2001. – 535 p.

17.02.26 ж. баспаға түсті.
17.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
25.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

У. А. Мурзахметова[1], Н. С. Сембаев[2], А. Р. Кабашев[3],
Л. Р. Кабашева[4], А. М. Алшынова[5]
[1,3,4]Казахский автомобильно-дорожный интитут имени Л. Б. Гончарова, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[5]Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы
Поступило в редакцию 17.02.26.
Поступило с исправлениями 17.02.26.
Принято в печать 25.02.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМОБИЛЕЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ

Эффективность использования автомобильного транспорта в значительной степени зависит от эксплуатационной надежности его подвижного состава. Надежность автотранспортных средств зависит от их надлежащего конструктивного исполнения, обоснованной стратегией поддержания их работоспособности при эксплуатации. Реализация этой стратегии во многом определяется использованием современных информационных технологий, к которым можно отнести методы и средства диагностического прогнозирования характеристик надежности (отказов) автомобилей. Использование современных технологий в области поддержания работоспособности автомобилей позволяет обеспечивать условия их безопасности, повысить степень использования долговечности составных элементов, сократить простои в ремонте, уменьшить расход запасных частей и материалов и т.д.

В работе представлено статистическое анализ исследования отказов элементов автомобилей-тягочей 2-х марок.Исследованные отказы деталей, узлов и агрегатов автомобилей-тягачей позволили определить законы распределения случайных величин появления потребности в запасных частях.

Рассмотренные причины появления отказов элементов и использования запасных частей автомобилей-тягачей позволили установить, что большая часть причин появления нарушений работоспособности, имеющих несимметричные законы распределения, отражают несовершенство конструкции, нарушения технологических процессов сборки, неприспособленность подвижного состава к условиям эксплуатации.

Ключевые слова: грузовые автомобили, запасные части, диагностика деталей, диагностика узлов, отказы деталей, техническое использование, ремонт.

U. A. Murzakhmetova[1], N. S. Sembayev[2], A. R. Kabashev[3],
M. R. Kabasheva[4], A. M. Alshynova[5]
[1,3,4]Kazakh Automobile and Road Institute named after L. B. Goncharova, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[5]Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty
Received 17.02.26.
Received in revised form 17.02.26.
Accepted for publication 25.02.26.

STUDY OF VEHICLE COMPONENT FAILURES AND THE USE OF SPARE PARTS

The efficiency of using motor transport largely depends on the operational reliability of its rolling stock. The reliability of motor vehicles depends on their proper design, a justified strategy for maintaining their operability during operation. The implementation of this strategy is largely determined by the use of modern information technologies, which include methods and means of diagnostic forecasting of reliability characteristics (failures) of vehicles. The use of modern technologies in the field of maintaining the operability of vehicles allows us to ensure their safety conditions, increase the degree of use of the durability of components, reduce downtime during repairs, reduce the consumption of spare parts and materials, etc. The paper presents a statistical analysis of the study of failures of elements of tractor vehicles of 2 brands.

The studied failures of parts, units and assemblies of tractor vehicles made it possible to determine the laws of distribution of random variables of the emergence of a need for spare parts. The considered reasons for the occurrence of failures of elements and the use of spare parts of tractor vehicles made it possible to establish that the majority of reasons for the occurrence of malfunctions with asymmetric distribution laws reflect the imperfection of the design, violations of technological assembly processes, and the unsuitability of the rolling stock for operating conditions.

Keywords: trucks, spare parts, diagnostics of parts, node diagnostics, part failures, technical use, repair.

МРНТИ 73.31.19

https://doi.org/10.48081/BGQF1929

М. Т. Суранчиев[1], *Н. С. Сейітқазы[2], М. Маханов[3], А. Т. Умбетбеков[4]

[1,3,4]META University, Республика Казахстан, г. Алматы;

[2]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3675-059X

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7255-5692

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1490-3388

[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7970-530X

*e-mail: seytkazy.nurgul@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ САМОХОДНЫХ МАШИН

Современные требования к безопасности эксплуатации тракторов и самоходных машин требуют точной оценки их поперечной устойчивости, особенно при эксплуатации на склонах и пересечённой местности. В статье рассматривается проектирование испытательного стенда с гидравлическим опрокидывающим механизмом, который обеспечивает плавное изменение угла наклона платформы и фиксацию момента потери устойчивости техники. Разработанная методика испытаний включает алгоритм измерений, фиксацию положения машины и регистрацию ключевых параметров, а также построение математической модели функционирования подъемного механизма, что позволяет рассчитать оптимальное расположение гидроцилиндра и обеспечить высокую точность измерений.

Использование современных подходов к испытаниям сельскохозяйственной техники позволяет воспроизводить натурные условия эксплуатации и учитывать реальные нагрузки на агрегаты и системы. При этом оценка угла статической устойчивости на стенде базируется на координатах центра тяжести и геометрических параметрах машины, таких как ширина колеи, колесная база и распределение массы. Дополнительно учитываются изменения радиусов колес и смещения вектора центра тяжести, что позволяет корректно рассчитывать момент устойчивости при движении по склону.

Современные испытательные стенды оснащаются автоматизированными системами управления, что позволяет проводить испытания в автоматическом режиме, фиксировать динамические и статические параметры, а также обеспечивать аварийное отключение в случае отклонения от нормы. Применение энергосберегающих технологий в конструкции стенда повышает эффективность и снижает затраты энергии. Разработка соответствует требованиям ГОСТ 12.2.019, ГОСТ 33691-2015 и ISO 16231-2 и может быть использована при создании нормативных методик испытаний самоходных машин и тракторов.

Ключевые слова: угол поперечной устойчивости, испытательный стенд, последовательное взвешивание, гидроцилиндр, взвешивание по бортам, испытания, расчетная модель.

Введение

Современные тенденции в развитии транспортных средств, тракторов и самоходных машин предъявляют повышенные требования к их безопасности и надежности. Одним из ключевых аспектов обеспечения безопасности является поперечная статическая устойчивость, особенно в условиях эксплуатации на склонах и неровных поверхностях. Недостаточная устойчивость может привести к опрокидыванию техники, что влечет за собой серьезные последствия для оператора и окружающей среды. Опрокидывание трактора остается серьезной проблемой в сельскохозяйственной деятельности. Детальный анализ проблем и причин, приводящих к опрокидыванию трактора, показал, что улучшение его статической устойчивости мы можем положительно повлиять на безопасность уже на стадии разработки концепции [1, с. 216]. Аварии, связанные с опрокидыванием, стоят времени и денег, а также приводят к травмам. Полное понимание устойчивости на склонах необходимо для того, чтобы установить безопасные эксплуатационные пределы, которые могут быть приняты во всех отраслях наземной промышленности [12, с. 212]. Выпускаемые сельскохозяйственные тракторы характеризуются высоким уровнем стандартизации и оснащены рядом дополнительных навесных устройств, которые позволяют более широко использовать каждый трактор и значительно облегчают его эксплуатацию [7, с. 284]. Потребность в испытаниях тракторов и сельскохозяйственных машин с точки зрения их пригодности для использования в сельском хозяйстве будет постоянно расти, поскольку эти машины непосредственно влияют на сельскохозяйственное производство[3, с. 12–16; 5, с. 95–97].

Чрезвычайное разнообразие ситуаций, в которых может оказаться сельскохозяйственная машина, не находит адекватного соответствия в тестовых ситуациях, предлагаемых стандартами. Действительно, хотя все реальные ситуации должны быть обязательно упрощены и стандартизированы для экспериментального исследования, тесты, которые в настоящее время приняты для проверки устойчивости машин при опрокидывании, хотя и просты и эффективны по своему принципу действия, имеют много основных недостатков. Стандарты требуют принятия основных мер по устранению погрешностей, негативно влияющих на результаты расчетных методик. Устранение погрешностей при измерении параметров, необходимых для расчета статического угла опрокидывания, улучшает результаты расчетной модели [6, с. 45–49]. При определении поперечной устойчивости трактора расчет угла статического опрокидывания производится на основе технических параметров трактора и координат COG. Методика расчета использует расположение COG по отношению к треугольнику устойчивости. В представлено, что размеры транспортного средства, такие как: колесная база, габаритная ширина по шинам и распределение веса между осями, являются основными факторами, влияющими на устойчивость трактора [5, с. 95–97; 10, с. 146–147].

Методы и методика исследований

В настоящее время существуют два основных метода определения угла поперечной статической устойчивости. Первый метод основан на применении стационарных стендов определения угла поперечной статической устойчивости и требует громоздкого оборудования [4, с. 30–34; 10, с. 146–147]. Угол опрокидывания определяют на стенде, имеющем платформу, которая соответствующим механизмом управления наклоняется на различные углы в поперечной плоскости. Критическим считается угол, при котором начинается боковое опрокидывание испытываемой техники. Общий вид оборудования для предельного угла поперечной статической устойчивости (опрокидывания) приведен на рисунке 1.

Рисунок 1 – Общий вид оборудования для предельного угла поперечной статической устойчивости (опрокидывания)

Недостатком аттестованного стационарного дорогостоящего оборудования изготавливаемого в единичных экземплярах является необходимость доставки испытываемого образца на территорию испытательного центра, где оно находится, что является затратным [10, с. 146–147].

Второй метод определения угла поперечной статической устойчивости основан на применении методики расчета и виртуального моделирования

[6, с. 45–49]. Главными критериями устойчивости трактора при такой методике расчета против опрокидывания являются характеристики его геометрических параметров и расположение центра масс, определяющие границы статической устойчивости при помощи так называемых предельных углов бокового αlim, или продольного βlim крена [11, с.33–38]. При расположении трактора на наклонной опорной поверхности, соответствующей предельному углу, возникает опрокидывание под действием только сил тяжести. Развитие этой методики расчета позволяет лишь уточнить параметры, входящие в уравнения расчета моментов, однако это не изменяет принципа самой методики расчета, например, с помощью данной методики невозможно учесть динамику процесса, пространственную схему транспортного средства, сложную кинематику подвески, нелинейность упругих характеристик подвески, ограничителей хода подвески. Ограниченность данной методики заключается в использовании принципа составления уравнений равновесия системы (уравнений статики). Таким образом, до настоящего времени оценку устойчивости транспортных средств достоверно можно было провести лишь в условиях реального эксперимента на стенде с опрокидывающейся площадкой.

В условиях неуклонного роста требований к качеству и безопасности технических устройств постоянно растут требования к качеству. Также повышаются требования к способам оценки качества испытательных стендов, так как от этого зависит достоверность результатов испытаний и принятие соответствующих решений по годности изделий, испытательных стендов и комплексов. В соответствии с данным техническим регламентом, одним из основных требований безопасности, предъявляемых к тракторам и прицепам к ним является требования к поперечной статической устойчивости. Под углом статической устойчивости понимается угол наклона опорной поверхности опрокидывающей платформы относительно горизонтальной плоскости, при котором произошел отрыв всех колес одной стороны одиночного трактора или всех колес одной стороны одного из звеньев седельного автопоезда от опорной поверхности платформы. Угол поперечной статической устойчивости тракторов, самоходных машин и автомобилей в зависимости от различных условий их применения устанавливается в соответствии с ГОСТ 12.2.019 [2, с.21], Правила ЕЭК ООН 66, а методы их определения устанавливается в соответствии с ГОСТ 33691-2015.

Устройство для измерения угла поперечной устойчивости машин в своей конструкции должен содержать площадки для взвешивания машин отдельно по бортам, один измеритель угла наклона машины в поперечной плоскости. Подъем платформы осуществляется гидроцилиндром соответствующей грузоподъемности. Для предотвращения опрокидывания машина крепится страховочными цепями [10, с.146–147; 8, с.328].

Опрокидывающее оборудование для определения угла поперечной устойчивости (см. рисунок 2) состоит из платформы 1, состоящая из рамы закрытой сверху листовой сталью с рифленой поверхностью, установленной с

возможностью вращения вокруг горизонтальных шарниров. Шарниры закреплены на стойках 2, залитых в фундаментное основание 3. Другая сторона платформы опирается на опорную поверхность площадки. Подъем платформы осуществляется гидроцилиндром 6 соответствующей грузоподъемности. Опорный брус 5 требуемой высоты (в наборе имеются три опорных бруса высотой 20, 40 и 60 мм) и упор 4 предотвращают съезд машины при ее поднятии. Они устанавливаются таким образом, чтобы продольная ось машины была параллельно оси наклона платформы с отклонением не более 1,5°. Для предотвращения опрокидывания при испытаниях машина крепится к платформе страховочными цепями 8. Страховочные цепи 7 между рамой и фундаментным основанием стенда применяются как ограничитель угла подъема платформы.

Замер производят угломером или другим средством измерения углов с допустимой абсолютной погрешностью ± 1,0 град., установленным на лонжероне рамы.

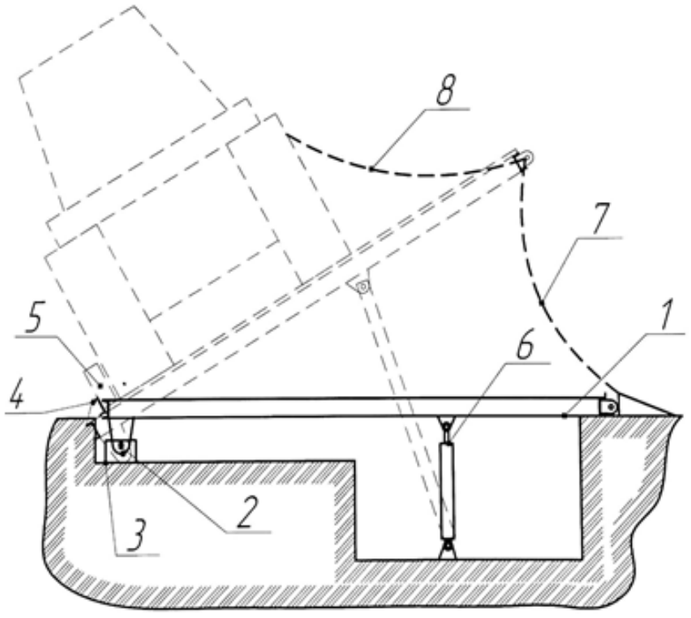


Рисунок 2 – Схема стенда для определения угла поперечной устойчивости

При проектировании гидравлического опрокидывающего устройства необходимо обеспечить определенный угол наклона платформы при минимальной массе конструкции. Основными агрегатами опрокидывающего устройства являются грузовая платформа и силовой гидроцилиндр. Механизм подъема

опрокидывающего устройства состоит из платформы 1, гидроцилиндра 2 и поворотного шарнира 3.

При подъеме платформы с грузом заданной массы для увеличение прочности платформы и уменьшения усилия гидроцилиндра его рациональнее располагать дальше от поворотного шарнира [6]. Однако в этом случае для обеспечения заданного угла наклона платформы необходимо увеличивать ход гидроцилиндра, т. е. общую длину цилиндров. Однозначно определить оптимальное место размещения гидроподъемника без проведения всестороннего анализа не представляется возможным. При рациональном размещении гидроцилиндра помимо приведенных факторов учитывают влияние места его расположения на прочность платформы и рамы. Вне зависимости от того, где расположен гидроцилиндр, необходимо правильно ориентировать его как звено подъемного механизма, обеспечивающего заданный угол наклона платформы. Для определение координаты крепления верхней опоры гидроцилиндра 2 к платформе и для выбора высоты подъема штока гидроцилиндра, поворачивая платформу 1 относительно поворотного шарнира О, на угол α, получим новую расчетную схему механизма (рисунок 3).

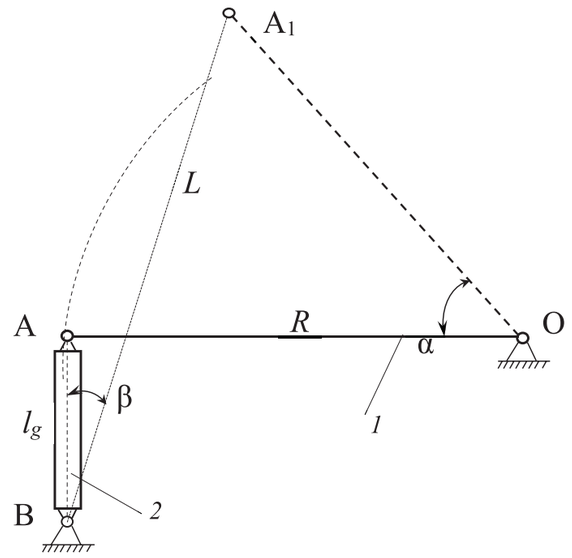


Рисунок 3 – Расчетная схема механизма подъема платформы опрокидывающего стенда

Алгоритм проведения испытаний на определение угла поперечной статической устойчивости. Методика проведения испытаний на разработанном стенде представлена в виде последовательного алгоритма:

Этап 1. Подготовка стенда и средства измерения;

– Проверка технического состояния платформы, гидроцилиндра и страховочных элементов;

– Калибровка измерителя угла наклона (погрешность не более ±1°);

Проверка исправности системы автоматического отключения.

Этап 2. Подготовка испытываемой машины:

– Установка машины на платформу;

– Выравнивание продольной оси машины параллельно оси наклона (отклонение не более 1,5°);

– Фиксация машины страховочными цепями. Установка опорных брусьев.Этап 3. Определение исходных параметров;

– Определение координат центра тяжести методом последовательного взвешивания;

– Регистрация геометрических параметров (ширина колеи, база, масса);

Этап 4. Проведение испытания:

Плавный подъем платформы гидроцилиндром;

Непрерывная регистрация угла наклона;

Фиксация момента отрыва колес одной стороны;

Регистрация критического угла α;

Этап 5. Обработка результатов:

– Сравнение экспериментального угла с расчетным;

– Определение отклонения;

Представленный алгоритм обеспечивает воспроизводимость испытаний, снижение погрешностей измерений и соответствие требованиям ГОСТ 33691–2015.

Результаты и обсуждение

Метод определения центра тяжести (COG) самоходных машин установлен стандартом [9, с. 256]. Стандарт позволяет использовать различные техники наклона трактора с колесами или без них на наклонной платформе. Метод расчета статического угла опрокидывания учитывает линию качения шин, положение COG и размеры транспортного средства [5, с. 95–97]. В стандарте приведен метод расчета статического угла опрокидывания трактора с одной поворотной осью без устройства ограничения угла поворота и точкой поворота поворотной оси, расположенной на одной линии с центральной линией трактора, рисунок 5. Стандарт определяет линию качения шин на неподвижной оси (при боковом качении) на уровне 75 % ширины шины. Абсцисса AA′ является базовой линией треугольника устойчивости и рассчитывается по следующей формуле:

$$AA' = \frac{o-2(p-0.75p)}{2} \quad (1)$$

где: AA′-базовая линия треугольника устойчивости, м; о-полная ширина по шинам неподвижной оси, м; р-ширина по шинам неподвижной оси.

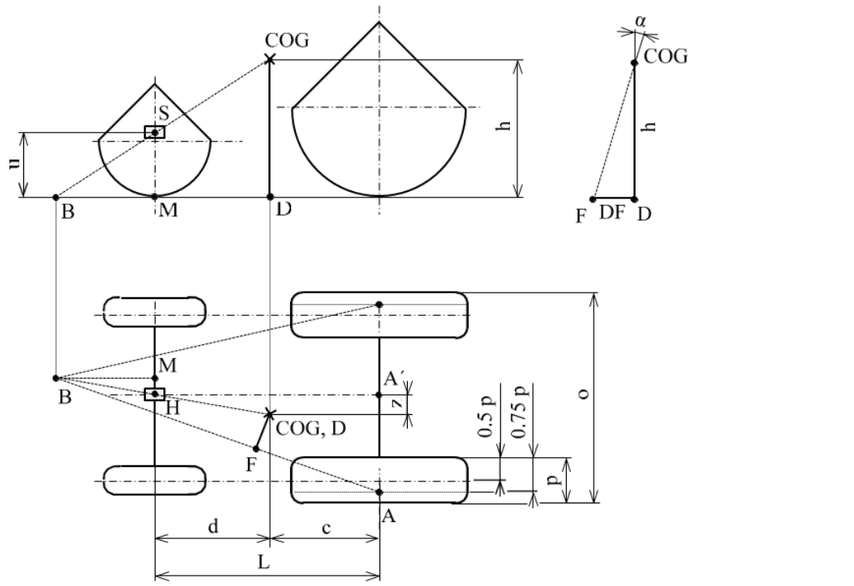


Рисунок 5 – Определение поперечной устойчивости трактора по стандарту: о-полная ширина шин на неподвижной оси, р-ширина шин на неподвижной оси, u-высота точки поворота поворотной оси, L- колесная база, c, d-продольные координаты СОГ; h-вертикальная координата СОГ; z-боковое положение СОГ; α-статический угол опрокидывания, AA′-базовая линия треугольника устойчивости, DF-линия наклона

С учетом метода расчета по стандарту угол статического опрокидывания равен тангенсу угла наклона линии DF над вертикальной координатой COG h.

Математическая модель положения элементов опрокидывающего устройства составлена на основе расчетной схемы. Решение системы уравнений позволяет определить координаты звеньев механизма, длину хода штока гидроцилиндра и угол подъема платформы [11, с. 33–38; 12, с. 212]. Проецируя векторный контур (Рисунок 4) на оси координат и получим систему уравнения:

$$\begin{aligned} L\cos\beta &= R\cos(90-\alpha) + l_g, \\ R &= R\cos\alpha + L\cos(90-\beta) \end{aligned} \quad (2)$$

где R, l_g, L – проектные параметры платформы,
α – угол подъема платформы.

$$\begin{aligned} L\cos\beta &= R\sin\alpha + l_g, \\ R &= R\cos\alpha + L\sin\beta \end{aligned} \quad (3)$$

Решая эти уравнения, найдем:

$$R - Rcos\alpha = Lsin\beta;$$
$$Rsin\alpha + l_g = Lcos\beta;$$

;

из решения этой системы уравнений определяем неизвестные величины, которые определяют положение звеньев и точек механизма

$$tg\beta = \frac{R(1-cos\alpha)}{Rsin\alpha+l_g};$$

Подставляя в уравнение (3), после преобразование получаем

$$L = \frac{R(sin\alpha+l_g)}{cos\beta} \quad (4)$$

Тогда ход штока будет: $l_{ход}$=L-l_g.

Решая совместно эти уравнения можно определить искомые величины. Для определения удлинение штока гидроцилиндра L подъема груза нужно задаться положением О поворотного шарнира. Для этого составлен алгоритм и разработана соответствующая программа их численного. Задавшись, например, положением крепление верхнего шарнира гидроцилиндра (размером R), легко определить длину вытяжки гидроцилиндра.

По результатам расчетов построен график изменения длины штока гидроцилиндра при разных углах подъема платформы (см.рисунок 4).

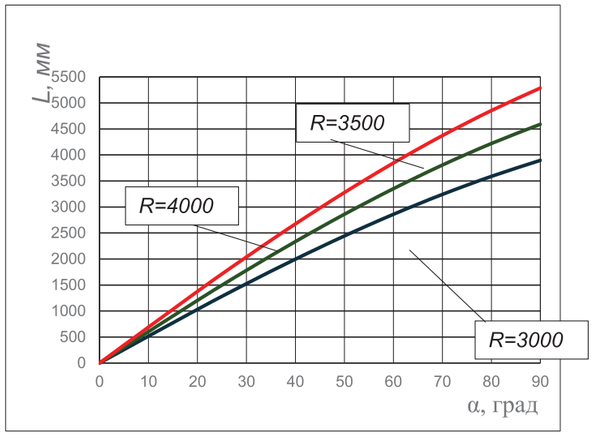


Рисунок 4 – График изменения хода штока гидроцилиндра в зависимости координаты точки крепления при различных значениях угла подъема платформы α

Из графика видно, что с увеличением угла подъема платформы увеличивается ход штока гидроцилиндра. Оптимальные геометрические параметры опрокидывающего механизма определяются исходя из требований к углу подъема и подбора стандартного гидроцилиндра. Например, для гидроцилиндра КАМАЗ 5320 (ход штока 4570 мм) при угле подъема 70 ° R= 3570 мм.

Стационарные наклонные платформы являются стандартным средством определения угла статической устойчивости сельскохозяйственной техники. Однако такие установки характеризуются высокой металлоемкостью и необходимостью размещения в специализированных испытательных центрах.

Расчетные методы, основанные на определении положения центра тяжести и построении треугольника устойчивости, широко применяются на этапе проектирования [13, с. 123–126].

В отличие от существующих подходов, разработанный стенд сочетает преимущества экспериментального метода с возможностью параметрической оптимизации гидравлического механизма, что соответствует современным тенденциям проектирования испытательных систем [14, с. 14].

Сравнение разработанного стенда выполнено с существующими стационарными опрокидывающими установками и расчетно-моделирующими методиками (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ разработанного стенда с существующими аналогами

Критерий	Стационарные стенды	Расчетные методы	Разработанный стенд
Необходимость транспортировки техники	Требуется	Не требуется	Не требуется (возможна мобильная реализация)
Учет динамических факторов	Ограничен	Не учитывается	Частично учитывается
Точность определения угла	Высокая	Зависит от точности исходных данных	Высокая
Автоматизация	Частичная	Полная (виртуальная)	Предусмотрена
Энергоэффективность	Низкая	Высокая	Повышенная

В отличие от традиционных стационарных установок, разработанный стенд характеризуется: возможностью оптимизации положения гидроцилиндра, снижением металлоемкости конструкции, повышенной точностью за счет математической модели, возможностью интеграции автоматизированной системы управления.

По сравнению с расчетными методами предложенная конструкция позволяет учитывать реальные деформации шин, фактическое смещение центра тяжести и конструктивные особенности машины, что повышает достоверность оценки устойчивости.

Выводы

В ходе проведенного исследования разработана конструкция испытательного стенда для определения угла поперечной статической устойчивости транспортных средств, тракторов и самоходных машин. Предложенная конструкция основана на использовании гидравлического опрокидывающего механизма с возможностью точной регулировки угла наклона платформы.

Разработана расчетная модель, позволяющая определить оптимальное положение крепления гидроцилиндра, обеспечивающее заданный угол наклона при минимальной массе конструкции. Проведенные расчеты и построенные графики зависимости хода штока гидроцилиндра от угла подъема платформы подтверждают эффективность предложенной модели.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и модернизации испытательных стендов для оценки поперечной устойчивости различных видов техники. Предложенный подход обеспечивает безопасность проведения испытаний, высокую точность измерений и соответствие современным нормативным требованиям.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных испытаний разработанного стенда с целью верификации расчетной модели и уточнения параметров конструкции. Также предполагается разработка методических рекомендаций по проведению испытаний и обработке полученных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Бабанин, В. Ф., Козлов, А. А.** Безопасность транспортных средств при эксплуатации в условиях пересечённой местности. – М.: Транспорт, 2018. – 216 с.

2 ГОСТ 33691–2015. Транспортные средства колесные. Методы испытаний на устойчивость. – М. : Стандартинформ, 2015. – 21 с.

3 **Тимофеев, А. Н.** Анализ устойчивости тракторов на склонах // Техника в сельском хозяйстве. – 2021. – № 5. – С. 12–16.

4 **Петров, А. С.** Испытательные стенды для сельхозтехники // Транспорт и техника. – 2020. – № 3. – С. 30–34.

5 **Старунова, И. Н.** Теоретическое обоснование и исследование момента устойчивости колёсных машин при движении по склону // Известия. Технические науки. – Челябинск, 2011. – С. 95–97.

6 **Громов, С. Ю., Карпов, Л. М.** Виртуальное моделирование устойчивости тракторов // Вестник машиностроения. – 2022. – № 9. – С. 45–49.

7 **Мельников, И. П.** Сельскохозяйственные тракторы: устройство, расчёт и проектирование. – СПб. : Профессия, 2020. – 284 с.

8 **Барков, А. В.** Гидравлические приводы: теория и расчеты. – М. : Машиностроение, 2019. – 328 с.

9 **Сидоров, К. П.** Испытания и диагностика сельскохозяйственных машин. – М. : Агропромиздат, 2018. – 256 с.

10 **Тодарев, В. В., Савельев, В. А., Попов, В. Б., Погуляев, М. Н.** Комплексные испытательные стенды сельскохозяйственной техники // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра. Сборник тезисов докладов МНГЖ. – Гомель: Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2017. – С. 146–147.

11 **Чернышев, П. И., Егоров, М. А.** Расчёт устойчивости машин на склонах // Машиностроение и инженерия. – 2021. – № 7. – С. 33–38.

12 **Неверов, В. В.** Статическая устойчивость колесных машин. – СПб. : Политехника, 2020. – 212 с.

13 **Ahmadi, M., Rahimi, H.** Modeling and simulation of tractor rollover on lateral slopes. Journal of Terramechanics, 2020. – 89. – P. 45–56.

14 **Koc, A., et al.** Design optimization of hydraulic lifting mechanisms for heavy testing platforms. Mechanism and Machine Theory, 2021. – 162. – P. 104353.

REFERENCES

1 **Babanin, V. F., Kozlov, A. A.** Bezopasnost’ transportnykh sredstv pri ekspluatatsii v usloviiakh peresechionnoi mestnosti [Safety of vehicles during operation on rough terrain]. – M. : Transport, 2018. – 216 p.

2 GOST 33691–2015. Transportnye sredstva kolesnye. Metody ispytanii na ustoichivost’ [Wheeled vehicles. Stability test methods]. – M. : Standartinform, 2015. – 21 p.

3 **Timofeev, A. N.** Analiz ustoichivosti traktorov na sklonax [Analysis of tractor stability on slopes] // Tekhnika v sel’skom khoziaistve. – 2021. – № 5. – P. 12–16.

4 **Petrov, A. S.** Ispytatel’nye stendy dlia sel’khoztekhniki [Test benches for agricultural machinery] // Transport i tekhnika. – 2020. – № 3. – P. 30–34.

5 **Starunova, I. N.** Teoreticheskoe obosnovanie i issledovanie momenta ustoychivosti kolesnykh mashin pri dvizhenii po sklonu // Izvestiya. Tekhnicheskie nauki. Chelyabinsk, 2011. – P. 95–97.

6 **Gromov, S. Iu., Karpov, L. M.** Virtual’noe modelirovanie ustoichivosti traktorov [Virtual modeling of tractor stability] // Vestnik mashinostroeniia. – 2022. – № 9. – P. 45–49.

7 **Mel’nikov, I. P.** Sel’skokhoziaistvennye traktory: ustroistvo, raschet i proektirovanie [Agricultural tractors: design, calculation and development]. – Saint Petersburg: Professiya, 2020. – 284 p.

8 **Barkov, A. V.** Gidravlicheskie privody: teoriia i raschety [Hydraulic drives: theory and calculations]. – M. : Mashinostroenie, 2019. – 328 p.

9 **Sidorov, K. P.** Ispytaniia i diagnostika sel’skokhoziaistvennykh mashin [Testing and diagnostics of agricultural machinery]. – M. : Agropromizdat, 2018. – 256 p.

10 **Todarev, V. V., Saveliev, V. A., Popov, V. B., Pogulyaev, M. N.** Kompleksnye ispytatelnye stendy sel’skokhoztekhniki // Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnya i zavtra. Sbornik tezisov dokladov MNGZh.

Gomel: Nauchno-tekhnicheskiy tsentr kombaynostroeniya OAO «Gomselmash», 2017. – P. 146–147.

11 **Chernychev, P. I., Egorov, M. A.** Raschet ustoichivosti mashin na sklonax [Calculation of machinery stability on slopes] // Mashinostroenie i inzheneriia. – 2021. – № 7. – P. 33–38.

12 **Neverov, V. V.** Staticheskaia ustoichivost' kolesnykh mashin [Static stability of wheeled machines]. – Saint Petersburg: Politekhnika, 2020. – 212 p.

13 **Ahmadi, M., Rahimi, H.** . Modeling and simulation of tractor rollover on lateral slopes. Journal of Terramechanics, 2020. – 89. – P. 45–56.

14 **Koc, A., et al.** Design optimization of hydraulic lifting mechanisms for heavy testing platforms. Mechanism and Machine Theory, 2021. – 162. – P. 104353.

Поступило в редакцию 25.01.26.
Поступило с исправлениями 25.01.26.
Принято в печать 13.02.26.

М. Т. Суранчиев[1], *Н. С. Сейітқазы[2], М. Маханов[3], А. Т. Умбетбеков[4]
[1,3,4]META University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
25.01.26 ж. баспаға түсті.
25.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
13.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӨЗДІГІНЕН ЖҮРЕТІН МАШИНАЛАРДЫҢ КӨЛДЕНЕҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУҒА АРНАЛҒАН СЫНАҚ СТЕНДІН ЖОБАЛАУ

Тракторлар мен өздігінен жүретін машиналарды пайдалану қауіпсіздігінің қазіргі заманғы талаптары олардың көлденең тұрақтылығын дәл бағалауды талап етеді, әсіресе беткейлерде және қиылысқан жерлерде пайдалану кезінде. Мақалада платформаның көлбеу бұрышын бірқалыпты өзгертуді және техниканың орнықтылығын жоғалту сәтін бекітуді қамтамасыз ететін гидравликалық төңкеру механизмі бар сынақ стендін жобалау қарастырылады Әзірленген сынақ әдістемесі өлшеу алгоритмін, машинаның жағдайын бекітуді және негізгі параметрлерді тіркеуді, сондай-ақ гидроцилиндрдің оңтайлы орналасуын есептеуге және өлшеудің жоғары дәлдігін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін көтергіш механизмнің жұмыс істеуінің математикалық моделін құруды қамтиды.

Ауыл шаруашылығы техникасын сынаудың заманауи тәсілдерін пайдалану пайдаланудың табиги жағдайларын қайталауға және агрегаттар мен жүйелерге нақты жүктемелерді ескеруге мүмкіндік береді. Бұл ретте стендтегі статикалық орнықтылық бұрышын бағалау ауырлық орталығының координаттарына және машинаның геометриялық параметрлеріне, мысалы, жолдың еніне, доңғалақ базасына және массаның таралуына негізделеді. Сонымен қатар, дөңгелек радиустарының өзгеруі және ауырлық орталығының

векторының ығысуы ескеріледі, бұл беткеймен қозғалыс кезінде тұрақтылық моментін дұрыс есептеуге мүмкіндік береді.

Қазіргі заманғы сынақ стендтері автоматтандырылған басқару жүйелерімен жабдықталған, бұл сынақтарды автоматты режимде жүргізуге, динамикалық және статикалық параметрлерді бекітуге, сондай-ақ нормадан ауытқыған жағдайда авариялық ажыратуды қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Стенд құрылымында энергия үнемдейтін технологияларды қолдану тиімділікті арттырады және энергия шығынын азайтады. Әзірлеме ГОСТ 12.2.019, ГОСТ 33691-2015 және ISO 16231-2 талаптарына сәйкес келеді және өздігінен жүретін машиналар мен тракторларды сынаудың нормативтік әдістемелерін құру кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: көлденең тұрақтылық бұрышы, сынақ стенді, дәйекті өлшеу, гидроцилиндр, борттар бойынша өлшеу, сынақтар, есептік модель.

M. Suranchiev[1], *N. Seiitkazy[2], M. Makhanov[3], A. Umbetbekov[4]
[1,3,4]META University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 25.01.26.
Received in revised form 25.01.26.
Accepted for publication 13.02.26.

DESIGN OF A TEST BENCH FOR ASSESSING THE LATERAL STABILITY OF SELF-PROPELLED MACHINES

Modern requirements for the safe operation of tractors and self-propelled machines demand an accurate assessment of their lateral stability, especially when operating on slopes and rough terrain. The article discusses the design of a test bench equipped with a hydraulic tipping mechanism, which allows smooth adjustment of the platform angle and records the moment of stability loss for the equipment. The developed testing methodology includes a measurement algorithm, fixation of the vehicle position, registration of key parameters, and the construction of a mathematical model of the lifting mechanism, which enables calculation of the optimal placement of the hydraulic cylinder and ensures high measurement accuracy.

The use of modern approaches in testing agricultural machinery allows reproducing real operating conditions and accounting for actual loads on assemblies and systems. At the same time, the assessment of the static stability angle on the bench is based on the coordinates of the center of gravity and the vehicle's geometric parameters, such as track width, wheelbase, and mass distribution. Additionally, changes in wheel radii and displacement of the center of gravity vector are considered, allowing for accurate calculation of the stability moment when moving on a slope.

Modern test benches are equipped with automated control systems, which allow conducting tests in automatic mode, recording dynamic and static parameters, and providing emergency shutdown in case of deviation from normal conditions. The use of energy-saving technologies in the bench design increases efficiency and reduces energy consumption. The development complies with GOST 12.2.019, GOST 33691-

2015, and ISO 16231-2 requirements and can be used for developing normative testing methods for self-propelled machines and tractors.

Keywords: lateral stability angle, test bench, sequential weighing, hydraulic actuator, side weighing, stability testing, mathematical modeling.

ГТАМР 73.49.99

https://doi.org/10.48081/BGQF1930

А. Б. Тулеков[1], Т. Б. Сулейменов[2], *К. Г. Балабекова[3], А. Б. Забиева[4]

[1,2,3,4]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.,
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3563-2035
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1196-565X
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8242-6675
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8089-3693
*e-mail: balabekovakyrmyzy@gmail.com

МҰНАРА КРАНЫНЫҢ ЖЕБЕ ҚҰРЫЛЫМЫНДА КОМПОЗИТТІК МАТЕРИАЛДЫ ҚОЛДАНУ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Жұмыста жел жүктемелері жағдайында жұмыс істейтін мұнара кранының құрылымында композиттік материалдарды қолданудың тиімділігі қарастырылады. Қазіргі заманғы құрылыс жағдайында гимараттардың биіктігін арттыру және көтеру механизмдерінің қауіпсіздігі мен сенімділігіне қойылатын талаптарды күшейту мұнара крандарының құрылымдық шешімдерін жетілдіру қажеттілігін тудырады.

Зерттеу шеңберінде мұнара крандарының конструкцияларына морфологиялық талдау жасалды, бұл жебенің ұтымды параметрлері мен перспективалық материалдарды таңдауды негіздеуге мүмкіндік берді. S235 құрылымдық болаттан жасалған және көміртекті талшықты композиттік материалдан (CFRP) жасалған жебелерді салыстыру жұмыстары жүргізілді. Құрылымның кернеулі-деформацияланған күйін бағалау үшін аналитикалық есептеулер мен SolidWorks Simulation бағдарламалық ортасындағы ақырлы элементтер әдісімен сандық модельдеуді қолдану арқылы жүзеге асырылады.

Зерттеу нәтижелері композиттік материалды қолдану болат құрылымымен жасалған мұналары жебелерге қарағанда салыстырғанда максималды кернеулерді 45-50% - га және ауытқуларды шамамен екі есе азайта отырып, негіздеме массасының төмендеуін қамтамасыз ететінін көрсетті. Алынған мәліметтер мұнара крандарының конструкциясында композиттік материалдарды олардың пайдалану тиімділігін, тұрақтылығы мен сенімділігін арттыру үшін пайдаланудың орындылығын растайды. Алынған нәтижелер мұнара крандарының жебе құрылымында композиттік материалдарды қолданудың тиімділігін дәлелдейді және қазіргі құрылыс саласындағы инженерлік есептер мен жобалау тәжірибесінде тиімді қолдануға болады.

Кілтті сөздер: мұнара краны, құрылыс техникасы, жүк көтергіш механизмдер, конструкциялық шешімдер, морфологиялық сараптама, тұрақтылық, қауіпсіздік жүйелері, заманауи технологиялар.

Кіріспе

Мұнаралы крандар өз алдына құрылыс техникасының бір бөлігі болып табылады. Қазіргі кезде құрылыстың дамуымен бірге мұнара крандары техниканың маңызды түрлерінің бірі болып табылады. Көбінесе көпқабатты тұрғын үйлерді, өндірістік кешендер мен инфрақұрылымдық нысандарды салу кезінде мұнара крандарын қолдану кеңінен таралған. Құрылыс көлемінің артуына байланысты, ғимараттардың қабаттар санының артуына және құрылыс мерзімін қысқарту қажеттілігі мұнара крандарының техникалық деңгейіне жоғары талаптар қояды.

Соңғы жылдары мұнара крандарының конструкциялары айтарлықтай өзгерістерге ұшырады, олардың ішінде: тұрақты орнатылған, жылжымалы, және өздігінен көтерілетін, доңғалақты шассиде тасымалданатын және өздігінен жүретін түрлері бар. Бұл өзгерістер жүк көтергіштікті арттырумен қатар, қауіпсіздікті күшейтуге, монтаждау мен демонтаждау үдерістерін оңтайландыруға және эксплуатациялық шығындарды азайтуға бағытталған. Осыған байланысты мұнара крандарының заманауи конструкцияларын кешенді түрде талдау және оларды жетілдіру бағыттарын анықтау өзекті ғылыми-техникалық мәселе болып табылады [1, 29-б].

Мұнаралы крандар келесі тапсырмаларды орындайды:

– Құрылыс материалдарын көтеру және тасымалдау;

– Тақтайларды, еденderді, ғимараттардың басқа элементтерін орнату және монтождау;

– Ауыр техникамен жұмыс жасау: құрылыс машиналарын орналастыру, құрылымдарды орнату.;

– Биіктік жұмыстарын аяқтау, құрылыс бетін, терезелерді және басқа элементтерді орнату жұмыстары (сурет 1) [1, 57-б];

1-сурет – Мұнаралы кран

Мұнара крандарының жебелерін жобалау кезінде құрылымның минималды массасымен қажетті беріктікті, қаттылықты және тұрақтылықты қамтамасыз ететін ұтымды құрылымдық шешімді таңдау қажет болады. Қазіргі жұмыс жағдайлары, сондай-ақ жебелердің ұшуы мен көтерілу биіктігінің арту үрдісі жел жүктемелерінің және динамикалық әсерлердің артуына әкеледі. Бұл жағдайда болатты қолдануға негізделген дәстүрлі конструктивті тәсілдер әрқашан масса мен қаттылықтың оңтайлы арақатынасын қамтамасыз ете бермейді.

Морфологиялық талдау ықтимал сындарлы шешімдерді іздеудің және бағалаудың жүйелік әдісі ретінде қолданылады. Оны пайдалану дизайн процесін құрылымдауға және материалды, тірек тізбегінің түрін, көлденең қиманың пішінін және элементтердің орналасуын қоса алғанда, дизайн параметрлері комбинацияларының максималды санын қарастыруға мүмкіндік береді. Интуитивті таңдаудан айырмашылығы, морфологиялық тәсіл баламаларды ғылыми негізделген салыстыруды қамтамасыз етеді және әрі қарай егжей-тегжейлі зерттеудің ең перспективалы нұсқаларын анықтауға мүмкіндік береді

Бұл жұмыста морфологиялық талдауды қолдану жел жүктемелеріне төзімді және жоғары қаттылыққа ие мұнара кранының жебесінің ұтымды дизайнын таңдау қажеттілігіне байланысты. Талдау нәтижесінде рұқсат етілген дизайн шешімдерінің жиынтығы қалыптасады, олардың ішінен соңғы элементтер әдісімен сандық модельдеудің негізгі нұсқалары таңдалады (кесте 1) [2, 35-43-бб.].

1-кесте – Морфологиялық нұсқалар

Тірек жүйелері	Іргетасты	Рельсті	Ғимаратқа бекітілген
Мұнара құрылымы	Торлы	Қорапты	Модульдік
Мұнара биіктігін арттыру	Секцияларды кранмен орнату	Гидравликалық өзін – өзі көтеру	
Жебе түрі	Горизонталь	Көтерілетін жебе	Телескопиялық жебе
Айналу механизмі	Жоғары айналмалы	Төменгі айналмалы	
Жүк көтеру механизмі	Электр жетегі	Жиілік түрлендіргіштігі	Көп арқанды
Қарсы салмақ жүйесі	Тұрақты қарсы салмақ	Реттелетін қарсы салмақ	
Тұрақтылықты қамтамасыз ету	Қарсы салмақ + іргетас	Анкерлік бекіту	Автоматты тұрақтылық бақылау
Басқару жүйесі	Кабинадан қолмен	Қашықтан басқару	Жартылай автоматты
Қауіпсіздік жүйелері	Жүктеме шектеуіш	Жел датчигі	Апаттық тоқтату жүйесі
Материалдар	Құрылымдық болат	Жоғары берікті болат	Композит элементтер
Цифрлық технологиялар	Қарастырылмаған	Мониторинг жүйесі	BIM/IoT интеграциясы

Тірек жүйелері – $А_1$, $А_2$, $А_3$
Мұнара құрылымы – $Б_1$, $Б_2$, $Б_3$,
Мұнара биіктігін арттыру – $В_1$, $В_2$
Жебе түрі – $Г_1$, $Г_2$, $Г_3$
Айналу механизмі – $Д_1$, $Д_2$
Жүк көтеру механизмі – $Е_1$, $Е_2$, $Е_3$

Қарсы салмақ жүйесі – $Ж_1$, $Ж_2$
Тұрақтылықты қамтамасыз ету – $З_1$, $З_2$, $З_3$
Басқару жүйесі – $К_1$, $К_2$, $К_3$
Қауіпсіздік жүйелері – $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$
Материалдар – $М_1$, $М_2$, $М_3$

Цифрлық технологиялар – $Н_1$, $Н_2$, $Н_3$
Барлығы $А^3хБ^3хВ^2хГ^3хД^2хЕ^3хЖ^2хЗ^3хК^3хД^3хМ^3хН^3$=157 764.

Осылайша, морфологиялық талдау зерттелетін жебенің материалдары мен геометриялық параметрлерін таңдауға логикалық негізделген ауысуды қамтамасыз ететін қолданыстағы конструкцияларды шолу мен есептелген модельдеу кезеңі арасындағы аралық қадам болып табылады [3].

Материалдар мен әдістері

Зерттеу нысаны-желдің әсерінен жұмыс істейтін үлкен ұзындықтағы мұнара кранының жебесі. Жебенің дизайны кеңістіктік ферма жүйесі ретінде ұсынылған, ол есептеу үшін иілу қаттылығын сақтай отырып, эквивалентті сәулелік модельге келтірілген.

Жебенің ұзындығы 50 м құрайды, бұл қазіргі заманғы орта және үлкен мұнара крандарына сәйкес келеді [4, 35 – 47-бб.].

Жұмыста жебе дизайнының екі нұсқасы салыстырылды (кесте 2)

2-кесте – Салыстырмалы жебе дизайнының нұсқасы

	S235 құрылымдық болат	Көміртекті талшыққа негізделген композициялық материал (CFRP)
Тығыздығы:	7850 кг / м³	1600 кг / м3
Серпімділік модулі	210 ГПа	350 ГПа
Пуассон Коэффициенті	0,3	0,2
Аққыштық шегі:	235 МПа	500 МПа

Композициялық материал жоғары қаттылық пен беріктіктің арқасында жеңіл жүк көтергіш құрылымдар үшін перспективалы ретінде таңдалады.

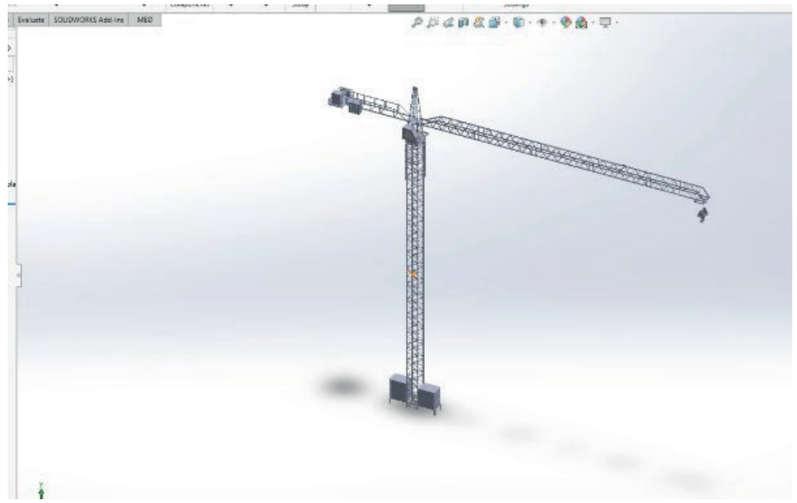
Зерттеу SolidWorks Simulation бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, соңғы элементтер әдісімен жүзеге асырылады (сурет 2).

Есептеуге мыналар кірді:
– үш өлшемді жебе моделін құру;
– материалдардың физикалық қасиеттерін анықтау;
– ақырлы элементтік торды құру;
– жүктемелер мен шекаралық шарттарды қолдану;
– кернеулер мен қозғалыстарды талдау.

Жебенің негізі қатты бекітілген деп саналды, бұл жебенің кран мұнарасына нақты қосылуына сәйкес келеді. Құрылымның қалған бөліктері бос.

Жүктеме жебенің бүйір беттеріне біркелкі бөлінген қысым түрінде қолданылды. Сонымен қатар, құрылымның өзіндік салмағы ескерілді.

Зерттеудің мақсаты - жебе конструкциясының материалының желдің әсерінен оның кернеулі деформацияланған күйіне әсерін бағалау және мұнара крандарында композиттік материалдарды қолдану тиімділігін анықтау [5].



2-сурет – Solidworks Simulation жобаланған мұнаралы кран

Мұнара кранының жебесі мұнараға мықтап бекітілген айнымалы қаттылық консолі ретінде қарастырылды. Жебенің ұзындығы қабылданды L = 50 м.

Жебенің бос ұшына болжамды жүк жүктемесі қолданылды

$$P = 16т = 157000Н.$$

Сонымен қатар, біркелкі бөлінген қысым түріндегі жел жүктемесі ескерілді p = 0.5 кПа. Эквивалентті сызықтық жүктеме жебесі:

$$q = p \cdot h = 500 \cdot 3 = 1500 H/м.$$

мұндағы h-жебе фермасының болжамды биіктігі.

Мұнара құрылымын жеңілдету үшін жебенің ферма құрылымы бірдей иілу кедергісі бар эквивалентті сәулемен ауыстырылады.b = 1.2 м, h = 2.0 м [6;7].

Инерция моменті:

$$I = \frac{bh^3}{12} = 0{,}8м^4.$$

Шеткі талшыққа дейінгі қашықтық c = 1.0 м. Иілу моментін анықтау үшін шоғырланған жүктемеден [8; 9]:

$$M_P = P{\cdot}L = 157000\ 50 = 7.85\ 10^6\ Н{\cdot}м.$$

Жел жүктемесінен:

$$M_q = \frac{qL^2}{2} = 1{,}875 \cdot 10^6 \text{Н·м.}$$

Жебенің түбіндегі жалпы момент:

$$\text{M}_{\text{max}} = 9{,}725\ 10^6 \text{Н·м.}$$

Максималды иілу кернеулері:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot c}{I} = 12{,}2\text{МПа.}$$

Иілуді есептеу. Шоғырланған жүктемеден ауытқу:

$$\delta_q = \frac{PL^3}{3EI}.$$

Желден ауытқу:

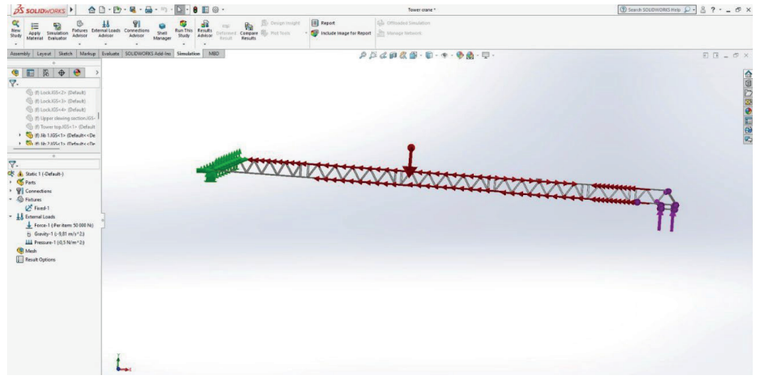
$$\delta_q = \frac{qL^4}{8EI}.$$

S235 болат үшін δ_q =1000 мм.

Көміртекті талшыққа негізделген композициялық материал (CFRP) үшін δ ≈ 550 мм [10, 58 – 63-бб.].

Мұнара кранының жебе дизайнында Болаттың орнына көміртекті пластикті қолдану максималды кернеулердің шамамен 45-50% төмендеуіне және иілудің шамамен 2 есе төмендеуіне әкеледі. Бұл композициялық материалдың жоғары қаттылығына байланысты, бұл оны жеңіл жүк көтергіш құрылымдар үшін перспективалы етеді [10].

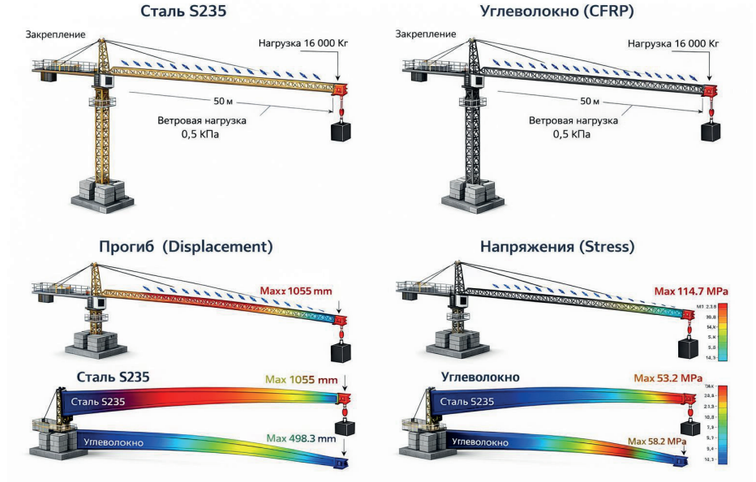
Зерттеудің келесі кезеңінде SolidWorks Simulation бағдарламасында модельдеу әдістерін екі материал үшін берілген жүктемелердегі дизайн әрекетін талдау үшін қолданылды (сурет 3).



3-сурет – Әсер етілген жүктемелер

Осы кезеңде алынған аналитикалық нәтижелерді нақтылау және жебе конструкциясының жұмыс қабілетін жан-жақты бағалау мақсатында SolidWorks Simulation бағдарламалық ортасында сандық модельдеу жүргізілді. Модельдеу соңғы элементтер әдісіне (FEM) негізделіп, жебе конструкциясының нақты геометриясын, материалдық қасиеттерін және жұмыс жүктемелерін ескере отырып орындалды.

SolidWorks Simulation ортасында болат және композиттік материалдан жасалған жебе модельдері үшін кернеулі-деформацияланған күйі, орын ауыстырулар мен эквивалентті кернеулердің таралуы анықталды (сурет 4).



4-сурет – SolidWorks Simulation-дағы мұнара кранының жүктемесінің жобалық сұлбасы

Нәтижелер және талқылау

Бұл жұмыста жел жүктемелері жағдайында жұмыс істейтін мұнара кранының құрылымында композиттік материалдарды қолдану тиімділігі бағаланды. Морфологиялық талдау негізінде мұнара крандарының мүмкін болатын құрылымдық шешімдері қарастырылды және бүкіл құрылымның беріктігін, қаттылығы мен тұрақтылығын анықтайтын негізгі элемент ретінде мойынды таңдау негізделді.

Зерттеу барысында S235 құрылымдық болат пен көміртекті талшық негізіндегі композициялық материалдың (CFRP) екі тірек материалының нұсқалары салыстырылды. Аналитикалық есептеулер және SolidWorks Simulation ортасындағы ақырлы элементтер әдісімен сандық модельдеу композиттік материалды қолдану оның қаттылығын арттыра отырып, құрылымның массасын едәуір төмендетуге мүмкіндік беретіндігін көрсетті [10].

Жүктеме жағдайлары бірдей болған кезде композициялық материалдан жасалған құлақтағы максималды иілу кернеулері Болат конструкциямен салыстырғанда 45–50 %-ға төмендейді, ал иілу мөлшері шамамен екі есе азаяды. Бұл жел және пайдалану жүктемелеріне ұшыраған кезде желбезектің неғұрлым қолайлы кернеулі-деформацияланған күйін көрсетеді.

Қорытынды

Алынған нәтижелер пайдалану сенімділігін, тұрақтылығын және энергия тиімділігін арттыру тұрғысынан мұнара крандарының конструкциясында композиттік материалдарды пайдалану перспективасын растайды. Композиттерді қолдану тірек элементтері мен іргетастарға жүктемені азайтуға, сондай-ақ беріктік сипаттамаларын нашарлатпай көтерілу мен көтерілу биіктігін арттыру мүмкіндіктерін кеңейтуге мүмкіндік береді.

Бұл жұмыстың нәтижелері мұнара крандарын жобалау және жаңарту кезінде, сондай-ақ заманауи материалдар мен сандық есептеу әдістерін қолдана отырып, көтергіш-көлік машиналарының конструкцияларын оңтайландыруға бағытталған әрі қарайғы зерттеулерде қолданыла алады.

REFERENCES

1 **Ahmed, S, Wang, H. P., Tian, Y.** Adaptive High-Order Terminal Sliding Mode Control Based on Time Delay Estimation for the Robotic Manipulators With Backlash Hysteresis. Ieee transactions on systems man cybernetics-systems 51(2). – P. 1128–1137.

2 **Feng, R., Zhang, E., Dong, M.** Jib vibration and payload swing of tower cranes in the case of trolley motion. Arabian Journal of Science and Engineering. – 2021. – Vol. 46. – № 12. – P. 12179–12191. – https://doi.org/10.1007/S13369-021-05804-3.

3 **Zeng, G., Chen, K., Wang, Y. et al.** Stress and strain analysis and parameter optimization of pipe truss tower connection of super-large tower crane based on FEM. Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – 3670. – https://doi.org/10.1038/s41598-024-54351-y.

4 **Rubio-Avila, J. J., Alcantara-Ramirez, R., Jaimes-Ponce, J., Siller-Alcala, I. I.** Design, construction, and control of a novel tower crane. International journal of mathematics and computers in simulation. – 2007. – Vol. 1. – iss. 2.

5 **Augustyn, M., Barski, M., Chwał, M., Stawiarski, A.** Experimental and Numerical Estimation of the Aerodynamic Forces Induced by the Wind Acting on a Fast-Erecting Crane. Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 19. – P. 10826. – https://doi.org/10.3390/app131910826.

6 **Jin L., Liu H., Zheng, X., Chen, S.** Exploring the Impact of Wind Loads on Tower Crane Operation. Mathematical Problems in Engineering. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–11. – https://doi.org/10.1155/2020/2807438.

7 **Chen W., Qin X. R., Yang Z., Zhan P.** Wind-induced tower crane vibration and safety evaluation. Journal of Low Frequency Noise, Vibration & Active Control. – 2020. – Vol. 39. – P. 297–312. – https://doi.org/10.1177/1461348419847306.

8 **Alhassan A.B., Arif S.M.U., Haruna A., Talapiden K. et al.** Comprehensive tower crane dynamics: an experimental dataset of trajectories and payload oscillations for system identification and machine learning-based control // Data in Brief. – 2025. – Vol. 61. – Article 111822.

9 **Tulekov A., Sazambayeva B., Togizbayeva B., Kenesbek I.** The use of innovative materials for the development of tower cranes // Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series. – 2024. – Vol. 146. – № 1. – P. 201–221.

10 **Tulekov, A., Sazambayeva, B., Kenesbek, A., Kenesbek, I.** Determination of metal fatigue of a tower crane using software. Bulletin of L. N. Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series, 2024. – Vol. 146. – № 1. – P. 189–200.

02.02.26 ж. баспаға түсті.
04.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
13.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. Б. Тулеков[1], Т. Б. Сулейменов[2], *К. Г. Балабекова[3], А. Б. Забиева[4]
[1,2,3,4]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана
Поступило в редакцию 02.02.26.
Поступило с исправлениями 04.02.26.
Принято в печать 13.02.26.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА В КОНСТРУКЦИИ СТРЕЛЫ БАШЕННОГО КРАНА

В работе рассматривается эффективность применения композитных материалов в конструкции стрелы башенного крана, работающей в условиях ветровых нагрузок. В условиях современного строительства повышение высотности зданий и ужесточение требований к безопасности и надёжности

подъёмных механизмов обуславливают необходимость совершенствования конструктивных решений башенных кранов.

В рамках исследования выполнен морфологический анализ конструкций башенных кранов, позволивший обосновать выбор рациональных параметров стрелы и перспективных материалов. Проведено сравнение стрелы, изготовленной из конструкционной стали S235, и стрелы из композитного материала на основе углеродного волокна (CFRP). Оценка напряжённо-деформированного состояния конструкции выполнена с использованием аналитических расчётов и численного моделирования методом конечных элементов в среде SolidWorks Simulation.

Результаты исследования показали, что применение композитного материала обеспечивает снижение массы стрелы при одновременном уменьшении максимальных напряжений на 45–50 % и прогибов примерно в два раза по сравнению со стальной конструкцией. Полученные данные подтверждают целесообразность использования композитных материалов в конструкции стрел башенных кранов для повышения их эксплуатационной эффективности, устойчивости и надёжности.

Ключевые слова: башенный кран, строительная техника, грузоподъемные механизмы, конструктивные решения, морфологический анализ, устойчивость, системы безопасности, современные технологии.

A. B. Tulekov[1], T. B. Suleimenov[2], K. G. Balabekova[3], *A. B. Zabieva[4]
[1,2,3,4]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana
Received 02.02.26.
Received in revised form 04.02.26.
Accepted for publication 13.02.26.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF COMPOSITE MATERIAL IN THE BOOM STRUCTURE OF TOWER CRANE

The paper considers the effectiveness of the use of composite materials in the construction of a tower crane operating under wind loads. In the conditions of modern construction, increasing the height of buildings and stricter requirements for the safety and reliability of lifting mechanisms necessitate the improvement of structural solutions for tower cranes.

As part of the study, a morphological analysis of tower crane structures was performed, which made it possible to justify the choice of rational pipe parameters and promising materials. A toad made of S235 structural steel and a toad made of carbon fiber-based composite material (CFRP) has been compared. The evaluation of the stress-strain state of the structure was performed using analytical calculations and numerical modeling using the finite element method in the SolidWorks Simulation environment.

The results of the study showed that the use of a composite material reduces the weight of the toad while reducing maximum stresses by 45-50% and deflections by about two times compared to a steel structure. The data obtained confirm the

expediency of using composite materials in the construction of concrete tower cranes to increase their operational efficiency, stability and reliability.

Keywords: tower crane, construction machinery, lifting mechanisms, structural solutions, morphological examination, stability, safety systems, modern technologies.

МРНТИ 73.41.19

https://doi.org/10.48081/BGQF1931

***С. С. Усупов[1]**

[1]Алматинский технологический университет, Республика Казахстан, г. Алматы

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5772-9295

[1]e-mail: s.ussupov@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИВОДНОГО БАРАБАНА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПРИ ПЕРЕМЕННОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ТРЕНИЯ

В данной статье представлена теоретическая зависимость тяговой способности приводного барабана ленточного конвейера от различных факторов при переменном коэффициенте трения. В статье приводятся анализ существующих методов расчета тяговой способности привода, который показал, что основным является правильный выбор обоснованного значения коэффициента сцепления. Коэффициент сцепления принимается из рекомендаций, базирующихся на результатах экспериментальных исследований. Эти значения, представленные в табличной форме, не учитывают всю гамму тех факторов, которые влияют на передачу ленте тягового усилия приводным барабаном, в частности конструктивных параметров привода конвейера (диаметр барабана, ширину ленты, толщину футеровки), физико-механических свойств ленты и футеровки барабана, а также режимов работы конвейера (скорости движения ленты). Как показывают исследования, величина тяговой способности с увеличением радиуса барабана или ширины ленты довольно интенсивно возрастает по закону, близкому к линейному. Так, при увеличении одной из этих величин в 5 раз тяговая способность увеличивается приблизительно в 2,9 раза. Менее значительное влияние на тяговая способность имеет изменение жесткости ленты E_0. При увеличении E_0 в 10 раз тяговая способность уменьшается на 2 %. Величина тяговой способности с увеличением угла относительного скольжения ленты интенсивно возрастает.

Ключевые слова: ленточный конвейер, приводной барабан, тяговая способность, коэффициент трения, тяговое усилие, футеровка барабана.

Введение

Одним из важнейших звеньев в технологическом процессе добычи полезных ископаемых является транспорт, непрерывные виды которого в связи с техническим совершенствованием будут осуществлять всё большую долю перевозок. Конвейеризация подземных и открытых разработок является наиболее эффективным решением задачи комплексной механизации и автоматизации транспортных и погрузочно-разгрузочных работ и позволяет существенно снизить затраты на добычу полезных ископаемых.

Значительное увеличение объемов добычи на горных предприятиях ставит задачу применения в системах непрерывного транспорта мощных высокопроизводительных и надежных ленточных конвейеров, эффективность использования которых в существенной мере зависит от качественного его проектирования. Одной из важнейших задач проектирования является определение тяговой способности приводного барабана.

В настоящее время расчет тяговой способности приводных барабанов ленточных конвейеров основан на формуле Эйлера с поправками Н. Е. Жуковского и Н. П. Петрова. Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что теоретическая зависимость расходится с данными эксперимента. Для устранения этого несоответствия вместо коэффициента трения вводится некоторый условный коэффициент сцепления между лентой и барабаном. Анализ существующих методов расчета тяговой способности привода показал, что основным является правильный выбор обоснованного значения коэффициента сцепления. Коэффициент сцепления принимается из рекомендаций, базирующихся на результатах проведенных ранее экспериментальных исследований. Эти значения, представленные в табличной форме, не учитывают всю гамму тех факторов, которые влияют на передачу ленте тягового усилия приводным барабаном, в частности конструктивных параметров привода конвейера (диаметр барабана, ширину ленты, толщину футеровки), физико-механических свойств ленты и футеровки барабана, а также режимов работы конвейера (скорости движения ленты). Поэтому при расчетах для надежной работы привода принимают, как правило, уменьшенные значения коэффициента сцепления. Это приводит к необходимости применять многобарабанные привода большой стоимости или перетягивать конвейерную ленту, повышая тем самым ее требуемую прочность, а следовательно, и стоимость, Неточная оценка тяговой способности приводного барабана приводит к неправильному распределению нагрузок в многобарабанных приводах, к неустойчивой их работе и возникновению пробуксовок.

Цель настоящей работы является установление зависимости тяговой способности приводного барабана от параметров, характеризующих взаимодействие ленты с футерованным приводным барабаном, для создания методики определения уточненной тяговой способности привода ленточных конвейеров в целях повышения эффективности их использования при эксплуатации на горных предприятиях.

Повышение эффективности использования привода ленточных конвейеров достигается за счет уточнения тяговой способности приводного барабана путем установления экспериментальных зависимостей коэффициента трения скольжения ленты о поверхность барабана с учетом напряженного состояния трущихся поверхностей.

Материалы и методы

При определении тягового усилия, осуществляемого барабаном, обычно коэффициент оцепления в уравнении Эйлера принимается величиной постоянной [1]. В действительности же, как отмечалось выше, коэффициент трения между

лентой и барабаном зависит как от давления ленты на барабан, так и от скорости ее проскальзывания по барабану.

Как известно [1], натяжение ленты при прохождении ее через приводной барабан определяется зависимостью

$$\frac{dS}{d\alpha} = fS \tag{1}$$

где dS – приращение силы натяжения, Н,
dα – приращение угла обхвата, рад,
α – угол до рассматриваемого сечения ленты, рад,
f – коэффициент трения ленты о поверхность барабана.

Зависимость коэффициента трения от натяжения ленты примем в виде [2]

$$f = \frac{D_1 S + D_2}{S^{k_2}} \tag{2}$$

где

$$D_1 = \frac{a_2 V R^{k_2} B^{k_2}}{E_0}$$
$$D_2 = b_2 R^{k_2} B^{k_2}$$

где a_1, a_2, b_1, b_2, k_1, k_2 – коэффициенты, определяемые экспериментально,
R – радиус барабана, м;
B – ширина ленты, м,
V – линейная скорость вращения обечайки барабана, м/с.

Учитывая, что в экспериментальных исследованиях по определению коэффициента трения f можем получить самые различные зависимости от скорости скольжения и давления на ленту, найдем величины $S_{нб}$ и $S_{сб}$ для ряда возможных случаев.

Подставляя значение коэффициента трения f в уравнение (1), найдем:

$$\frac{dS}{d\alpha} = \frac{(D_1 S + D_2)S}{S^{k_2}}. \tag{3}$$

Решение уравнения (3) может быть представлено в следующих видах:

1) при k_2=0

$$\int_{S_{сб}}^{S_{нб}} \frac{dS}{(D_1 S + D_2)S} = \int_0^{\alpha_c} d\alpha,$$

усилие в набегающей на барабан ветви будет равно

$$S_{нб} = \frac{D_2 e^{D_2 \alpha_c} S_{сб}}{D_1 S_{сб}\,(1 - e^{D_2 \alpha_c}) + D_2}$$

Тяговая способность приводного барабана будет равна

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} = \frac{D_2 e^{D_2 \alpha_c}}{D_1 S_{сб}\,(1 - e^{D_2 \alpha_c}) + D_2}$$

где $S_{нб}$, $S_{сб}$ – усилие в ленте, соответственно, в набегающей и сбегающей ветви, Н;
α_c – угол передачи тягового усилия, рад.

В этом случае тяговое усилие будет равно

$$W_0 = S_{сб} \frac{(1 - e^{D_2 \alpha_c})(D_1 S_{сб} + D_2)}{D_1 S_{сб}\,(e^{D_2 \alpha_c} - 1) - D_2}$$

2) при k_2=0,5

$$\int_{S_{сб}}^{S_{нб}} \frac{dS}{(D_1 S + D_2)\sqrt{S}} = \int_0^{\alpha_c} d\alpha$$

усилие в набегающей на барабан ветви будет равно

$$S_{нб} = \frac{D_2}{D_1} tg^2 \left(\frac{\sqrt{D_1} D_2}{2} \alpha_c + arctg \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} S_{сб}\right) \tag{4}$$

3) при k_2=1

$$\int_{S_{сб}}^{S_{нб}} \frac{dS}{(D_1 S + D_2)} = \int_0^{\alpha_c} d\alpha$$

усилие в набегающей на барабан ветви будет равно

$$S_{нб} = S_{сб} e^{D_1 \alpha_c + \frac{D_2}{D_1}} (e^{D_1 \alpha_c} - 1)$$

тяговое усилие, передаваемое барабаном

$$W_0 = (S_{сб} + \frac{D_2}{D_1})(e^{D_1 \alpha_c} - 1)$$

4) при k_2=1,5

$$\int_{S_{сб}}^{S_{нб}} \frac{\sqrt{S}dS}{(D_1S+D_2)} = \int_0^{\alpha_c} d\alpha$$

$$\sqrt{S_{нб}} - \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}arctg\sqrt{\frac{D_1S_{нб}}{D_2}} = \frac{D_1\alpha_c}{2} + \sqrt{S_{сб}} - \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}arctg\sqrt{\frac{D_1S_{сб}}{D_2}}$$

5) при k_2=2

$$\int_{S_{сб}}^{S_{нб}} \frac{dS}{(D_1S+D_2)S} = \int_0^{\alpha_c} d\alpha$$

$$S_{нб} - S_{сб} - \frac{D_2}{D_1} ln\frac{D_1S_{нб}+D_2}{D_1S_{сб}+D_2} = D_1\alpha_c;$$

Тяговое усилие определяется из выражения

$$\frac{W_0}{\exp(\frac{D_1}{D_2}W_0)} = \frac{S_{сб} + D_1/D_2}{\exp(D_1^2/D_2\alpha_c}$$

В качестве примера рассмотрим результаты экспериментальных исследований коэффициента трения резины по резине при изменении скорости скольжения и давления. Было получено значение коэффициентов a_2=0,12; b_2 = 0,37 и k_2 = 0,5. При этих условиях зависимость коэффициента трения f_2 = f(S) имеет вид гиперболы. В этом случае $S_{нб}$ от $S_{сб}$ определяется уравнением (4) и зависит от угла обхвата лентой барабана α_c, радиуса барабана R, ширины ленты B, ее жесткости E_0 и скорости конвейера V.

Результаты и обсуждение

Как показывают исследования, величина $S_{нб}/S_{сб}$ с увеличением R или B довольно интенсивно возрастает по закону, близкому к линейному. Так, при увеличении одной из этих величин в 5 раз отношение $S_{нб}/S_{сб}$ увеличивается приблизительно в 2,9 раза. Менее значительное влияние на отношение Sнб /Scб имеет изменение жесткости ленты E_0. При увеличении E_0 в 10 раз отношение $S_{нб}/S_{сб}$ уменьшается на 2 %. Зависимость $S_{нб}/S_{сб}$ от угла относительного скольжения ленты αс представлена на рисунке 1, из данных которого видно, что с увеличением угла относительного скольжения значение $S_{нб}/S_{сб}$ интенсивно возрастает. При этом чем больше скорость движения ленты, тем больше интенсивность возрастания значения $S_{нб}/S_{сб}$. На графике (рис. 1), с целью сравнения полученной зависимости (4) с уравнением Эйлера, представлена зависимость μ=f(α), которая показывает (при V=3 м/с), каким должен был бы приниматься коэффициент сцепления $\mu_п$, чтобы значения $S_{нб}/S_{сб}$ по обеим формулам для одних и тех же αс совпадали. Можем видеть, что для принятых значений B, R, E_0 и α_c, при изменении угла α_c в 4 раза, значение $\mu_п$ следует уменьшить приблизительно в 1,4 раза.

Исследования показывают, что принимаемые значения μп при расчетах по формуле Эйлера не отражают целый ряд физических свойств лент и параметров привода и принимаются заведомо заниженными в ряде случаев, чтобы создать уверенность у проектировщиков при разработке приводов.

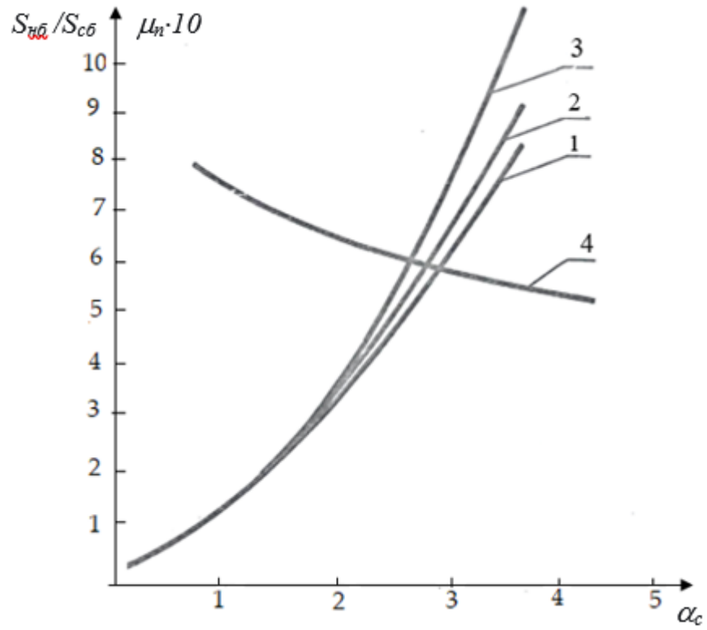


Рисунок 1 – Зависимость тягового фактора $S_{нб}/S_{сб}$ и приведенного коэффициента сцепления θп от угла скольжения α_c: 1 – при $V_л$ = 1 м/с, 2 – при $V_л$ =2 м/с, 3 – при $V_л$ = 3 м/с, 4 – зависимость $\mu_п$ = f(α_c)

Выводы

1 Коэффициент трения скольжения конвейерной ленты по поверхности футеровки приводного барабана является величиной переменной по всей дуге относительного скольжения и зависит от модуля упругости ленты, скорости ее движения и усилия натяжения.

2 Тяговая способность футерованного приводного барабана ленточного конвейера при передаче тягового усилия ленте зависит от параметров привода (радиуса барабана R, ширины ленты B, угла обхвата лентой барабана α_c, скорости движения ленты $V_л$), физико-механических свойств ленты и футеровки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Усупов, С. С.** Современное представление о передаче тягового усилия приводным футерованным барабаном ленточного конвейера. [Текст] // Международный научный журнал Инновационная наука. ООО «Аэтерна», Уфа, 2025. – № 5-2/2025. – С. 73–75.

2 **Усупов, С. С.** Определение коэффициента трения ленты о футеровку при движении приводного барабана [Текст] : сборник статей Международной научно–практической конференции (г. Калуга, РФ, 12 марта 2025г.). – Уфа : Omega science, 2025. – С. 98–101.

3 **Галкин, В. И., Дмитриев, В. Г., Дьяченко, В. П., Запенин, И. В., Шешко, Е. Е.** Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий [Текст]. – Москва : Издательство «Горная книга», 2011. – 545 с.

4 **Гончаров, К. А.** Комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров/ К. А. Гончаров, В. П. Дунаев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2018. – № 2. – С. 144–151.

5 **Галкин, В. И.** Влияние эксплуатационных параметров специальных типов ленточных конвейеров на выбор их лент [Текст] / В. И. Галкин, Е. Е. Шешко // Горный информационно-аналитический бюл. – Москва: ООО «Горная книга» МГГУ, 2015. – № S1. – С. 464–481.

6 **Галкин, В. И.** Влияние физико-механических свойств лент на пусковые процессы ленточных конвейеров [Текст] / В. И. Галкин, Е. С. Сазанкова // Горный информационно-аналитический бюл. – Москва: ООО «Горная книга» МГГУ, 2014. – № S6. – С. 19–35.

7 **Галкин, В. И.** Современные ленты для специальных ленточных конвейеров [Текст] / В. И. Галкин, Е. Е. Шешко // Горный информационно-аналитический бюл. – Москва: ООО «Горная книга» МГГУ, 2016. – № S1. – С. 382–395.

8 **Галкин, В. И.** Обоснование областей эффективного применения специальных видов конвейеров на карьерах [Текст] / В.И. Галкин, Е.Е. Шешко // Горный информационно-аналитический бюл. – Москва: ООО «Горная книга» МГГУ, 2014. – № S1. – С. 400–410.

9 **Галкин, В. И.** Современные резинотканевые конвейерные ленты – возможная альтернатива резинотросовым лентам для горной промышленности [Текст] / В. И. Галкин, Е. С. Сазанкова // Горный информационно-аналитический бюл. – Москва: ООО «Горная книга» МГГУ, 2012. – № 7. – С. 184–192.

10 **Галкин, В. И.** Конструктивные особенности резинотросовых лент для ленточных конвейеров в горной промышленности [Текст] / В. И. Галкин, Е. С. Сазанкова // Горный информационно-аналитический бюл. – Москва: ООО «Горная книга» МГГУ, 2014. – № 5. – С. 172–179.

REFERENCES

1 **Usupov, S. S.** Sovremennoye predstavleniye o peredache tyagovogo usiliya privodnym futerovannym barabanom lentochnogo konveyyera. [Modern concept of traction force transmission by a driven lined drum of a belt conveyor] [Text] // International scientific journal Innovative Science. OOO Aeterna, Ufa. – 2025. – № 5-2/2025. – P. 73–75.

2 **Usupov, S. S.** Opredeleniye koeffitsiyenta treniya lenty o futerovku pri dvizhenii privodnogo barabana [Determination of the coefficient of friction of the belt on the lining during the movement of the drive drum] [Text]: collection of articles from the International scientific and practical conference (Kaluga, Russian Federation, March 12, 2025). – Ufa : Omega science, 2025. – P. 98–101.

3 **Galkin, V. I., Dmitriev, V. G., Dyachenko, V. P., Zapenin, I. V., Sheshko, E. E.** Sovremennaya teoriya lentochnykh konvejerov gornykh predpriyatij. [Modern theory of belt conveyors of mining enterprises] [Text]. – M. : Publishing house «Gornaya kniga», 2011. – 545 p.

4 **Goncharov, K. A.** Kompleksnyj podkhod k tyagovomu raschetu lentochnykh konvejerov. [Integrated approach to traction calculation of belt conveyors] [Text] / K.A. Goncharov, V.P. Dunaev // Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University, 2018. – № 2. – P. 144–151.

5 **Galkin, V. I.** Vliyanie ehkspluatacionnykh parametrov specialnykh tipov lentochnykh konvejerov na vybor ikh lent. [Influence of operating parameters of special types of belt conveyors on the choice of their belts] [Text] / V. I. Galkin, E. E. Sheshko // Mining information and analytical bulletin. – M. : OOO «Gornaya kniga» MGMU, 2015. – № S1. – P. 464–481.

6 **Galkin, V. I.** Vliyanie fiziko-mekhanicheskikh svojstv lent na puskovye process lentochnykh konvejerov. [Influence of physical and mechanical properties of belts on the starting processes of belt conveyors] [Text] / V. I. Galkin, E. S. Sazankova // Mining information and analytical bulletin. – M. : OOO «Gornaya kniga» MGMU, 2014. – № S6. – P. 19–35.

7 **Galkin, V. I.** Sovremennye lenty dlya specialnykh lentochnykh konvejerov. [Modern belts for special belt conveyors] [Text] / V. I. Galkin, E. E. Sheshko // Mining information and analytical bulletin. – M. : OOO «Gornaya kniga» MGMU, 2016. – № S1. – P. 382–395.

8 **Galkin, V. I.** Obosnovanie oblastej ehffektivnogo primeneniya specialnykh vidov konvejerov na karerakh. [Justification of areas of effective application of special types of conveyors in quarries] [Text] / V. I. Galkin, E. E. Sheshko // Mining information and analytical bulletin. – M. : OOO «Gornaya kniga» MGMU, 2014. – № S1. – P. 400–410.

9 **Galkin, V. I.** Sovremennye rezinotkanevye konvejernye lenty vozmozhnaya alternativa rezinotrosovym lentam dlya gornoj promyshlennosti. [Modern rubber-fabric conveyor belts – a possible alternative to rubber-rope belts for the mining industry] [Text] / V. I. Galkin, E. S. Sazankova // Mining information and analytical bulletin. – M. : OOO «Gornaya kniga» MGGU, 2012. – № 7. – P. 184–192.

10 **Galkin, V. I.** Konstruktivnyye osobennosti rezinotrosovykh lent dlya lentochnykh konveyyerov v gornoy promyshlennosti. [Design Features of Rubber-Rope Belts for Belt Conveyors in the Mining Industry] [Text] /V. I. Galkin, E.S. Sazankova // Mining Information and Analytical Bulletin. – M. : OOO «Gornaya kniga» MGMU, 2014. – № 5. – P. 172–179.

Поступило в редакцию 31.01.26.
Поступило с исправлениями 31.01.26.
Принято в печать 13.02.26.

***С. С. Усупов*[1]**
[1]Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
31.01.26 ж. баспаға түсті.
31.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
13.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТАСПА КОНВЕЙЕРІНІҢ ЖЕТЕКТІ БАРАБАНЫНЫҢ ӨЗГЕРМЕЛІ ҮЙКЕЛУ КОЭФФИЦИЕНТІ КЕЗІНДЕГІ ТАРТУ ҚАБІЛЕТІН АНЫҚТАУ

Бұл бапта таспалы конвейердің жетек барабанының тарту қабілетінің үйкеліс коэффициентінің ауыспалы кезінде әртүрлі факторларға теориялық тәуелділігі берілген. Мақалада ілінісу коэффициентінің негізделген мәнін дұрыс таңдау негізгісі болып табылатынын көрсеткен жетектің тартым қабілетін есептеудің қолданыстағы әдістеріне талдау келтіріледі. Ілінісу коэффициенті эксперименттік зерттеулердің нәтижелеріне негізделген ұсынымдардан алынады. Кестелік нысанда ұсынылған бұл мәндер таспаның тарту күшін жетек барабанымен беруге әсер ететін факторлардың барлық гаммасын, атап айтқанда конвейер жетегінің конструктивтік параметрлерін (барабанның диаметрі, таспаның ені, футеровканың қалыңдығы), таспаның физикалық-механикалық қасиеттері мен барабан футеровкасын, сондай-ақ конвейер жұмысының режимдерін (таспаның қозғалыс жылдамдығы) ескермейді. Зерттеулер көрсеткендей, барабан радиусының немесе таспа енінің ұлғаюымен тартым қабілетінің шамасы сызыққа жақын заң бойынша айтарлықтай қарқынды өседі. Осылайша, осы шамалардың бірі 5 есе ұлғайған кезде тарту қабілеті шамамен 2, 9 есе ұлғаяды. Тарту қабілетіне E_0 таспасының қаттылығының өзгеруі едәуір әсер етпейді. E_0 10 есе ұлғайған кезде тарту қабілеті 2 %-ға азаяды. Таспаның салыстырмалы сырғу бұрышының ұлғаюымен тарту қабілетінің шамасы қарқынды өседі.

Кілтті сөздер: таспалы конвейер, жетекті барабан, тарту қабілеті, үйкеліс коэффициенті, тарту күші, барабанды футерлеу.

***S. S. Ussupov*[1]**
[1]Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty
Received 31.01.26.
Received in revised form 31.01.26.
Accepted for publication 13.02.26.

DETERMINATION OF THE TRACTION CAPACITY OF A BELT CONVEYOR DRIVE DRUM WITH A VARIABLE FRICTION COEFFICIENT

This article presents the theoretical dependence of the traction capacity of the drive drum of the belt conveyor on various factors with a variable coefficient of friction. The article provides an analysis of existing methods for calculating the traction capacity of the drive, which showed that the main thing is the correct choice of a reasonable value for the adhesion coefficient. The adhesion coefficient is taken from the recommendations based on the results of experimental studies. These values, presented in tabular form, do not take into account the full range of factors that affect the transmission of traction force to the belt by the drive drum, in particular the design parameters of the conveyor drive (drum diameter, belt width, lining thickness), the physical and mechanical properties of the belt and drum lining, as well as the modes of operation of the conveyor (belt speed). Studies show that the amount of traction with an increase in the radius of the drum or the width of the tape increases quite intensively according to a law close to linear. So, with an increase of one of these values by 5 times, the traction capacity increases by about 2.9 times. A less significant effect on traction is the change in stiffness of the belt E_0. With an increase in E_0 by 10 times, the traction capacity decreases by 2 %. The amount of pulling power increases rapidly with the relative sliding angle of the belt.

Keywords: belt conveyor, driving drum, traction, friction coefficient, traction force, drum lining.

SRSTI 73.29.61

https://doi.org/10.48081/BGQF1932

U. U. Khusenov[1], Sh. M. Suyunbaev[2], *A. D. Kassymzhanova[3]

[1,2]Tashkent State Transport University, Republic of Uzbekistan, Tashkent;
[3]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7500-4741
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4867-8270
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4623-0202
*e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com

DESIGN OF A BALANCED TRAIN TIMETABLE ON A SINGLE-TRACK RAILWAY SECTION THROUGH RUNNING SPEED OPTIMIZATION

For single-track railway sections, the development of an optimal train timetable is a task of particular importance and constitutes a core component of train flow planning. On single-track railway sections, train conflicts, queueing delays, and overtaking of trains operating at different speeds and in opposite directions lead to an increase in overall delay. In this regard, the problem of developing a balanced timetable by regulating train speeds and optimally determining stations for overtaking operations is of significant relevance. The objective of this study is to design a balanced train timetable with a minimum delay coefficient, taking into account the influence of train running speeds. An optimization model is proposed that considers permissible speed constraints to determine the optimal running speeds of each train along the railway line. The proposed model aims to minimize total delay time while accounting for differences in train arrival times at stations, safety requirements, and speed relationships. The proposed model has practical significance in increasing the line capacity and carrying capacity of railway sections, as well as in improving transportation efficiency compared to existing methods and enhancing operational stability under conditions of uneven traffic flows.

Keywords: railway section, balanced train timetable, optimal train crossing, predefined constraints, minimum delay coefficient.

Introduction

The train timetable is aimed at determining departure and arrival times at each station and requires compliance with a number of conditions, such as passenger platform capacity, headway intervals between trains, and speed constraints. Due to the complexity of these conditions, the practical problem of train timetable design represents a multilevel scientific and technical challenge.

One of the most important tasks in train timetable design for single-track railway sections is to increase line capacity and carrying capacity by minimizing train crossing times. Trains operating at predefined fixed speeds are often forced to wait for one another at stations, which leads to an increase in total delay time and imbalance in the timetable. Such imbalances can be mitigated through speed optimization. Optimal train

crossing on single-track railway sections is one of the key challenges in improving the efficiency of transportation systems and reducing operating costs. In particular, by coordinating train running speeds, it is possible to reduce excessive train waiting times at stations, increase the line capacity and carrying capacity of the single-track section, reduce energy consumption, and achieve timetable balancing [1, p. 85–97].

Worldwide, railway transport is one of the main modes for freight transportation. On many railways, freight operations are primarily carried out using electric and diesel traction; therefore, the economic efficiency of railway transportation is largely determined by savings in electricity and fuel consumption. This is due to the fact that fuel and electricity prices increase annually. Therefore, a hypothesis is put forward that a balanced train timetable contributes to energy savings and prevents excessive waiting times.

Regulatory train timetables for single-track railway sections of JSC «Uzbekiston Temir Yullari» developed for the period 2015–2025 were analyzed. The results of the analysis showed that, during the crossing of freight trains operating in opposite directions, trains have, on average, about 40 percent excess reserve time. This resulting reserve time increases the duration of excessive train dwell times at stopping points and the occupancy of station tracks [2, p. 74–86]. Considering that, at present, 87.8 percent of the railway sections of JSC «Uzbekiston Temir Yullari» are single-track, the coordination of train timetables is of particular importance.

Materials and methods

In practice, two approaches are generally used for train timetable design: manual and computer-based methods. When comparing these two approaches, researchers and engineers prefer computer-based methods. Furthermore, mathematical optimization and simulation methods have been proposed for the development of an optimal train timetable.

In most studies published in the scientific literature, the issues of train timetable design and adjustment are addressed using mathematical optimization methods. These methods were first applied to the train timetable optimization problem in 1971 by I. Amit and D. Goldfarb [3, p. 379–387]. Typically, train operations are considered under three types of conditions: single-track railway lines [4, p. 344–351; 5, p. 147–161; 6, p. 617–629], multi-track railway lines, and railway networks [7, p. 927–952; 8, p. 619–633].

For example, in the context of train timetable design on single-track railways, B. Spiegel et al. [4, p. 344–351] were the first to formulate this problem as a mixed-integer programming model and applied a branch-and-bound algorithm to solve it. In the study by A. Higgins et al. [5, p. 147–161], a two-objective optimization model was presented, aimed at minimizing train delay times and fuel consumption. This model was developed as a decision support system for dispatchers, helping to optimize train timetables on single-track railway lines in real-time. Furthermore, in the study by L. Yang et al. [6, p. 617–629], an expected-value-based programming model was proposed to reduce train delay times and the overall «passenger-hours» indicator. In the proposed model, the number of passengers boarding or alighting from a train at each

station is treated as a variable with no exact value but possessing a certain degree of uncertainty. In turn, U. Brannlund et al. proposed a heuristic optimization method for the train timetable problem, in which a solution scheme based on Lagrangian relaxation was developed [9, p. 358-369].

Furthermore, in the study by K. Goseiri et al. [7, p. 927–952], a train timetable model was developed aimed at minimizing fuel consumption and the overall «passenger-time» indicator. Additionally, L. Yang et al. proposed an efficient mathematical model for determining an optimal train timetable, simultaneously reducing energy consumption and travel time while taking into account global information on the railway network [8, p. 619–633].

In the aforementioned studies on train timetable design, the primary focus has been on mathematical programming methods. In the study by M. Dorfman and J. Medanik [10, p. 81–98;], two main drawbacks of mathematical programming methods were highlighted. First, despite the high computational power of modern supercomputers, it is practically extremely difficult to solve an integer programming problem that includes constraints for every train and track in a railway network within optimal time frames. Second, the solution obtained using this approach, after practical implementation, requires a complete revision of the entire timetable based on the current state of the railway network if even a single train deviates from the established schedule.

In [11, p. 231–236; 12, p. 260–267], the problem of constructing train movement schedules for a single-track railway section bounded by two stations was considered. As a result, for example, in [11, p. 231–236], polynomial-time algorithms were presented for different variants of the train scheduling problem, which differ from each other in their objective functions. In [12, p. 260–267], several polynomial-time algorithms were developed for special cases with different objective functions under various constraints, considering the two existing sets of trains at the stations bounding the section (trains from the first set travel from the first station to the second, while trains from the second set travel in the opposite direction).

In [13, p. 171–185], the capacity of a single-track railway section was studied, and a mixed integer linear programming (MILP) model was developed to minimize the dispatching cycle of train movements for two types of trains (express and local). Based on the developed model, hundreds of randomly generated problem instances with up to 70 stations were considered, and optimal solutions were obtained within a reasonable time using IBM ILOG CPLEX.

Due to the pre-established fixed running speed on a section, timetable-based train crossings may result in an imbalance, manifested as one train waiting for the other for an extended period and experiencing greater total delay on the line. In such cases, allowing a reduction in train speed can significantly reduce waiting times. Furthermore, by lowering the speed, energy consumption and station track occupancy time can be saved [1, p. 85–97]. Increasing the speed of opposing trains reduces waiting time at stations but leads to higher energy consumption.

At present, in practice, such imbalances arise due to the interaction of non-optimal train speeds. Therefore, in this study, a model for developing a balanced train timetable

with a minimum delay coefficient is proposed through the optimization of train running speeds. The implementation of this model in timetable design for a single-track line represents a novel approach.

On single-track railway sections, train crossings, taking into account the constraints on running lines, are carried out at stations. At stations, train crossings are performed based on the operations of «meeting and pass» and «meeting and overtaking».

The «meeting and pass» operation is applied to prevent head-on collisions of trains; that is, during the safe crossing of two trains moving towards each other, the train that arrives first at the station is routed to a siding and waits until the other train passes. The «meeting and overtaking» operation is aimed at enabling the overtaking of trains moving in the same direction but at different speeds (for example, a slower train ahead and a faster train behind). This operation is implemented to prevent trains from approaching each other too closely and to avoid potential collisions.

In train timetable design, the selection of optimal running speeds is crucial for minimizing waiting times during station crossings. By determining optimal speeds, it is possible to reduce train waiting times at stations; however, completely eliminating excess delays is not feasible. Examples of constructing a balanced train timetable through the selection of optimal speeds are shown in Figure 1.

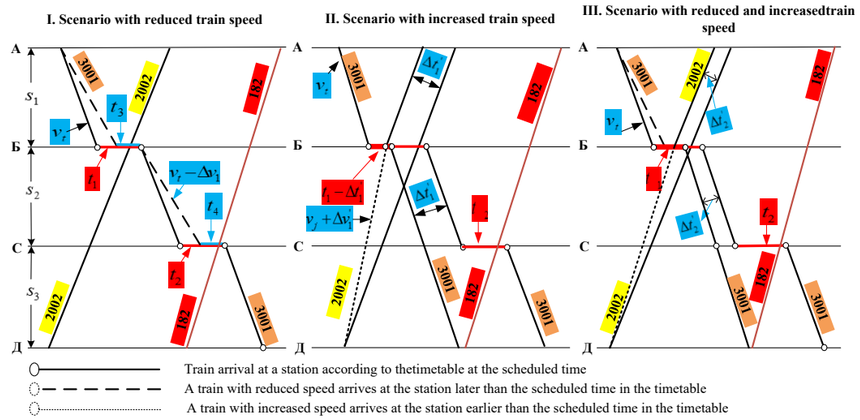


Figure 1 – Variants of train speed optimization

As shown in Figure 1, train 3001 is scheduled to operate on the odd-numbered track. It will encounter trains 2002 and 182 at stations «B» and «C» respectively. Due to pre-established running speeds, train 3001 will be forced to wait for crossing operations at these two stations, resulting in additional delays (t_1 and t_2).

In practice, these delays can be eliminated by slightly reducing the speed of train 3001. As a result, by changing the trajectory of train 3001 to a dashed line (Scenario I in Figure 1), the waiting times in the revised timetable are reduced (t_3 and t_4), and fuel and energy consumption is also decreased [1, p. 85–97]. Without affecting the train's arrival time at the destination, the total waiting time can be reduced by $(t_1 + t_2) - (t_3 +$

t_4) minutes. Furthermore, increasing the speed of train 2002 (Scenario II in Figure 3) allows the reduction of waiting time t_1 and automatically eliminates t_2. Consequently, the arrival time of train 2002 at its destination is reduced by $\Delta t_1^{'}$ minutes, and that of train 3001 by $\Delta t_1^{'} + t_2$ minutes. Additionally, by simultaneously reducing the speed of train 3001 and increasing the speed of train 2002 (Scenario III in Figure 3), waiting time t_1 can be reduced and t_2 automatically eliminated. As a result, the arrival time of train 2002 at its destination decreases by $\Delta t_2^{'}$ minutes, and that of train 3001 by $\Delta t_1^{'} + t_2$ minutes. Thus, in Scenarios II and III, the reduction in total waiting time is less than the reduction in arrival time at the destination. In conclusion, there is no direct correlation between total arrival time and total waiting time. However, from a psychological perspective, passengers prefer slower train operation without waiting times onboard [14, p. 894-909].

Results and discussion

The aim of this study is to develop a timetable for single-track railway sections with train speed optimization for trains operating at different speeds, in order to prevent collisions and minimize delays. Since the running speed of each train is optimized along its route, the main variables are defined as follows:

v_i average running speed of the i-th train along the route, km/h;

$V = (v_i)_1^N$ vector of speeds for each train, including all segment v_i speeds;

t_i^{omn} departure time of the i-th train from the station;

t_i^{np} arrival time of the i-th train at the station;

$x_i(t)$ train position coordinate over time;

h_{ij} safety interval between the i-th and j-th trains, min;

d_i route length of the i-th train, km.

To determine the optimal running speeds of trains, it is proposed to extend the fixed speed constraint in the timetable (v_i^{zp}) and define it as a range v_i^{zp}. This range represents the domain of optimal speeds and is expressed as follows:

$$v_i^{zp} - \Delta v \le v_i \le v_i^{zp} + \Delta v \quad (1)$$

where Δv – maximum allowable speed variation, km/h.

Mathematical model for minimizing total train delays is formulated as follows:

$$\text{Min } T = \sum_{i=1}^{n}(t_i^{np} - t_i^{omn}) \text{ or Min } T = \frac{d_i}{v_i}, \text{ minutes} \quad (2)$$

The ratio of total delay time to total free-running time is referred to as the delay coefficient. It is used to assess the extent to which excess delays are reduced in actual operation. The lower the delay coefficient, the more balanced the train timetable. If the delay coefficient equals zero, the train timetable is maximally balanced. Therefore, when designing a train timetable to improve the quality of railway transportation, it is necessary to minimize the delay coefficient by selecting optimal running speeds.

The objective of function (2) can also be achieved by minimizing the delay coefficient, defined by the formula F(V) [14, p. 894–909]:

$$F(V) = \frac{\sum_{i=1}^{N}(T_i^{zp}(v_i, V) - T_i^{c6}(v_i, V))}{\sum_{i=1}^{N} T_i^{c6}(v_i, V)} \quad (3)$$

where $F(V^{c6})$ – train delay coefficient in a balanced timetable obtained with the speed vector V;

$T_i^{zp}(v_i, V)$ actual arrival time of the i-th train completing its route according to the timetable constructed with the speed vector V;

$T_i^{c6}(v_i, V)$ free running time of the i-th train to the destination without any obstacles (scheduled net running time);

N – number of trains in the considered timetable.

Mathematical model of the problem of finding optimal speeds that minimize the delay coefficient can be expressed as follows [14, p. 894–909]:

$$\text{Min} \begin{cases} \min F(V) \\ v_i^{zp} - \Delta v \le v_i \le v_i^{zp} + \Delta v \end{cases} \quad (4)$$

In this model, the objective function represents the ratio of delays in the optimal train timetable defined by the speed vector (V), while the constraint specifies the allowable speed range during planning.

The main result expected from the model is to find such optimal speeds $V=\{v_1, v_2, v_3,\ldots, v_N\}$ for different trains, at which the delay coefficient F(V) for the newly constructed timetable is minimized; that is, F(V) should be minimized within the allowable speed range (v_i). Using this model, train speeds can be rationally assigned, excess waiting can be reduced, a balanced train timetable can be constructed, the delay coefficient can be minimized, and energy efficiency can be improved (reducing speed contributes to energy savings).

To more precisely illustrate the objective function F(V), we calculate the delay coefficient corresponding to the train timetable for the adapted speed scenarios shown in Figure 1.

Suppose the pre-established speed vector for the timetable is $V^{тр}=\{42, 42, 63\}$ km/h, and the section lengths are S_1, S_2, and S_3, with $S_1=S_2=S_3=21$ km.

Train 3001 departs from station «A» at 8:10 and arrives at station «B» at 8:40. Train 3002, departing from station «D» at 8:00, arrives at station «B» at 9:00. As a result, train 3001 must wait at station «B» for 20 minutes until the «B-C» section is cleared. Train 3001 then departs from station «B» at 9:02 after the «B-C» section becomes available and arrives at station «C» at 9:32. Passenger train 182, departing from station «D» at 9:25, arrives at station «C» at 9:45. Consequently, train 3001 must wait at station «C» for 13 minutes until the «D-C» section is cleared. Thus, train 3001 experiences a total waiting time of 33 minutes from station «A» to station «D». As a result, the delay coefficient F(V) for train 3001 takes the following form.

$$F(V^{гр}) = \frac{\sum_{i=1}^{3}(T_i^{гр}(v_i^{гр}, V^{гр}) - T_i^{св}(v_i^{гр}, V^{гр}))}{\sum_{i=1}^{3} T_i^{св}(v_i^{гр}, V^{гр})} = \frac{t_1 + t_2}{\sum_{i=1}^{3}(\sum_{j=1}^{3} \frac{S_j}{v_i^{гр}}} = \frac{33}{(\frac{21}{42} + \frac{21}{42} + \frac{21}{42}) \cdot 60} = 0{,}367$$

The delay coefficient for the adapted train speed scenarios is determined as follows.

I. If the speed of train 3001 is reduced to 35 km/h, the adapted speed vector becomes $V^{сб}$={35, 42, 63} km/h. Based on the calculations, the delays are as follows $t_3^I = 14$ min, $t_4^I = 7$ min. Then, the delay coefficient F(V) for train 3001 takes the following form:

$$F(V_I^{сб}) = \frac{\sum_{i=1}^{3}(T_i^{сб}(v_i^{сб}, V^{сб}) - T_i^{св}(v_i^{сб}, V^{сб}))}{\sum_{i=1}^{3} T_i^{св}(v_i^{сб}, V^{сб})} = \frac{t_3 + t_4}{\sum_{i=1}^{3}(\sum_{j=1}^{3} \frac{S_j}{v_i^{сб}}} = \frac{14 + 7}{(\frac{21}{35} + \frac{21}{35} + \frac{21}{42}) \cdot 60} = 0{,}206$$

II. If the speed of train 3001 is reduced to 5 km/h and the speed of train 2002 is increased to 5 km/h, the adapted speed vector becomes $V^{сб}$={42, 49, 63} km/h. Based on the calculated delaysare as follows $t_3^{II} = 12$ min, $t_4^{II} = 0$ min. Then, the delay coefficient F(V) for train 3001 takes the following form:

$$F(V_{II}^{сб}) = \frac{\sum_{i=1}^{3}(T_i^{сб}(v_i^{сб}, V^{сб}) - T_i^{св}(v_i^{сб}, V^{сб}))}{\sum_{i=1}^{3} T_i^{св}(v_i^{сб}, V^{сб})} = \frac{t_3 + t_4}{\sum_{i=1}^{3}(\sum_{j=1}^{3} \frac{S_j}{v_i^{сб}}} = \frac{12 + 0}{(\frac{21}{42} + \frac{21}{42} + \frac{21}{42}) \cdot 60} = 0{,}133$$

III. If the speed of train 2002 is increased to 7 km/h, the adapted speed vector becomes $V^{сб}$={37, 47, 63} km/h. Based on the calculations, the delays are as follows $t_3^{III} = 10$ min, $t_4^{III} = 0$ min. Then, the delay coefficient F(V) for train 3001 takes the following form:

$$F(V_{III}^{сб}) = \frac{\sum_{i=1}^{3}(T_i^{сб}(v_i^{сб}, V^{сб}) - T_i^{св}(v_i^{сб}, V^{сб}))}{\sum_{i=1}^{3} T_i^{св}(v_i^{сб}, V^{сб})} = \frac{t_3 + t_4}{\sum_{i=1}^{3}(\sum_{j=1}^{3} \frac{S_j}{v_i^{сб}}} = \frac{10 + 0}{(\frac{21}{37} + \frac{21}{42} + \frac{21}{42}) \cdot 60} = 0{,}11$$

According to the definition of a balanced train timetable, in all three scenarios the condition $F(V^{сб}) < F(V^{гр})$ for the delay coefficient is satisfied. That is, the revised train timetable is more balanced compared to the original timetable.

The developed model can also be used to reduce waiting time during overtaking of trains moving consecutively in the same direction. The state of trains 181 (passenger) and 3001 (freight), moving in the same direction at a discrete moment in time at a specific position, is shown in Figure 2a. Due to the difference in speeds between these two trains, there is a risk of the passenger train catching up with the freight train on the section, as illustrated in Figure 2b. The procedure for preventing such an overtake based on comparing train speeds is detailed in studies [10, p. 81–98; 14, p. 894–909]. In study [10, p. 81–98], a Train Acceleration Schedule (TAS) was developed. Using TAS, it is determined at which station an overtaking of two trains moving in the same direction is possible, depending on their speeds. If the speed of passenger train 181 significantly exceeds the speed of train 3001 $v_{3001} < v_{181}$, the overtaking event is likely to occur at station «B» (Figure 2c). For this specific case, study [14, p. 894–909] proposed an improved overtaking rule, ITAS. According to the improved rule, train 3001 departs from station «B» only if $t_1 < t_2$ and stops at station «C», where the overtaking event takes place (Figure 2d). As a result, there is an opportunity to further reduce the waiting time of the train at the station.

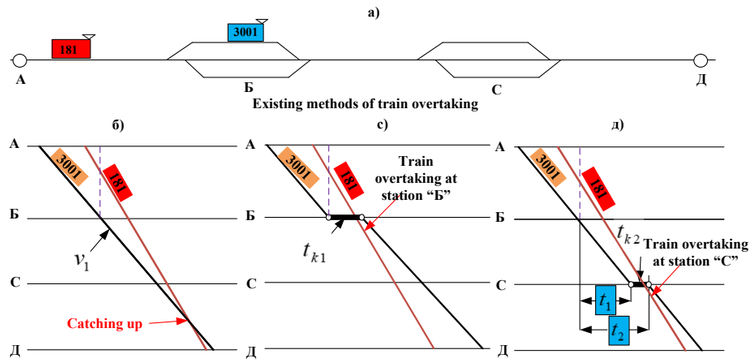


Figure 2 – Existing methods for optimal overtaking of trains with different speeds:
a) Position of trains on the section;
b) Diagram showing the passenger train potentially catching up with the freight train on the «D-C» section;
c) Case of the passenger train overtaking t he freight train at station «B» [10, p. 81–98];
d) Case of the passenger train overtaking the freight train at station «C» [14, p. 894–909].

In this study, a method is proposed to reduce the total waiting time during overtaking of consecutively moving trains (Figure 3). This method is an improved version of the approach presented in studies [10, p. 81–98; 14, p. 894–909]. In particular, special attention is paid to the probabilities of trains catching up, shown in Figures 2b and 3a, since, according to studies [10, p. 81–98; 14, p. 894–909], the overtaking method was developed specifically for these overtaking scenarios.

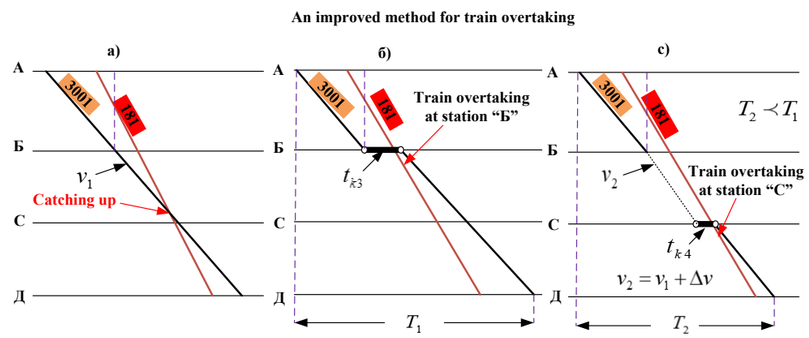


Figure 3 – Improved method for optimal overtaking of trains with different speeds:
a) Diagram showing the passenger train potentially catching up with the freight train on the «B-C» section (proposed);
b) Case of the passenger train overtaking the freight train at station «B» [10, p. 81–98; 14, p. 894–909];
c) Case of the passenger train overtaking the freight train at station «C» (improved method).

Figure 3 compares the train overtaking methods presented in studies [10, p. 81–98; 14, p. 894–909] with the proposed improved method. As shown in Figure 3a, passenger train 181, moving in the same direction, catches up with freight train 3001 on the next section, creating a risk of overtaking. In this case, according to the existing methods presented in study [14, p. 894–909], the overtaking must be carried out at station «B» (Figure 3b). According to the proposed improved method, the possibility of overtaking at station «C» is achieved by increasing the speed of train 3001 according to formula (1) (Figure 3c). As a result, the waiting time of train 3001 is reduced compared to the method presented in study [11, p. 231–236] ($T_{k3} \prec T_{k4}$).

The proposed improved overtaking method outperforms the existing methods presented in studies [10, p. 81–98; 14, p. 894–909], reduces the train catching-up time, and provides the possibility of optimally selecting the overtaking station. In particular, by adjusting the speed, it is possible to shift the overtaking point to the next station, which allows for a reduction in track occupancy time at the station.

Furthermore, the developed mathematical model not only enables the optimization of overtaking processes between freight and passenger trains but also allows the construction of a balanced train timetable on single-track railway sections. This enhances throughput and transportation efficiency, ensures energy savings, makes the timetable more stable and adaptive under real-world conditions, and serves as a practically effective approach for single-track railway sections.

Conclusions

Based on this study, aimed at constructing a balanced train timetable on single-track railway sections with the minimization of the overall delay coefficient, the following conclusions can be drawn:

An improved method has been proposed aimed at reducing train waiting times at stations that occur during train crossings, based on the optimization of existing pre-established fixed train speeds. As a result, it becomes possible to reduce excessive waiting times at stations during crossings on single-track railway sections and to prevent imbalances in the train timetable.

A mathematical model has been developed to minimize the total delay time and the delay coefficient by adjusting train speeds (either reducing or increasing) while considering train departure and arrival times at stations, safety intervals, section lengths, and speed limits. Using these mathematical models, a sample train speed optimization problem was solved. As a result, it has been scientifically demonstrated that the delay coefficient F(V) can be reduced from 0.367 to 0.11 depending on the range of speed adjustments, and the delay time can be reduced by up to 23 minutes.

REFERENCES

1 **Khusenov, U. U., Suyunbaev, Sh. M.** Energoeffektivnaya metodika skreshcheniya poezdov na odnoputnyh zheleznodorozhnyh uchastkah [An energy-efficient method for train crossing on single-track railway sections] // Scientific Journal of Transport Vehicles and Roads. – 2025. – № 1. – P. 85–97.

2 **Khusenov, U. U.** Energoeffektivnyj metod organizacii dvizheniya gruzovyh poezdov razlichnoj massy [An energy-efficient method for organizing the operation of freight trains with different weights] // Scientific Journal of Transport Vehicles and Roads. – 2025. – № 2. – P. 74–86.

3 **Amit, I., Goldfarb, D.** The timetable problem for railways // Developments in Operations Research. – 1971. – № 2(1). – P. 379–387.

4 **Szpigel, B. et al.** Optimal train scheduling on a single line railway. – 1973. – № 7. – P. 344–351.

5 **Higgins, A., Kozan, E., Ferreira, L.** Optimal scheduling of trains on a single line track // Transportation Research Part B: Methodological. – 1996. – Vol. 30. – № 2. – P. 147–161. – https://doi.org/10.1016/0191-2615(95)00022-4

6 **Yang, L., Li, K., Gao, Z.** Train timetable problem on a single-line railway with fuzzy passenger demand // IEEE Transactions on fuzzy systems. – 2009. – № 17(3). – P. 617–629. – https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2008.924198

7 **Ghoseiri, K., Szidarovszky, F., Asgharpour, M.** A multi-objective train scheduling model and solution // Transportation research part B: Methodological. – 2004. – № 38(10). – P. 927–952. – https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.02.004

8 **Yang, L. et al.** Optimizing trains movement on a railway network // Omega. – 2012. – № 40(5). – P. 619–633. – https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.12.001

9 **Brännlund, U. et al.** Railway timetabling using Lagrangian relaxation // Transportation science. – 1998. – № 32(4). – P. 358–369. – https://doi.org/10.1287/trsc.32.4.358

10 **Dorfman, M., Medanic, J.** Scheduling trains on a railway network using a discrete event model of railway traffic // Transportation Research Part B : Methodological. – 2004. – № 38(1). – P. 81–98. – https://doi.org/10.1016/S0191-2615(03)00006-7

11 **Zinder, Y., Lazarev, A. A., Musatova, E. G., Tarasov, I. A., Khusnullin, N. F.** Two-Station Single Track Scheduling Problem, The work was supported by grants: RFBR 13-01-12108, 15-07-07489, 15-07-03141, DAAD A/14/00328., IFAC-PapersOnLine, Volume 49. – Issue 12. – 2016. – P. 231–236. – ISSN 2405-8963. – https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.604.

12 **Gafarov, E. R., Dolgui, A., Lazarev, A. A.** Two-station single-track railway scheduling problem with trains of equal speed, Computers & Industrial Engineering, Volume 85. – 2015. – P. 260–267. – ISSN 0360-8352. – https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.014.

13 **Heydar, M., Petering, M. E. H., Bergmann, D. R.** Mixed integer programming for minimizing the period of a cyclic railway timetable for a single track with two train types, Computers & Industrial Engineering, Volume 66. – Issue 1. – 2013. – P. 171–185. – ISSN 0360-8352. – https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.06.003.

14 **Xu, X., Li K., Yang, L., Ye, J.** Balanced train timetabling on a single-line railway with optimized velocity // Applied Mathematical Modelling. – 2014. – № 38(3). – P. 894–909. – https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.07.023

Received 25.12.25.
Received in revised form 27.01.26.
Accepted for publication 03.02.26.

У. У. Хусенов[1], Ш. М. Суюнбаев[2], *А. Д. Қасымжанова[3]
[1,2]Ташкент мемлекеттік көлік университеті,
Өзбекстан Республикасы, Ташкент қ.;
[3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
25.12.25 ж. баспаға түсті.
27.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖҮРІС ЖЫЛДАМДЫҒЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ АРҚЫЛЫ ТЕМІРЖОЛДЫҢ БІР ЖОЛДЫ УЧАСКЕСІНДЕ ПОЙЫЗДАРДЫҢ ҚОЗҒАЛЫСЫНЫҢ ТЕҢГЕРІМДІ КЕСТЕСІН ҚҰРУ

Бір жолды теміржол учаскелері үшін пойыздардың қозғалысының оңтайлы кестесін құру ерекше маңызды міндет болып табылады және пойыз ағындарын жоспарлаудың негізгі компонентін білдіреді. Бір жолды теміржол учаскелерінде соқтығысу, кезекті күту және әртүрлі жылдамдықпен және әртүрлі бағытта жүретін пойыздарды басып озу жалпы кідірістің артуына әкеледі. Осыған байланысты пойыздардың жылдамдығын реттеу және басып озуды орындау үшін станцияларды оңтайлы анықтау арқылы теңдестірілген

қозғалыс кестесін әзірлеу міндеті өзекті болып табылады. Мақалада пойыздардың жүру жылдамдығының әсерін ескере отырып, минималды кідіріс коэффициентімен пойыздардың қозғалысының теңдестірілген кестесін құру мақсаты қойылған болатын. Теміржол желісіндегі әрбір пойыздың оңтайлы қозғалыс жылдамдығын анықтау үшін рұқсат етілген жылдамдық шектеулерін ескеретін оңтайландыру моделі ұсынылған. Бұл модель пойыздардың станцияға келу уақытындағы айырмашылықтарды, қауіпсіздік талаптарын және жылдамдық арақатынасын ескере отырып, жалпы кідіріс уақытын азайтуға бағытталған. Ұсынылған модель темір жол учаскелерінің өткізу қабілеті мен тасымалдау қуатын арттыруда, сондай-ақ ағымдағы әдістермен салыстырғанда тасымалдау тиімділігін жақсартуда және қозғалыс ағынының біркелкі еместігі жағдайында жұмыс тұрақтылығын қамтамасыз етуде практикалық мәнге ие.

Кілтті сөздер: теміржол учаскесі, теңдестірілген қозғалысының кестесі, поездардың оңтайлы қиылысуы, алдын ала белгіленген шектеулер, кідірістің минималды коэффициенті.

У. У. Хусенов[1], Ш. М. Суюнбаев[2], *А. Д. Қасымжанова[3]
[1,2]Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент;
[3]Карагандниский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда
Поступило в редакцию 25.12.25.
Поступило с исправлениями 27.01.26.
Принято в печать 03.02.26.

СОСТАВЛЕНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ОДНОПУТНОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ ХОДОВОЙ СКОРОСТИ

Для однопутных железнодорожных участков составление оптимального графика движения поездов является задачей особого значения и представляет собой основную составляющую планирования поездопотоков. На однопутных железнодорожных участках столкновения, ожидание очереди и обгоны поездов, движущихся с разной скоростью и в разных направлениях, приводят к увеличению общей задержки. В связи с этим актуальной является задача разработки сбалансированного графика движения путём регулирования скоростей поездов и оптимального определения станций для выполнения обгонов. В статье поставлена цель составить сбалансированный график движения поездов с минимальным коэффициентом задержки с учётом влияния скорости хода поездов. Предложена модель оптимизации, учитывающая допустимые ограничения скорости для определения оптимальных скоростей движения каждого поезда на железнодорожной линии. Данная модель направлена на минимизацию общего времени задержки с учётом различий во времени прибытия поездов на станции, требований безопасности и соотношения скоростей. Предложенная модель имеет практическое значение

в повышении пропускной и провозной способности железнодорожных участков, а также в улучшении эффективности перевозок по сравнению с действующими методами, и устойчивости работы в условиях неравномерных потоков движения.

Ключевые слова: железнодорожный участок, сбалансированный график движения, оптимальное скрещивание поездов, предварительно установленные ограничения, минимальный коэффициент задержки.

МРНТИ 73.29.17

https://doi.org/10.48081/BGQF1933

***Ж. Е. Шукаманов[1], Г. А. Сулейменова[2]**

[1]Таразский университет имени М. Х. Дулати, Республика Казахстан, г. Тараз;
[2]ALT университет имени М. Тынышбаева, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3017-7133
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7099-8441
*e-mail: shukamanov@bk.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗАДЕРЖЕК НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО УЧАСТКА

В статье рассмотрено влияние стохастических задержек передачи разрешения на пропускную способность железнодорожного участка. В качестве объекта исследования выбран однопутный участок с полуавтоматической блокировкой, для которого характерна высокая вариативность временных интервалов, обусловленная участием дежурного по станции и особенностями взаимодействия технических средств. В существующую формулу расчёта пропускной способности введён дополнительный параметр, учитывающий стохастическую составляющую задержек передачи разрешений. Для его оценки использованы нормальное, экспоненциальное и эмпирическое распределения, сформированные на основе выборки наблюдений. Выполнен сравнительный анализ влияния различных подходов к описанию задержек на фактическую пропускную способность участка. Показано, что учёт стохастических задержек приводит к снижению расчётной пропускной способности по сравнению с детерминированной оценкой и позволяет более реалистично учитывать эксплуатационные условия движения поездов. Отдельное внимание уделено анализу хвостов распределений задержек, которые оказывают наибольшее влияние на устойчивость графика движения и фактические эксплуатационные показатели. Предложенный подход обеспечивает воспроизводимость расчётов и может быть адаптирован для различных типов железнодорожных линий и систем интервального регулирования движения поездов. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения стохастического подхода при оценке пропускной способности железнодорожных линий и могут быть использованы при анализе эффективности систем интервального регулирования движения поездов.

Ключевые слова: железная дорога, интервальное регулирование, полуавтоматическая блокировка, пропускная способность, стохастические задержки.

Введение

Пропускная способность железнодорожного участка является ключевым показателем эффективности транспортной инфраструктуры и напрямую влияет на надежность, скорость и конкурентоспособность перевозочного процесса. В условиях роста грузопотоков и увеличения требований к стабильности графиков именно пропускная способность определяет устойчивость логистических цепочек, возможность наращивания объемов перевозок и качество обслуживания [1, 2]. Для Казахстана эта задача особенно актуальна ввиду растущей роли страны в международных транспортных коридорах, включая Транскаспийский маршрут.

Одним из ключевых факторов, формирующих пропускную способность, являются системы интервального регулирования движения поездов. Тип применяемой системы определяет минимально достижимые интервалы между поездами, динамику освобождения блок-участков, порядок выдачи разрешений и уровень автоматизации управления. Различия между классическими и цифровыми системами приводят к различной фактической производительности, что делает корректную классификацию и оценку систем интервального регулирования движения поездов важным элементом расчетов [3, с. 22-27].

Классические методы оценки пропускной способности, как правило, опираются на детерминированные предпосылки – нормативные интервалы, фиксированные времена занятия блок-участков и усреднённые стоянки поездов. Такой подход упрощает расчёты, однако приводит к устойчивому расхождению между плановыми и фактическими показателями в процессе эксплуатации. В реальных условиях движение поездов сопровождается множеством случайных факторов, включая вариативность разгона и торможения, колебания времени стоянок, задержки в системах сигнализации и радиосвязи, а также особенности процесса выдачи и подтверждения разрешений. Совокупное влияние задержек срабатывания устройств СЦБ, латентности каналов связи и человеческого фактора формирует стохастическую составляющую межпоездного интервала, вследствие чего участки, схожие по конфигурации и нагрузке, могут демонстрировать различную фактическую пропускную способность [4, 5].

Наиболее значимые стохастические отклонения наблюдаются в системах полуавтоматической блокировки, где ключевые операции зависят от действий дежурного по станции. Процессы передачи, подтверждения и регистрации разрешений включают человеческий фактор, который вносит вариативность и приводит к появлению неустранимых случайных задержек. В отличие от автоматизированных и радиоканальных систем, полуавтоматическая блокировка демонстрирует выраженную неоднородность интервалов, что особенно важно учитывать при моделировании и расчетах пропускной способности [5, с. 1-4].

Цель данной работы заключается в разработке воспроизводимой методики количественной оценки пропускной способности железнодорожного участка с учетом стохастических задержек, возникающих в системах сигнализации, связи и эксплуатации движения, а также в демонстрации влияния таких задержек на итоговые расчеты. Методика ориентирована на практическое применение при

планировании графиков движения, анализе эффективности систем интервального регулирования движения поездов и обосновании направлений модернизации инфраструктуры.

Материалы и методы

Согласно [6, с. 4-5] методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования пропускная способность однопутных железнодорожных участков, не оборудованных автоблокировкой, рассчитывается в парах поездов в сутки по формуле:

$$N=\frac{(1440\text{-}t_{тех})\cdot a_{н}}{T_{пер}}, \quad (1)$$

где 1440 – количество минут в сутки; $t_{тех}$ – исключение для движения поездов из суточной продолжительности времени (24 часа), необходимого для обслуживания технических устройств и планового ремонта устройств; $a_{н}$ – нормативный коэффициент надежности; $T_{пер}$ – период графика движения поездов на ограничивающем перегоне, минуты.

При расчете пропускной способности железнодорожного участка величина $t_{тех}$ применяется для:

– однопутных железнодорожных линий – 75 минут;

– железнодорожных линий с двухпутными вставками – 90 минут;

– двухпутных железнодорожных линий – 150 минут.

Кроме того, нормативные коэффициенты надежности $a_{н}$ при различных типах железнодорожных линии представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Нормативные коэффициенты надежности

Тип линии	Электрификация	
Однопутные	Электрифицированные	0,93
	Неэлектрифицированные	0,92
Двухпутные	Электрифицированные	0,96
	Неэлектрифицированные	0,95
Однопутные с двухпутными ставками	Электрифицированные	0,95
	Неэлектрифицированные	0,94

Период графика движения поездов на ограничивающем перегоне, включает суммарное время движения пары поездов по ограничивающему перегону с учетом их разгонов и замедлений, предусмотренных схемой пропуска, также станционные интервалы времени, предусмотренные схемой пропуска поездов, по примыкающим к ограничивающему перегону раздельным пунктам, а и б соответственно.

$$T_{пер}=\sum t_x+\tau_a+\tau_b\,, \quad (2)$$

Таким образом, пропускная способность однопутных железнодорожных участков, не оборудованных автоблокировкой, рассчитывается в парах поездов в сутки по формуле:

$$N=\frac{(1440-t_{тех})\cdot a_{н}}{T_{пер}}=\frac{(1440-t_{тех})\cdot a_{н}}{(\sum t_x+\tau_a+\tau_b)}, \quad (3)$$

Необходимо отметить, что коэффициент надежности определяется как доля суточного времени, доступного для пропуска поездов после исключения простоев, связанных с отказами технических устройств и их плановым обслуживанием. Таким образом, коэффициент надежности определяет насколько технические средства позволяют использовать суточный бюджет времени без отказов. На этом основании можно утверждать, что коэффициент надежности не учитывает организационные задержки и факторы, связанные с человеческим участием, что подчеркивает актуальность проведенного исследования.

В системе полуавтоматической блокировки влияние человеческого фактора является наиболее существенным, поскольку выполнение ключевых операций – передача и подтверждение разрешения на занятие перегона, оформление переговоров, выполнение регламентных действий и контроль за соблюдением интервалов – полностью зависит от действий дежурных по станции. Время реакции дежурного, его опыт, уровень загруженности, внимательность и качество коммуникации напрямую формируют величину задержек и вариативность межпоездных интервалов. В отличие от автоблокировки и системы интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала, где процессы управления во многом стандартизированы и автоматизированы, полуавтоматическая блокировка остается уязвимой к человеческим ошибкам, случайным задержкам и субъективным отклонениям, что делает влияние человеческого фактора одним из определяющих элементов при оценке ее пропускной способности [7, 8].

Для количественной оценки влияния человеческого фактора в системе полуавтоматической блокировки выделены основные типы задержек, их причины и средний вклад в увеличение межпоездного интервала. Сводные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Типы задержек и их влияние в системе полуавтоматической блокировки

Тип задержки	Причина	Средняя добавочная задержка	Степень влияния
Реакция дежурного	Время ответа	10–40 секунд	Высокая
Переговоры между станциями	Повтор, уточнение	5–20 секунд	Средняя
Параллельные операции	Загруженность ДСП	10–60 секунд	Высокая
Документальные операции	Оформление разрешений	10–30 секунд	Средняя
Качества связи	Плохая слышимость	5–15 секунд	Средняя
Повтор действий	Человеческий фактор	5–10 секунд	Средняя

Поскольку действующая формула не учитывает стохастические задержки, обусловленные человеческим фактором в полуавтоматической блокировке, впервые в знаменатель введен дополнительный параметр τ_d,, отражающий математическое ожидание таких задержек. Это позволяет получить более реалистичную оценку фактической пропускной способности участка.

$$N = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot a_{\text{н}}}{T_{\text{пер}}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot a_{\text{н}}}{(\sum t_x + \tau_a + \tau_b) + \boldsymbol{\tau_d}}, \quad (4)$$

Поскольку задержки в системе полуавтоматической блокировки имеют стохастическую природу, новый параметр τ_d, определяется не как фиксированная величина, а как математическое ожидание случайной величины D, описываемой соответствующим распределением (нормальным, экспоненциальным или эмпирическим). Использование распределений позволяет корректно отразить вариативность задержек, обусловленных человеческим фактором, и получить реалистичную оценку фактической пропускной способности участка.

$$\tau_d = E[D], \quad (5)$$

$$\text{D}\sim\text{Normal}(\mu,\sigma), \text{Exponential}(\lambda), \text{Empirical}(\text{data}), \quad (6)$$

$$N = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot a_{\text{н}}}{T_{\text{пер}}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot a_{\text{н}}}{(\sum t_x + \tau_a + \tau_b) + E[D]}, \quad (7)$$

Для корректного учета стохастической природы задержек в системе полуавтоматической блокировки при последующих проверках или моделировании рекомендуется использовать различные типы распределений, поскольку они отражают разные эксплуатационные режимы. Нормальное распределение позволяет описывать небольшие отклонения вокруг среднего значения, характерные для стабильной работы дежурных. Экспоненциальное распределение подходит для ситуаций с высокой неопределенностью, когда редкие, но значительные задержки оказывают заметное влияние на межпоездной интервал. Эмпирическое распределение, основанное на фактических наблюдениях, дает наиболее точное представление реальных задержек и может применяться при наличии соответствующих данных. Такой подход обеспечивает возможность дальнейшими исследованиями объективно воспроизвести поведение задержек и проверить полученные результаты.

Нормальное распределение имеет два параметра [9, стр. 49]:

μ – среднее значение задержки;

σ – среднеквадратическое отклонение (разброс задержек).

Таким образом, нормальное распределение имеет следующее обозначение:

$$X\sim N(\mu, \sigma^2) \quad (9)$$

Нормальное распределение можно получить двумя способами: путем использования реальных измерений, либо по заданным типовым диапазонам. В первом случае, расчет среднего значения и среднеквадратичного отклонения рассчитывается следующим образом:

$$\mu = \frac{1}{n}\sum D_i \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum (D_i - \mu)^2} \quad (10)$$

По заданным типовым диапазонам на основе эксплуатационных наблюдений можно указать ориентировочные значения, в таком случае для расчета берется их среднее значение [9, стр. 50].

Для получения экспоненциального распределения интенсивность (частота) событий – λ и обозначается как:

$$D\sim Exp\left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (11)$$

Эмпирическое распределение рассчитывается только на основе фактических значение и обозначается следующем образом [10, с. 54]:

$$D\sim Emp(d_1, d_2, \ldots\ d_n) \quad (12)$$

Результаты и обсуждения

Для исследования задержек дежурного была использована выборка из 1000 измерений. Среднее арифметическое значение задержки составило 3,76 с, что при базовом анализе может интерпретироваться как допустимый показатель. Однако проверка данных на соответствие нормальному распределению выявила значительные отклонения. На представленных графиках плотности и QQ-plot исходных данных в секундах видна резкая правосторонняя асимметрия, где редкие выбросы значительно удалены от центра распределения (Рисунок 1). 95-й перцентиль зафиксирован на отметке 7,55 с, что почти в два раза превышает среднее значение.

Тест Шапиро-Уилка подтвердил, что исходные значения не являются нормальными, в то время как их логарифмическая трансформация позволила приблизить распределение к классическому «колоколу» Гаусса. Это доказывает, что задержки дежурного подчиняются логнормальному закону, и планирование ресурсов должно строиться на анализе перцентилей в секундах, а не на средних величинах.

Однако анализ только нормального распределения не позволяет в полной мере учесть редкие, но значительные по величине задержки, характерные для

процессов передачи разрешений и действий оператора при полуавтоматической и координатной системах интервального регулирования.

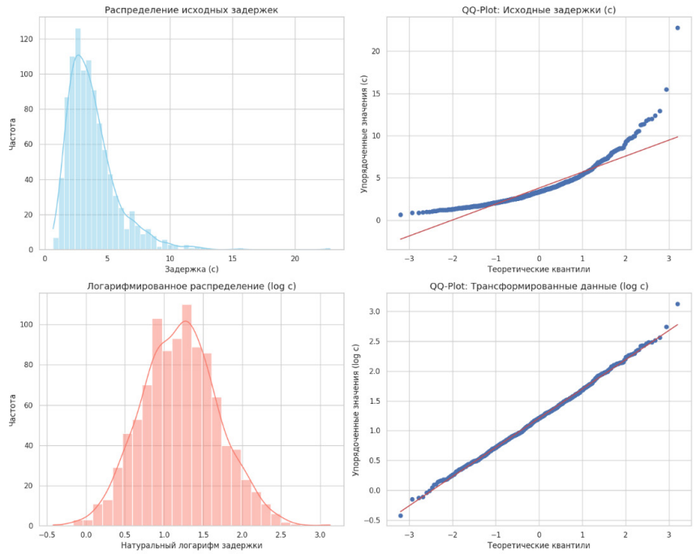


Рисунок 1 – Нормальное распределение стохастических задержек с использованием логарифмического преобразования

В связи с этим на следующем этапе исследования выполнен переход к экспоненциальному закону распределения, который более адекватно описывает случайные интервалы ожидания и процессы, обладающие свойством отсутствия памяти, характерным для задержек, обусловленных отказами, повторными запросами и ожиданием реакции системы или персонала.

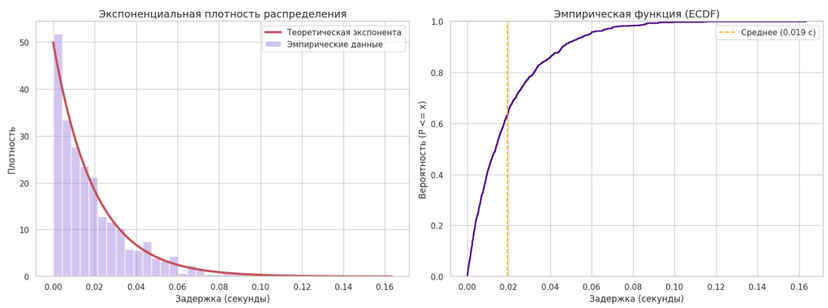


Рисунок 2 – Экспоненциальная модель стохастических задержек

В рассматриваемом случае оно адекватно моделирует задержки, обусловленные ожиданием реакции системы, повторной передачей сообщения или действиями оператора при полуавтоматической блокировке. Представленный на рисунке 2 график показывает хорошее согласие эмпирической плотности распределения с теоретической экспоненциальной кривой при среднем значении задержки 0,019 с, что подтверждает применимость данного закона для моделирования процессов с преобладанием кратковременных задержек и редких, но возможных значительных отклонений. Эмпирическая функция распределения (ECDF) дополнительно иллюстрирует вероятность превышения заданного уровня задержки и позволяет напрямую оценивать риск накопления задержек, оказывающих влияние на устойчивость графика движения и фактическую пропускную способность участка.

На завершающем этапе анализа стохастических задержек был использован эмпирический подход, основанный непосредственно на наблюдаемых (моделируемых) данных без априорных предположений о виде закона распределения. Эмпирическая плотность распределения и эмпирическая функция распределения позволяют наиболее полно учесть асимметрию, тяжёлые хвосты и наличие редких, но значительных задержек, которые не всегда адекватно описываются параметрическими моделями. Как показано на рисунке 3, использование ECDF даёт возможность напрямую оценивать вероятность превышения заданного уровня задержки, что имеет принципиальное значение при анализе устойчивости графика движения и фактической пропускной способности железнодорожного участка. Таким образом, эмпирическое распределение используется в работе как наиболее реалистичный сценарий, отражающий совокупное влияние технических, информационных и человеческих факторов.

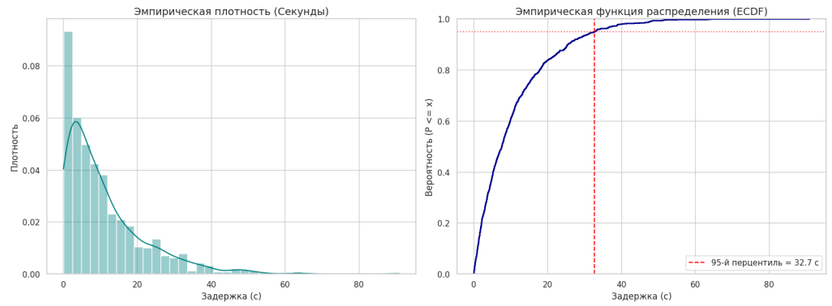


Рисунок 3 – Эмпирическая модель стохастических задержек

В дальнейшем при оценке пропускной способности именно эмпирическое распределение использовалось в качестве базового, тогда как нормальное и экспоненциальное распределения применялись для сравнительного анализа.

При учёте стохастической задержки передачи разрешения, определённой по эмпирической выборке и соответствующей D=32,7 с (рисунок 3), фактический межпоездной интервал увеличивается до 26,55 минут.

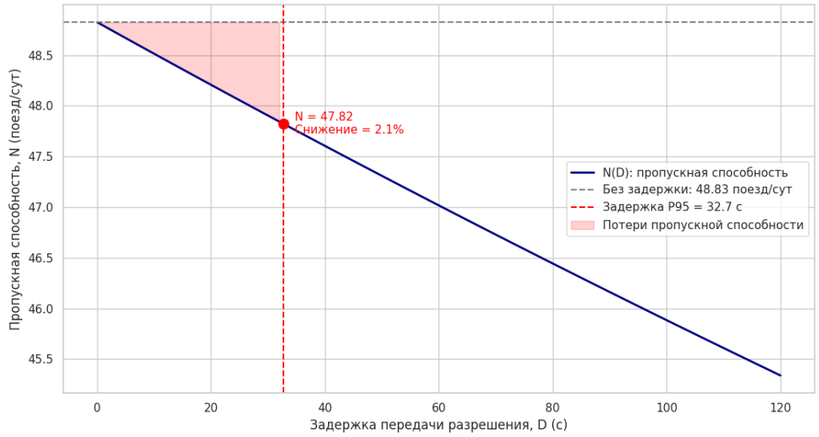


Рисунок 4 – График снижения пропускной способности при учете стохастических задержек

В результате пропускная способность однопутного электрифицированного участка согласно формуле 7 снижается с 48,83 до 47,82 поезда в сутки, что соответствует уменьшению примерно на 2,1 %. Полученный результат (рисунок 4) подтверждает существенное влияние редких, но значительных задержек на пропускную способность.

Результаты показывают, что учёт стохастических задержек передачи разрешения приводит к снижению пропускной способности однопутного электрифицированного участка за счёт увеличения фактического межпоездного интервала. Даже относительно небольшие по абсолютной величине задержки оказывают заметное влияние на фактическую пропускную способность, что подтверждает необходимость их учёта при оценке эксплуатационных возможностей инфраструктуры.

Информация о финансировании

Статья выполнена в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP22685501 «Оценка влияния систем интервального регулирования движения поездов на пропускную способность железнодорожных линий»)

Выводы

Проведенное исследование подтвердило, что пропускная способность железнодорожного участка существенно зависит не только от конструктивных и организационных характеристик систем интервального регулирования движения поездов, но и от стохастических задержек, возникающих в процессе выдачи разрешений и взаимодействия технических средств. Анализ трех систем ИРДП показал, что наибольшую чувствительность к случайным задержкам демонстрирует полуавтоматическая блокировка, где ключевую роль играет

человеческий фактор. Автоматическая и радиоблокировка в меньшей степени подвержены вариативности интервалов, однако также имеют характерные источники задержек, связанные с работой устройств сигнализации и каналов связи.

Впервые в расчет пропускной способности был введен дополнительный параметр, учитывающий задержки передачи разрешений, что позволило количественно оценить влияние случайных факторов и повысить точность оценок по сравнению с традиционными детерминированными методами. Применение нормального, экспоненциального и эмпирического распределений продемонстрировало, что фактические задержки характеризуются асимметрией и наличием «тяжелых хвостов», что делает использование стохастических методов обоснованным и необходимым.

Полученные результаты подтверждают, что учет вариабельности задержек позволяет более надежно оценивать эксплуатационную устойчивость движения и принимать обоснованные инженерные решения при модернизации систем сигнализации. Методика может быть использована для проектирования, планирования графика движения и оценки эффективности существующих систем ИРДП на сети железных дорог Республики Казахстан, а также служить основой для дальнейших исследований в области цифровизации и повышения безопасности движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Бессоненко, С. А., Осипов, Н. И., Медведев, В. И.** Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (67). – С. 21–29.

2 **Luptak, V., Dedik, M., Morihladko, P., Sulko, P., Peceny, L.** Assessment of the railway line capacity on the railway network using a new innovative method // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – Art. 4476. – https://doi.org/10.3390/su17104476.

3 **Pachl, J.** Railway operation and control. – 4th ed. – Mountlake Terrace, WA : VTD Rail Publishing, 2018. – 302 p.

4 Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04.03.2022 г. № 545/р: в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 16.12.2022 г. № 3340/р. – М.: ОАО «РЖД», 2022.

5 **Janota, A., Pirnik, R., Zdansky, J., Nagy, P.** Human factor analysis of the railway traffic operators // Machines. – 2022. – Vol. 10. – Art. 820. – https://doi.org/10.3390/machines10090820.

6 Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования: утв. приказом Минтранса России от 18.07.2018 № 266. – М. : Минтранс России, 2018.

7 **Hadj-Mabrouk, H.** New approach of assessing human errors in railways // Transactions of VSB – Technical University of Ostrava. Safety Engineering Series. – 2018. – Vol. XIII. – P. 1–17.

8 **Wang, W., Liu, X., Qin, Y.** A modified HEART method with FANP for human error assessment in high-speed railway dispatching tasks // International Journal of Industrial Ergonomics. – 2018. – Vol. 67. – № 3. – P. 242–258.

9 **Шевелев, Г. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2019. – 114 с.

10 **Roets, B.** Railway traffic control performance: An empirical analysis of productive efficiency, fatigue risk, and human error in a real-world setting. Doctoral dissertation. – Ghent : Ghent University, 2017. – 137 p.

REFERENCES

1 **Bessonenko, S. A., Osipov, N. I., Medvedev, V. I.** Ocenka effektivnosti interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov kak al'ternativy sooruzheniyu vtoryh glavnyh putej [Evaluation of the effectiveness of interval train traffic control as an alternative to the construction of second main tracks] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. – 2023. – №4 (67). – P. 21–29.

2 **Luptak, V., Dedik, M., Morihladko, P., Sulko, P., Peceny, L.** Assessment of the railway line capacity on the railway network using a new innovative method // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – Art. 4476. – https://doi.org/10.3390/su17104476.

3 **Pachl, J.** Railway operation and control. – 4th ed. – Mountlake Terrace, WA : VTD Rail Publishing, 2018. – 302 p.

4 Instrukciya po raschetu propusknoj i provoznoj sposobnostej zheleznyh dorog OAO «RZHD» [Instructions for calculating the throughput and carrying capacity of railways of JSC Russian Railways: approved by the order of JSC Russian Railways]: utv. rasporyazheniem OAO «RZHD» ot 04.03.2022 g. № 545/r: v red. rasporyazheniya OAO «RZHD» ot 16.12.2022 g. № 3340/r. – M.: OAO «RZHD», 2022.

5 **Janota, A., Pirnik, R., Zdansky, J., Nagy, P.** Human factor analysis of the railway traffic operators // Machines. – 2022. – Vol. 10. – Art. 820. – https://doi.org/10.3390/machines10090820.

6 Metodika opredeleniya propusknoj i provoznoj sposobnostej infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya [Methodology for determining the capacity and carrying capacity of public railway transport infrastructure]: utv. prikazom Mintransa Rossii ot 18.07.2018 № 266. – M. : Mintrans Rossii, 2018.

7 **Hadj-Mabrouk, H.** New approach of assessing human errors in railways // Transactions of VSB – Technical University of Ostrava. Safety Engineering Series. – 2018. – Vol. XIII. – P. 1–17.

8 **Wang, W., Liu, X., Qin, Y.** A modified HEART method with FANP for human error assessment in high-speed railway dispatching tasks // International Journal of Industrial Ergonomics. – 2018. – Vol. 67. – № 3. – P. 242–258.

9 **SHevelev, G. E.** Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]: uchebnoe posobie. – Tomsk : Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2019. – 114 p.

10 **Roets, B.** Railway traffic control performance: An empirical analysis of productive efficiency, fatigue risk, and human error in a real-world setting. Doctoral dissertation. – Ghent : Ghent University, 2017. – 137 p.

Поступило в редакцию 04.01.26.
Поступило с исправлениями 04.01.26.
Принято в печать 17.02.26.

***Ж. Е. Шукаманов[1], Г. А. Сулейменова[2]**
[1]М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Қазақстан Республикасы, Тараз қ.;
[2]М.Тынышпаев атындағы ALT университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
04.01.26 ж. баспаға түсті.
04.01.26 ж. түзетулерімен түсті.
17.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТЕМІРЖОЛ ТЕЛІМІНІҢ ӨТКІЗУ ҚАБІЛЕТІНЕ СТОХАСТИКАЛЫҚ КІДІРІСТЕРДІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Мақалада теміржол телімінің өткізу қабілетіне рұқсат беру процесінде туындайтын стохастикалық кідірістердің әсері зерттелген. Зерттеу нысаны ретінде уақыттық интервалдардың жоғары вариативтілігімен сипатталатын, бұл вариативтілік бекет кезекшісінің қатысуына және техникалық құралдардың өзара әрекеттесу ерекшеліктеріне байланысты болатын жартылай автоматты блоктаумен жабдықталған біржолды теміржол телімі таңдап алынған. Өткізу қабілетін есептеудің қолданыстағы формуласына рұқсат беру кідірістерінің стохастикалық құрамдасын ескеретін қосымша параметр енгізілген. Аталған параметрді бағалау үшін бақылаулар таңдауы негізінде қалыптастырылған қалыпты, экспоненциалды және эмпирикалық үлестірулер қолданылды. Кідірістерді сипаттаудың әртүрлі тәсілдерінің телімнің нақты өткізу қабілетіне әсері салыстырмалы түрде талданды. Стохастикалық кідірістерді ескеру детерминациялық бағалаумен салыстырғанда есептік өткізу қабілетінің төмендеуіне әкелетіні және пойыздар қозғалысының нақты пайдалану жағдайларын негұрлым шынайы сипаттайтыны көрсетілді. Кідірістердің жоғары квантильдері қозғалыс кестесінің тұрақтылығына және эксплуатациялық көрсеткіштерге елеулі әсер ететіні анықталды. Ұсынылған тәсіл есептеулердің қайта өндірілуін қамтамасыз етеді және әртүрлі теміржол желілері мен пойыздар қозғалысын интервальді реттеу жүйелеріне бейімделуі мүмкін. Алынған нәтижелер теміржол желілерінің өткізу қабілетін бағалау кезінде стохастикалық тәсілді қолданудың мақсатқа сай екенін растайды.

Кілттік сөздер: теміржол, интервалды реттеу, жартылай автоматты блоктау, өткізу қабілеттілік, стохастикалық кідірістер.

Zh. Shukamanov[1], G. Suleimenova[2]
[1]M. H. Dulati Taraz University, Republic of Kazakhstan, Taraz;
[2]ALT University named after M. Tynyshpaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty
Received 04.01.26.
Received in revised form 04.01.26.
Accepted for publication 17.02.26.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF STOCHASTIC DELAYS ON THE CAPACITY OF A RAILWAY SECTION

This paper investigates the impact of stochastic permission-transfer delays on the capacity of a railway section. The study focuses on a single-track section equipped with semi-automatic blocking, which is characterized by a high variability of time intervals caused by operator involvement and the interaction of technical systems. An additional parameter accounting for the stochastic component of permission-transfer delays is introduced into the existing capacity calculation formula. This parameter is evaluated using normal, exponential, and empirical distributions constructed from an observation sample. A comparative analysis is performed to assess the influence of different delay modeling approaches on the actual capacity of the railway section. The results demonstrate that accounting for stochastic delays leads to a reduction in the calculated capacity compared to deterministic estimates and provides a more realistic representation of operational train movement conditions. Particular attention is given to the tail behavior of delay distributions, which has the most significant impact on timetable stability and operational performance. The proposed approach ensures the reproducibility of capacity calculations and can be adapted to various railway line configurations and train interval control systems. The findings confirm the relevance of applying a stochastic approach in railway capacity assessment.

Keywords: railway, interval control, semi-automatic blocking, capacity, stochastic delays.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Абдулабеков Ержан Эдгарович, техника ғылымдарының кандидаты, «Қазхром» ТҰК» АҚ филиалы – Ақтөбе ферроқорытпа зауытының директоры, Ақтөбе қ., 030015 Қазақстан Республикасы, e-mail: abdulabekov.yerzhan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-8878-7021

Абдулабеков Ержан Эдгарович, кандидат технических наук, директор Актюбинского завода ферросплавов – филиала АО «ТНК «Казхром», г. Актобе, 030015, Республика Казахстан, e-mail: abdulabekov.yerzhan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-8878-7021

Abdulabekov Yerzhan Edgarovich, Candidate of Technical Sciences, Director of Aktobe Ferroalloys Plant - branch of JSC «TNC» Kazchrome», Aktobe, 030015, Republic Kazakhstan, e-mail: abdulabekov.yerzhan@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-8878-7021

Абдулина Сауле Амангельдыевна, PhD, Д. Серікбаев атындағы Шығыс-Қазақстан техникалық университеті, «Халықаралық инженерия» мектебінің профессоры, Өскемен қ., 070001, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Абдуллина Сауле Амангельдыевна, PhD, Профессор школы «Международной инженерии», Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070001, Республика Казахстан, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Abdulina Saule Amangeldiyevna, PhD, Professor of the School of International Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070001, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdulina.saule@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6328-8652

Ажибаева Майра Азаматқызы, Жаратылыстану ғылымдары және IT Жоғары мектебінің физика және технологиялар кафедрасының 7M05301-Физика 2 курс магистранты, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070018, Қазақстан Республикасы, e-mail: maira.azhibaeva99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-4446-0903

Ажибаева Майра Азаматқызы, 7M05301-Физика Магистрантка 2 курса физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, PhD, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070018, Республика Казахстан, e-mail: maira.azhibaeva99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-4446-0903

Azhibaeva Maira Azamatkyzy, 2nd-year Master's student (7M05301 – Physics), Department of Physics and Technologies, School of Natural Sciences and IT, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Oskemen, 070018, Republic of Kazakhstan, e-mail: maira.azhibaeva99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-4446-0903

Азаматов Багдат Нурланович, PhD, Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: bazamatov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6381-5846

Азаматов Багдат Нурланович, PhD, Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: bazamatov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6381-5846

Azamatov Bagdat Nurlanovich, PhD, East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: bazamatov@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6381-5846

Айтбала Нарембекова, техника ғылымдарының кандидаты, «Материалтану» кафедрасының доценті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: cpk – kru@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9066-6564

Айтбала Нарембекова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: cpk – kru@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9066-6564

Aytbala Narembekova, Candidate of Technical science, Associate professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, N. Nazarbayev, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: cpk – kru@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9066-6564

Айтуганова Жамила Темирбаевна, «Механика» мамандығы бойынша докторант, Механика және математика факультеті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhamila_a77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0013-8272

Айтуганова Жамила Темирбаевна, докторант по специальности «Механика», Факультет Механика и математика, Казахский национальный университет имени Аль-фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: zhamila_a77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0013-8272

Aituganova Zhamila Temirbaebna, Doctoral student in «Mechanics», Faculty of Mechanics and Mathematics, Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhamila_a77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0013-8272

Алтынбаев Асет Жанатович, Ғылым департаментінің инновация және ғылыми-техникалық бағдарламалар бөлімінің ғылыми қызметкері, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: altynbayev_aset@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-1700-7645

Алтынбаев Асет Жанатович, научный сотрудник отдела инновация и научно-технических программ департамента науки, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: altynbayev_aset@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-1700-7645

Altynbayev Asset, Researcher, Innovation and Scientific and Technical Programs Department, Department of Science Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: altynbayev_aset@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-1700-7645

Алшынова Айман Медеубекқызы, PhD, «Өндірістік процестердің машиналары мен аппараттары» кафедрасының қауымд. профессоры, Инжиниринг және ақпараттық технологиялар факультеті, Алматы технологиялық университеті, e-mail: Алматы қ., 050012, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiman16@mail.ru

Алшынова Айман Медеубековна, PhD, ассоц.профессор кафедры «Машины и аппараты производственных процессов», Алматинский технологический университет, факультет инжиниринга и информационных технологий, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан, e-mail: aiman16@mail.ru

Alshynova Aiman Medeubekovna, PhD, Associate Professor of the Department of «Machines and Devices of Production Processes», Faculty of Engineering and Information Technologies, Almaty Technological University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aiman16@mail.ru

Амангалиев Ерлан Зейінгалиұлы, «Аспап жасау» мамандығы бойынша докторант, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2842-2702

Амангалиев Ерлан Зингалеевич, докторант по специальности «Приборостроение», Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2842-2702

Amangaliyev Yerlan, Doctoral student in «Instrumentation», Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: amangaliev_erlan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2842-2702

Асанов Багдат Уланұлы, техника ғылымдарының магистрі, докторант, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 05000, Қазақстан Республикасы, e-mail: asanov_bagdat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

Асанов Багдат Уланулы, магистр технических наук, докторант, Университет имени Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: asanov_bagdat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

Asanov Bagdat Ulanuly, Master of Technical Sciences, PhD, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: asanov_bagdat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

Ахмедов Даулет Шафигуллович, Бас ғылыми қызметкер, техника ғылымдарының докторы, академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: akhmedov.daulet@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3400-5389

Ахмедов Даулет Шафигуллович, главный научный сотрудник, доктор технических наук, Институт механики и машиноведения им. академика У. А. Джолдасбекова, Алматы қ., 050010, Республика Казахстан, e-mail: akhmedov.daulet@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3400-5389

Akhmedov Daulet Shafigullovich, Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: akhmedov.daulet@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3400-5389

Әбдірашит Асылбек Мирамханұлы, PhD, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының оқытушысы, 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, abdirashit.assylbek@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0718-3041

Әнуар Тажибайұлы, т.ғ.к., доцент, Қызылорда «Болашақ» университеті, Қазақстан Республикасы Қызылорда қ., 120000, e-mail: tazhibay_anuar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0139-8252

Әнуар Тажибайұлы, к.т.н., доцент, Кызылординский университет «Болашак», Республика Казақстан, Кызылорда 120000, e-mail: tazhibay_anuar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0139-8252

Anuar Tazhibayuly, Associate Professor, Candidate of technical sciences, Kyzylorda University «Bolashak», Republic of Kazakhstan Kyzylorda, 120000, e-mail: tazhibay_anuar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0139-8252

Байгереев Самат Ракимгалиевич, PhD, қауымд.профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Байгереев Самат Ракимгалиевич, PhD, ассоц. профессор, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Baigereyev Samat Rakimgalievich, PhD, Associate Professor, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Байгунусов Айдос Жомартханович, докторант, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., 070010, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Байгунусов Айдос Жомартханович, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г.Усть-Каменогорск, 070010, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Baigunussov Aidos Zhomarthanovich, Doctoral student, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 070010, e-mail: baygunusov.aydos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-8607-4986

Баймолданова Лазат Сарқытбекқызы, PhD, қауымд.профессор, Жаратылыстану ғылымдары және IT Жоғары мектебінің физика және технологиялар кафедрасы, «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242X

Баймолданова Лазат Сарқытбекқызы, PhD, ассоц.профессор, кафедра физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242X

Baimoldanova Lazat Sarqytbekkyzy, PhD, Associate Professor, Department of Physics and Technologies, School of IT and Natural Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baimoldals@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3533-242X

Байсанов Сайлаубай Омарұлы, техника ғылымдарының докторы, Металлургиялық балқымалар зертханасының жетекшісі, Ж. Әбішев атындағы ХМИ, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: splav_sailaubai2021@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3386-0966

Байсанов Сайлаубай Омарович, доктор технических наук, Руководитель лаборатории металлургических расплавов, ХМИ имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: splav_sailaubai2021@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3386-0966

Baisanov Sailaubai Omarovich, Head of the Laboratory of Metallurgical Melts, Doctor of Technical Sciences, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: splav_sailaubai2021@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3386-0966

Бакиров Алтынсары Ғазизұлы, PhD, қауымд. профессор, «Металлургия» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0002-3742-3467. e-mail: altynsary@mail.ru

Бакиров Алтынсары Газизович, PhD, ассоц. профессор, кафедра «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, https://orcid.org//0000-0002-3742-3467, e-mail: altynsary@mail.ru

Bakirov Altynsary Gazizovich, PhD, Associate Professor, Department of Metallurgy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org//0000-0002-3742-3467, e-mail:altynsary@mail.ru

Балабекова Қырмызы Гинаятқызы, PhD, доцент, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8242-6675

Балабекова Кырмызы Гинаятовна, PhD, доцент, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8242-6675

Balabekova Kyrmyzy Ginayatovna, PhD, Associate Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 06_03_92@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8242-6675

Бауыржан Корабаевич Рахадилов, PhD, қауымд. профессор, «PlasmaScience» ЖШС директоры, Өскемен қаласы, 070000, Қазақстан Республикасы; e-mail: rakhadilovb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Бауыржан Корабаевич Рахадилов, PhD, ассоц. профессор, директор ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан; e-mail: rakhadilovb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Bauyrzhan Korabaevich Rakhadilov, PhD, Associated Professor, Director, «PlasmaScience» LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, of Kazakhstan; e-mail: rakhadilovb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5990-7123

Бегалиев Рустем Алибайұлы, докторант, Торайғыров университеті, Инженерия факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, rustem_begaliev_pvl@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-1112-6322

Бегалиев Рустем Алибаевич, докторант, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: rustem_begaliev_pvl@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-1112-6322

Zhunussov Ablay Kairtassovich, Doctoral Student, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: rustem_begaliev_pvl@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-1112-6322

Бекжанова Сауле Ертаевна, техника ғылымдарының докторы, профессор, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, Қ. И., Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050013, e-mail: s.bekzhanova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6272-9567

Бекжанова Сауле Ертаевна, доктор технических наук, профессор, Школа транспортной инженерии и логистики имени М. Тынышбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казақстан, 050013, г. Алматы, e-mail: s.bekzhanova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6272-9567

Bekzhanova Saule Ertaevna, Doctor of technical sciences, Professor, M. Tynyshbayev School of Transport Engineering and Logistics, Satbayev University, Republic of Kazakhstan Almaty, 050013, e-mail: s.bekzhanova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6272-9567

Бекмырза Жұмаш Айтжанұлы, PhD, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай облыстық университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: studentkp@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0005-5086-4127

Бекмырза Жұмаш Айтжанұлы, PhD, Костанайский областной университет имени Ахмета Байтурсынулы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: studentkp@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0005-5086-4127

Zhumash Aitzhanuly Bektyrza, PhD, Akhmet Baitursynov Kostanay Regional University, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: studentkp@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0005-5086-4127

Берг Александра Сергеевна, PhD, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: kibeko_1995@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0528-640X

Берг Александра Сергеевна, PhD, преподаватель кафедры, Факультет Металлургии и машиностроения, Карагандинский технический Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: kibeko_1995@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0528-640X

Berg Alexandra Sergeevna, PhD, Lecturer, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: kibeko_1995@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0528-640X

Берг Андрей Алексеевич, оқытушысы, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: 22526633@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8907-1803

Берг Андрей Алексеевич, преподаватель, Факультет металлургии и машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: 22526633@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8907-1803

Berg Andrey Alekseevich, Lecturer, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: 22526633@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8907-1803

Бердімұратова Дидар Ибрагимқызы, «Механика және металлөңдеу» мамандығы бойынша докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.berdimuratova@kazatu.edu.kz, 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: d.berdimuratova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0000-9612-8487

Berdimuratova Didar Ibragimkuzi, Doctoral student in the specialty «Mechanics and metalworking», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.berdimuratova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0000-9612-8487

Богомолов Алексей Витальевич, техникалық ғылымдар кандидаты, «Металлургия» кафедрасына профессор Торайғыров университеті, Инженерия факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

Богомолов Алексей Витальевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «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, Toraighyrov University, Faculty of Engineering, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

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, 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/0000-0001-8778-785

Бобеев Абай Баханұлы, техника ғылымдары кандидаты, доцент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: bobeevabai@mail.ru

Бобеев Абай Баханович, кандидат технических наук, доцент, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: bobeevabai@mail.ru

Bobeev Abay Bakhanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: bobeevabai@mail.ru

Бузауова Тоты Мейрбековна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: t.buzauova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Бузауова Тоты Мейрбековна, кандидат технических наук, профессор, факультет Металлургии и машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: t.buzauova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Buzauova Toty, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: t.buzauova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Быков Петр Олегович, техника ғылымдарының кандидаты, Металлургия кафедрасының профессор, Торайғыров университеті, Инженерия факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Быков Петр Олегович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Металлургия», Торайгыров университет, Факультет инженерии, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

Bykov Petr Olegovich, Candidate of Technical Science, Professor of the Department of Metallurgy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bykov_petr@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7540-7882

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, т.ғ.к., профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Гурьянов Георгий Александрович, кандидат техничеких наук, профессор Международной школы инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Guryanov Georgiy, Alexandrovich, Candidate of technical sciences, Professor of the International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Габысалық Риза, PhD, қауымд.профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9184-0897

Габысалық Риза, PhD, ассоц.профессор, Международная школа инженерии, Восточно Казахстанский технический университет имени Д. Сериқбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9184-0897

Gabdyssalyk Riza, PhD, associate professor, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9184-0897

Доненбаев Бакытжан Серікұлы, PhD, «Механика» кафедрасының аға оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 010027, Қазақстан Республикасы, e-mail: b.donenbayev@ktu.edu.kz

Доненбаев Бакытжан Серикович, PhD, ст.преподаватель кафедры «Механика», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, 010027, Республика Казахстан, e-mail: b.donenbayev@ktu.edu.kz

Donenbayev Bakytzhan Serikovich, PhD, Senior Lecturer of the Department of Mechanics, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 010027, Republic of Kazakhstan, e-mail: b.donenbayev@ktu.edu.kz

Досжанов Куаныш Куанарович, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының магистранты, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Техникалық факультет, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kuanyshdoszhanov84@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3625-9423

Досжанов Куаныш Куанарович, магистрант кафедры «Металлургия и горное дело», Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова», Технический факультет, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: kuanyshdoszhanov84@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3625-9423

Doszhanov Kuanysh Kuanarovich, Master's student of the Department of Metallurgy and Mining, Aktobe Regional University named after K.Zhubanov, Faculty of Technology, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kuanyshdoszhanov84@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3625-9423

Дудкин Михаил Васильевич, «ЕВРОПЛЮС ВОСТОК» ЖШС, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., 070010, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Дудкин Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор, ТОО «ЕВРОПЛЮС ВОСТОК», Республика Казахстан, Усть-Каменогорск, 070010, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Dudkin Mikhail Vasilyevich, Doctor of technical sciences, professor, «EUROPLUS VOSTOK» LLP. Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 070010, e-mail: doudkin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Ержанова Ақбота Ермухамедқызы, PhD, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.erzhanova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6826-8965

Ержанова Акбота Ермухамедовна, PhD, ст. преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: a.erzhanova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6826-8965

Erzhanova Akbota Ermukhamedovna, PhD, Senior Lecturer, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.erzhanova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-6826-8965

Жаркевич Ольга Михайловна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: zharkevich82@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4249-4710

Жаркевич Ольга Михайловна, кандидат технических наук, профессор, Факультет Металлургии и машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: zharkevich82@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4249-4710

Zharkevich Olga, Candidate of technical sciences, professor, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, e-mail: zharkevich82@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4249-4710

Жумагалиев Ерлан Уланович, техника ғылымдарың кандидаты, қауымд.профессор, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының аға оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жумагалиев Ерлан Уланович, кандидат технических наук, ассоц.профессор, ст.преподаватель кафедры «Металлургия и горное дело», Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Zhumagaliyev Yerlan Ulanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Metallurgy and Mining, K. Zhubanov Aktobe Regional University. Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: yzhumagaliyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жумагалиев Ерлан Уланұлы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының меңгерушісі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: erlan_zhumagalie@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8002-2853

Жумагалиев Ерлан Уланович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, заведующий кафедрой «Металлургия и горное дело», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: erlan_zhumagalie@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8002-2853

Yerlan Zhumagaliev, Candidate of technical sciences, Associate professor, Head of the Department of Metallurgy and mining, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: erlan_zhumagalie@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8002-2853

Жұмағалиев Бауыржан Оралұлы, «Механика және металлөңдеу» мамандығы бойынша докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: baurzuma@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-7688-471X

Жумагалиев Бауыржан Оралович, докторант по специальности «Механика и метллообработка», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: baurzuma@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-7688-471X

Zhumagaliyev Bauyrzhan Oralovich, PhD student in Mechanics and Metalworking, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: baurzuma@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-7688-471X

Жунісов Абылай Қайыртасұлы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Металлургия кафедрасының меңгерушісі, Торайғыров университеті, профессор, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Жунусов Аблай Каиртасович, кандидат технических наук, профессор, Заведующий кафедрой металлургии, профессор НАО «Торайгыров Университет», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Zhunusov Ablay, Candidate of Technical Science, professor, Head of the Department of Metallurgy, Professor Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Жунісова Айгүл Қайыргелдықызы, магистр, аға оқытушы, «Көліктік техника және логистика» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru

Жунусова Айгуль Каиргельдиновна, магистр, ст.преподаватель, кафедра Транспортная техника и логистика, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Zhunussova Aygul, master. Senior teacher., Department of " Transport Equipment and Logistics", «Toraighyrov University» NCJSC, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusova.aig@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8842-6433

Забиева Алия Батырбекқызы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zabiyeva_ab@ebu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Забиева Алия Батырбековна, кандидат технических наук, доцент, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: zabiyeva_ab@ebu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Zabiyeva Aliya Batyrbekovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zabiyeva_ab@ebu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Искаков Бауыржан Мырзабекович, PhD, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасының оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Искаков Бауыржан Мырзабекович, PhD, преподаватель кафедры «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 140000, Республика Казахстан, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Iskakov Bauyrzhan, PhD, Lecturer at the Department of «Technology of Food, Food and Processing Industries», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7665-8058

Искакова Динара Алтынбековна, «Машина жасау» мамандығы бойынша докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140011, Қазақстан Республикасы, e-mail: iskakovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-4818

Искакова Динара Алтынбековна, докторант по специальности «Машиностроение», Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140011, Республика Казахстан, e-mail: iskakovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-4818

Iskakova Dinara Altynbekovna, PhD student in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140011, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0003-3104-4818, e-mail: iskakovada@mail.ru

Исмайылов Аманкелді Есіркегенович, Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, 050060, e-mail: box1_email61@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0089-7036

Исмайылов Аманкелди Есиркегенович, Алматинский Технологический университет, г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, e-mail: box1_email61@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0089-7036

Ismayilov Amankeldi Esirkegenovich, Almaty Technological University, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan, e-mail: box1_email61@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0089-7036

Кабашев Асхат Рахимжанович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, «Көлік техникасы және тасымалдауды ұйымдастыру» кафедрасы, Автобиль-жол факультеті, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жолинтитуты БМ, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: askarkabasheb@gmail.com

Кабашев Асхат Рахимжанович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, кафедра «Транспортная техника и организация перевозок», Факультет: автомобильно-дорожный, Казахский автомобильно-дорожный интитут имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: askarkabasheb@gmail.com

Kabashev Askat Rakhimzhanovich, Candidate of Technical Sciences, «Professor the Department of «Transport techniqueandtransportation organization», Faculty of Automobile and Road, Kazakh Automobile and Road Institute named after L. B. Goncharova, 050061, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: askarkabasheb@gmail.com

Кабашева Мерей Рахимжановна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, «Көлік техникасы және тасымалдауды ұйымдастыру» кафедрасы, Автобиль-жол факультеті, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жолинтитуты БМ, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: mirey7@yandex.ru

Кабашева Мерей Рахимжановна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, кафедра «Транспортная техника и организация перевозок», Факультет: автомобильно-дорожный, Казахский автомобильно-дорожный интитут имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: mirey7@yandex.ru

Kabasheva Mirey Rakhimzhanovna, Candidate of Technical Sciences, «Professor the Department of «Transport techniqueandtransportation organization», Faculty of Automobile and Road, Kazakh Automobile and Road Institute named after L. B. Goncharova, 050061, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: mirey7@yandex.ru

Кабылканов Султан Кайырбекович, Д. Серікбаев атындағы Шығыс-Қазақстан техникалық университетінің 8D07202–Металлургия білім бағдарламасы бойынша 3-ші курс докторанты, «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1272-2065

Кабылканов Султан Кайырбекович, докторант 3 курса по образовательной программе 8D07202-Металлургия, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, младший научный сотрудник лаборатории «ферросплавы и восстановительные процессы», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1272-2065

Kabylkanov Sultan Kaiyrbekovich, 3rd year doctoral student in the educational program 8D07202-Metallurgy, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Junior researcher at the laboratory «Ferroalloys and reduction processes», Chemical and Metallurgical Institute named after J. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: kabylkanov.s@ektu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1272-2065

Какимов Мухтарбек Муханович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасының меңгерушісі, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

Какимов Мухтарбек Муханович, кандидат технических наук, профессор, Зав. кафедрой «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 140000, 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, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: muhtarbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1190-2195

Каменов Алмат Айтасович, Металлургия кафедрасының аға оқытушысы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Каменов Алмат Айтасович, старший преподаватель кафедры Металлургия, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Kamenov Almat, Senior Lecturer of the Department of Metallurgy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Камысбаева Айжан Талгатовна, Көлік қызметтері мамандығы бойынша докторант, М. Тынышбаев атындағы көлік инженериясы және логистика мектебі, «Логистика» ББББ, Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayzhan_kamysbaeva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0800-374X

Камысбаева Айжан Талгатовна, докторант по специальности «Транспортные услуги», Школа транспортной инженерии и логистики им. М. Тынышбаева, ОП «Логистика», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: ayzhan_kamysbaeva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0800-374X

Kamysbaeva Ayzhan Talgatovna, Doctoral student in «Transport Services», M. Tynyshbayev School of Transport Engineering and Logistics, Logistics Department, Satpayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: ayzhan_kamysbaeva@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0800-374X 87768890202

Касенов Асылбек Жумабекович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Павлодар қ., Тараз қ., 140008, Қазақстан Республикасы, 080000, e-mail: kasenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Касенов Асылбек Жумабекович, кандидат технических наук, профессор, Факультет инженерии, Торайгыров университет, Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации г. Павлодар, г Тараз, 140008, Республика Казахстан, 080000, e-mail: kasenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001- 9552-1439

Kassenov Assylbek Zhumabekovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Kazakh National University of water management and irrigation, Pavlodar, Taraz, 140008, 080000 Republic of Kazakhstan, e-mail: kasenov.a@tou.edu.kz, a.kassenov@kaznuvhi.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Квон Светлана Сергеевна, т.ғ.к., профессор, «Металлургия және жаңа материалдар» кафедрасының Металлургия және машина жасау факультеті, Абылкас Сагинов атындағы Қарағанды Техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.kvon@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Квон Светлана Сергеевна, к.т.н., профессор кафедры «Металлургия и новые материалы», Факультет металлургии и новых материалов, Карагандинский Технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: s.kvon@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Kvon Svetlana Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgy and New Materials, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.kvon@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5439-4426

Келаманов Бауыржан Сатыбалдыулы, 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: bkelamanov@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7646-9513

Келаманов Бауыржан Сатыбалдыулы, кандидат технических наук, профессор кафедры «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 of the 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

Кенжебекова Анар Ерболатқызы, магистр, аға оқытушы, Металлургия кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: kenzhebekova_psu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

Кенжебекова Анар Ерболатовна, магистр, ст.преподаватель, кафедра «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: kenzhebekova_psu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

Kenzhebekova Anar, Master Senior teacher., Department of «Metallurgy», Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kenzhebekova_psu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8111-6755

Корсукова Ирина Ярославовна, металлургиялық балқымалар зертханасының ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы ХМИ, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: ikorsukova60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2121-4270

Корсукова Ирина Ярославовна, научный сотрудник лаборатории металлургических, ХМИ имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: ikorsukova60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2121-4270

Korsukova Irina Yaroslavovna, Researcher at the Metallurgical Laboratory, Kharkiv State Medical KhMI Zh. Abisheva, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: ikorsukova60@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2121-4270

Куликов Виталий Юрьевич, т.ғ.к., профессор, «Металлургия және жаңа материалдар» кафедрасы, Металлургия және машина жасау факультеті, Абылкас Сагинов атындағы Қарағанды Техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: v.kulikov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Куликов Виталий Юрьевич, к.т.н., профессор, кафедра «Металлургия и новые материалы», Факультет металлургии и новых материалов, Карагандинский Технический Университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: v.kulikov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Kulikov Vitaliy Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgy and New Materials, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: v.kulikov@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Кустарев Геннадий Владимирович, т.ғ.к., профессор, Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университетінің «Жол-құрылыс машиналары» кафедрасының меңгерушісі, Мәскеу қ., 125319, Ресей Федерациясы, e-mail: g.kustarev@madi.ru

Кустарев Геннадий Владимирович, к.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Дорожно-строительные машины» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университет, г. Москва, 125319, Российская Федерация, e-mail: g.kustarev@madi.ru

Kustarev Gennady Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Road-Building Machines, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: g.kustarev@madi.ru

Қалқаман Жұмашев, техника ғылымдарының докторы, аға ғылыми қызметкері (СССРОның ЖАКы), «Қонбалы қоқыстарды кешенді пайдаланудың физико-химиясы» зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: innovaciya_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8577-9417

Калкаман Жумашев, доктор технических наук, ст.научный сотрудник ВАК СССР, заведующий лабораторией «Физико – химия комплексного использования конденсированных отходов», Химико – металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: innovaciya_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8577-9417

Kalkaman Zhumashev, Doctor of technical science, Senior research worker of HCC USSR, Head of «Physics-chemistry of complex use of the condensed waste», Laboratory of Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Kazakhstan, e-mail: innovaciya_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8577-9417

Қасымжанова Айдана Доненбайқызы, PhD, «Өнеркәсіптік көлік» кафедрасының қауымд. профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, 100027, Қарағанды қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Қасымжанова Айдана Доненбайқызы, PhD, ассоц.профессор кафедры «Промышленный транспорт», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, 100027, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Қасымжанова Айдана Доненбайқызы, PhD, Associate professor of the department of «Industrial Transport», Abylkas Saginov Karaganda Technical University, 100027, Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: ajdanakasymzanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4623-0202

Қуанов Иса Серікұлы, «Механика және металлөңдеу» мамандығы бойынша докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: isa_kuan@mail.ru

Куанов Иса Серикович, докторант по специальности «Механика и метллообработка», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: isa_kuan@mail.ru

Kuanov Isa, Doctoral student in the specialty «Mechanics and metalworking», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: isa_kuan@mail.ru

Маздубай Асылхан Владимирович, PhD, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: mazdubay.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

Маздубай Асылхан Владимирович, PhD, профессор, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: mazdubay.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

Mazdubay Assylkhan Vladimirovich, PhD, Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: mazdubay.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-3396-1716

Маратұлы Бауыржан, «Машина жасау» мамандығының докторанты, инженер-зерттеуші, Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: makebake9301@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2506-2545

Маратұлы Бауыржан, докторант специальности «Машиностроение», инженер-исследователь, Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: makebake9301@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2506-2545

Maratuly Bauyrzhan, Doctoral student of «Mechanical Engineering», Research Engineer, East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: makebake9301@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2506-2545

Мардонов Бахтиёр Тешаевич, техника ғылымдары докторы, профессор, Науайы тау-кен технологиялар университетінің ректоры, Науайы, 210100, Өзбекістан Республикасы, e-mail: mbt69@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8386-0182

Мардонов Бахтиёр Тешаевич, доктор технических наук, профессор, ректор Навоийского государственного горно-технологического университета, Навои, 210100, Республика Узбекистан, e-mail: mbt69@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8386-0182

Mardonov Bakhtiyor Teshaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, rector of Navoi State Mining and Technology University, Navoi, 210100, Republic of Uzbekistan, e-mail: mbt69@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8386-0182

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD, «Металлургия» мамандығы бойынша «Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері» зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD по специальности – «Металлургия», заведующий лабораторией «Ферросплавов и процессов восстановления», Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Makhambetov Yerbolat Nysanalyuly, PhD in the specialty – «Metallurgy», Head of the Laboratory of «Ferroalloys and Recovery Processes», Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: makhambetovyerbolat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Маханов Мұхтар, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерлік және ақпараттық технологиялар мектебі, META University, Алматы қ., Қазақстан республикасы, e-mail: m.makhanov@meta.edu.kz, http://orcid.org/0000-0002-1490-3388

Маханов Мухтар, кандидат технических наук, профессор, Школа инженерных и информационной технологий, META University, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: m.makhanov@meta.edu.kz, http://orcid.org/0000-0002-1490-3388

Makhanov Mukhtar, Candidate of Technical Sciences, professor, School of Engineering and Information Technology, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.makhanov@meta.edu.kz, http://orcid.org/0000-0002-1490-3388

Мендалиева Сауле Ильинична, техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.mendalieva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-4819-8656

Мендалиева Сауле Ильинична, кандидат технических наук, ст.преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: s.mendalieva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-4819-8656

Mendalieva Saule Ilyinichna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.mendalieva@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-4819-8656

Молдаханов Бекболат Аскерханоаич, PhD, аға ғылыми қызметкер, «ЕВРОПЛЮС ВОСТОК» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., 070016, 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: 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

Муздыбаев Мурат Сеитович, т.ғ.к., профессор, Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070003, Қазақстан Республикасы, e-mail: mmuzdybaev@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1787-0921

Муздыбаев Мурат Сеитович, к.т.н., профессор, Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, 070003, Республика Казахстан, e-mail: mmuzdybaev@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1787-0921

Muzdybayev Murat Seitovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070003, Republic of Kazakhstan, e-mail: mmuzdybaev@ektu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1787-0921

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, FabLab MIT ОӨО директоры Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Муканов Руслан Батырбекович, PhD, Директор FabLab MIT, Satbayev University, Қазақстан Республикасы, г. Алматы, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Mukanov Ruslan Batyrbekovich, PhD, Director of FabLab MIT Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty, e-mail: r.mukanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9637-0513

Мурзахметова Ұлбала Аскарбековқызы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Көлік техникасы және тасымалдауды ұйымдастыру» кафедрасы, Автобиль-жол факультеті, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол интитуты БМ, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: u_murzakhmetova@mail.ru

Мурзахметова Ульбала Аскарбековна, кандидат технических наук, профессор, кафедра «Транспортная техника и организация перевозок» Факультет автомобильно-дорожный, Казахский автомобильно-дорожный интитут имени Л. Б. Гончарова, г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: u_murzakhmetova@mail.ru

Murzakhmetova Ulbala, Candidate of Technical Sciences, Professor the Department of «Transport techniqueandtransportation organization», Faculty of Automobile and Road, «Kazakh Automobile and Road Institute named after L. B. Goncharova, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: u_murzakhmetova@mail.ru

Мурсалыкова Майгуль Тауржановна, PhD, «Технологиялық жабдықтар» кафедрасының постдокторанты, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Мурсалыкова Майгуль Тауржановна, PhD, постдокторант кафедры «Технологическое оборудование», университет Шакарима, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: maigul_85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5904-9544

Mursalykova Maigul, PhD, postdoctoral Department of «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

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, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: musina.zh@tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2233-4947

Мустафаева Аяулым Какеновна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-9627-7543

Мустафаева Аяулым Какеновна, кандидат технических наук, ассоц.профессор кафедры «Технология продовольственных, пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 140000, Республика Казахстан, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-9627-7543

Mustafayeva Ayaulym, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Food Processing, and Manufacturing Technology, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: baissemey@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-9627-7543

Нәрікбаева Гүлнар Итемировна, металлургиялық балқымалар зертханасының ғылыми қызметкері, Ж. Әбішев атындағы ХМИ, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: narikbaeva63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1055-3448

Нарикбаева Гульнар Итемировна, научный сотрудник лаборатории металлургических, ХМИ имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: narikbaeva63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1055-3448

Narikbaeva Gulnar Itemirovna, Researcher at the Metallurgical Laboratory, Kharkiv State Medical KhMI Zh. Abisheva, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: narikbaeva63@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1055-3448

Onuralp Yucel, PhD, профессор, Ыстамбұл техникалық университеті, Ыстамбұл қ., 34010, Түркия, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Onuralp Yucel, PhD, профессор, Стамбульский технический университет, г. Стамбул, 34010, Турция, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Onuralp Yucel, PhD, Professor, Istanbul Technical University, Istanbul, 34010, Turkey, e-mail: yucel@itu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-3879-0410

Орынбаев Бауыржан Мұнарбайұлы, PhD, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы, Satbayev University, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: B.Orynbayev@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7730-9060

Орынбаев Бауыржан Мұнарбайұлы, PhD докторант кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», Satbayev University, преподаватель кафедры «Металлургия и горное дело», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: B.Orynbayev@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7730-9060

Orynbayev Bauyrzhan, PhD student of the Department «Metallurgy and mineral processing», Satbayev University, Teacher of the Department «Metallurgy and mining», Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: B.Orynbayev@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7730-9060

Орынтаева Гульжаухар Жунускановна, «Механика» кафедрасының аға оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 010027, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.oryntaeva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0682-3983

Орынтаева Гульжаухар Жунускановна, ст.преподаватель кафедры «Механика», Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, 010027, Республика Казахстан, e-mail: g.oryntaeva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0682-3983

Oryntayeva Gulzhaukhar, Senior Lecturer of the Department of Mechanics, Abylkas Saginov, Karaganda Technical University, Karagandy, 010027, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.oryntaeva@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0682-3983

Полатова Жансая Бактыбаевна, Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, 050038, e-mail: zhansaya.pb@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-5668-2563

Полатова Жансая Бактыбаевна, Алматинский Технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан, 050038, e-mail: zhansaya.pb@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-5668-2563

Polatova Zhansaya Baktybaevna, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, 050038 e-mail: zhansaya.pb@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-5668-2563

Сакенова Римма Ерболатқызы, PhD, қауымд. профессор, Жоғары IT және жаратылыстану ғылымдары мектебінің физика және технологиялар кафедрасы, Сарсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Sakenovarim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6095-0129

Сакенова Римма Ерболатқызы, PhD ассоц. профессор кафедры физики и технологий Высшей школы IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: Sakenovarim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6095-0129

Sakenova Rimma Yerbolatkyzy, PhD, Associate Professor, Department of «Physics and Technologies», School of IT and Natural Sciences, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Sakenovarim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6095-0129

Салина Валентина Алексеевна, техника ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, Унтак жене композиттік материалдар лабораториясы, Ресей ғылыми академиясы, Орал филиалының академик Н. А. Ватолин атындағы металлургия институты, Орал мемлекеттік тау университеті, Екатеринбург қ., 620016, Ресей Федерациясы, e-mail: valentina_salina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7415-717X

Салина Валентина Алексеевна, кандидат технических наук, ст.научный сотрудник, Лаборатория порошковых и компози-ционных материалов, Институт металлургии имени академика Н. А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, 620016, Российская Федерация, Уральский государственный горный университет, e-mail: valentina_salina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7415-717X

Salina Valentina Alekseevna, Candidate Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of powder and composite materials, Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Mining University, Ekaterinburg, 620014, Russian Federation, e-mail: valentina_salina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7415-717X

Сапиянова Айша Мадкеновна, «Металлургия және жаңа материалдар» кафедрасының докторанты, Металлургия және машина жасау факультеті, Абылкас Сагинов атындағы Қарағанды Техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: tsum2013@icloud.com, https://orcid.org/0009-0001-3601-803X

Сапиянова Айша Мадкеновна, докторант кафедры «Металлургия и новые материалы», Факультет металлургии и новых материалов, Карагандинский Технический Университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: tsum2013@icloud.com, https://orcid.org/0009-0001-3601-803X

Sapiyanova Aisha Madkenovna, Doctoral student in department of Metallurgy and New Materials, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: tsum2013@icloud.com, https://orcid.org/0009-0001-3601-803X

Сарбаев Далельхан Ардакович, МСД-25-1 тобының докторанты, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dalelhan20002@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-8014-6823

Сарбаев Далельхан Ардакович, докторант группы МСД-25-1, факультет Металлургии и машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: dalelhan20002@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-8014-6823

Sarbayev Dalelhan, PhD student Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: dalelhan20002@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-8014-6823

Сариев Отеген Рафхатович, техника ғылымдарының кандидаты, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының профессоры, Техникалық факультет, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, 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, K. Zhubanov Aktobe regional university, Technical Faculty, Aktobe, 030000, Republic Kazakhstan, e-mail: osariyev@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0745-848X

Сейдахмет Асқар Жүнісұлы, техника ғылымдарының кандидаты, Жетекші ғылыми қызметкер, доцент, академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: seydakhmet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1174-1547

Сейдахмет Асқар Жүнісұлы, кандидат технических наук, Ведущий научный сотрудник, доцент, Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: seydakhmet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1174-1547

Seidakhmet Askar Zhunisuly, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: seydakhmet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1174-1547

Сейітқазы Нұргүл Серікқызы, техника ғылымдарының магистрі, докторант, Машина жасау кафедрасы, Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., e-mail: seytkazy.nurgul@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7255-5692

Сейітқазы Нұргүл Серікқызы, магистр технических наук, докторант, кафедра Машиностроения Satbayev University, Республика Казахстана, Алматы к., e-mail: seytkazy.nurgul@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7255-5692

Seiitkazy Nurgul, Master of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Mechanical Engineering Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty, e-mail: seytkazy.nurgul@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7255-5692

Сембаев Нурболат Сәкенұлы, «Көлік техникасы және логистика» кафедрасының меңгерушісі, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Торайғыров университеті, Инженерия факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.sembaev@mail.ru, https//0000-0003-3032-1094

Сембаев Нурболат Сакенович, заведующий кафедрой «Транспортная техника и логистика», кандидат технических наук, ассоц. профессор, НАО «Торайгыров университет», Факультет инженерии, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: n.sembaev@mail.ru, https//0000-0003-3032-1094

Sembayev Nurbolat Sakenovich, Head of the Department of «Transport Equipment and Technologies», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, NAO «Toraigyrov University», Faculty of Engineering, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.sembaev@mail.ru, https//0000-0003-3032-1094

Смагулов Алтай Сакенович, докторант, Металлургия және машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Дизайнер, KazMinerals Bolshakol ЖШС, Екібастұз қ., 141200, Қарағанды қ., 100017, Қазақстан Республикасы, e-mail: smagulovaltay@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-1109-185X

Смагулов Алтай Сакенович, докторант, Факультет Металлургии и машиностроения, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова конструктор ТОО «KazMinerals Bolshakol», г. Экибастуз, 141200 г. Караганда, 100017, Республика Казахстан, e-mail: smagulovaltay@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-1109-185X

Smagulov Altay, Doctoral student, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100017, Republic of Kazakhstan, Designer of KazMinerals Bolshakol LLP, Ekibastuz, 141200, Republic of Kazakhstan e-mail: smagulovaltay@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-1109-185X

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, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Сулейменов Ансаган Дюсембаевич, PhD, ассоц.профессор, Факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Suleimenov Ansagan Dyusembaevich, PhD, Associate Professor, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: suleimenov.a@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-9319-0285

Сулейменов Тыныс Болекпаевич, техника ғылымдарының докторы, доцент, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 100001, Қазақстан Республикасы, e-mail: suleymenov_tb@enu.kz, https://orcid.org/0009-0003-1196-565X

Сулейменов Тыныс Болекпаевич, доктор технических наук, доцент, транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 100001, Республика Казахстан, e-mail: suleymenov_tb@enu.kz, https://orcid.org/0009-0003-1196-565X

Suleymenov Tynys Bolekpayevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Transport and energy, L. N. Gumilev Eurasian National University, Astana, 100001, Republic Of Kazakhstan, e-mail: suleymenov_tb@enu.kz, https://orcid.org/0009-0003-1196-565X

Суранчиев Мурат Турганжанович, техника ғылымдарының кандидаты, Инженерлік және ақпараттық технологиялар мектебі, META University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: m.suranchiev@meta.edu.kz, https://orcid.org/0009-0000-3675-059X

Суранчиев Мурат Турганжанович, кандидат технических наук, школа Инженерных и информационных технологий, META University, г. Алматы, Республика Казахстана, e-mail: m.suranchiev@meta.edu.kz, https://orcid.org/0009-0000-3675-059X

Suranchiev Murat, Candidate of Technical Sciences, school of Engineering and Information Technology, META University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.suranchiev@meta.edu.kz, https://orcid.org/0009-0000-3675-059X

Суюнбаев Шинполат Мансуралиевич, т.ғ.д., профессор, «Темір жолды пайдалану жұмысын басқару» кафедрасының профессоры, Ташкент мемлекеттік көлік университеті, Ташкент қ., 100167, Өзбекстан Республикасы, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Суюнбаев Шинполат Мансуралиевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой железной дороги», Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Suyunbaev Shinpolat, Doctor of technical sciences, Professor, professor of the department «Management of operational work of the railway», Tashkent State Transport University, 100167, Tashkent city, Republic of Uzbekistan, e-mail: shinbolat_84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4867-8270

Сүлейменова Гүлфариза Абатбекқызы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, М. Тынышбаев атындағы ALT университеті, г. Алматы, 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sma-1980@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7099-8441

Сулейменова Гулфариза 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

Gulfariza Abatbekkyzy, Suleimenova, 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

Тадеуш Лешневский, техника ғылымдарының докторы, профессор, Вроцлав ғылым және технологиялар университеті, Вроцлав қ., 50-370, Польша, e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-1903-3967

Тадеуш Лешневский, доктор технических наук, профессор, Вроцлавский университет науки и технологий, г. Вроцлав, 50-370, Польша, e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl, https://orcid.org/ 0000-0002-1903-3967

Tadeusz Leśniewski, doctor of technical sciences, professor, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, 50-370, Poland, e-mail: tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-1903-3967

Таженова Гульзада Даулетхановна, техника ғылымдарының кандидаты, «Механика» кафедрасының қауымдастырылған профессор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 010027, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.tazhenova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5512-2724

Таженова Гульзада Даулетхановна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Механика», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганды, 010027, Республика Казахстан, e-mail: g.tazhenova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5512-2724

Tazhenova Gulzada Dauletkhanovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mechanics Department, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karagandy, 010027, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.tazhenova@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5512-2724

Таскарина Айжан Жумажановна, PhD, қауымд.профессор, Машина жасау саласындағы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140012, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799, e-mail: aya_taskarina@mail.ru

Таскарина Айжан Жумажановна, PhD, ассоц.профессор в области машиностроения, Торайгыров университет, Факультет инженерии, г. Павлодар, 140012, Республика Казахстан, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799, e-mail: aya_taskarina@mail.ru

Taskarina Aizhan Zhumazhanovna, PhD, Associate Professor in the field of Mechanical Engineering, Toraighyrov University Faculty of Engineering, Pavlodar, 140012, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0003-2613-8799, e-mail: aya_taskarina@mail.ru

Таттимбек Гулерке, «Механика және металлөңдеу» мамандығы бойынша докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: tattimbekova91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8242-5800

Таттимбек Гулерке, докторант по специальности «Механика и метллообработка», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: tattimbekova91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8242-5800

Tattimbek Gulerke, Doctoral student in the specialty «Mechanics and metalworking», Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: tattimbekova91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8242-5800

Толоконникова Вера Владимировна, техника ғылымдарының кандидаты, Ілеспе элементтердің физикалық химиясы және технологиясы зертханасының жетекшісі, Ж. Әбішев атындағы ХМИ, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail:tolokon-splav@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7328-2921

Толоконникова Вера Владимировна, кандидат химических наук, Руководитель лаборатории физической химии и технологии сопутствующих элементов, ХМИ имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: tolokon-splav@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7328-2921

Tolokonnikova Vera Vladimirovna, Candidate of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of Physical Chemistry and Technology of Related Elements, KhMI Zh. Abisheva, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: tolokon-splav@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7328-2921

Толеубаев Ренат Асылбекұлы, Магистр, «Металлургия» кафедрасының докторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Тюлюбаев Ренат Асылбекович, магистр, докторант кафедры «Металлургия», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Tyulyubaev Renat Asylbekovich, Master, doctoral student of the Department of Metallurgy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: tyulyubaev.r@teachers.tou.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7951-1257

Тулеков Ауезхан Багдаулетович, «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» мамандығы бойынша докторант, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 100001, Қазақстан Республикасы, e-mail: auezkhan1337@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-3563-2035

Тулеков Ауезхан Багдаулетович, докторант по специальности «Транспорт, транспортная техника и технологии», Транспортно - энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 100001, Республика Казахстан, e-mail: auezkhan1337@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-3563-2035

Tulekov Auezkhan Bagdauletovich, Doctoral student in the specialty «Transport, transport engineering and technologies», Faculty of Transport and energy, L. N. Gumilev Eurasian National University, Astana, 100001, Republic of Kazakhstan, e-mail: auezkhan1337@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-3563-2035

Тулиева Нурсулу Болатбекқызы, «Механикалық инженерия» ББББ докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: D84227@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-6625-9545

Тулиева Нурсулу Болатбековна, докторант ОП «Механическая инженерия», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: D84227@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-6625-9545

Tulyieva Nursulu Bolatbekovna, PhD student of the EP «Mechanical Engineering», S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: D84227@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-6625-9545

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, 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

Тусупбекова Гулим Магауияновна, «Механикалық инженерия» ББББ докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulim.tus@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3373-9541

Тусупбекова Гулим Магауияновна, докторант ОП «Механическая инженерия», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: gulim.tus@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3373-9541

Tussupbekova Gulim Magauiyanovna, PhD student of the EP «Mechanical Engineering», S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulim.tus@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3373-9541

Тусупова Саягуль Оралқызы, PhD, қауым. проф.(доцент), Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: suleeva.s@inbox.ru

Тусупова Саягуль Ораловна, PhD, ассоц. проф (доцент), Торайгыров университет, г. Павлодар, Казахстан, e-mail: suleeva.s@inbox.ru

Tussupova Sayagul Oralovna, PhD, associate professor, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: suleeva.s@inbox.ru

Умбетбеков Асхат Талгатович, техника ғылымдарының кандидаты, Инженерлік және ақпараттық технологиялар мектебі, META University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: umbetbekov.a@meta.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7970-530X

Умбетбеков Асхат Талгатович, кандидат технических наук, школа Инженерных и информационных технологий, META University, г. Алматы, Республика Казахстана, e-mail: umbetbekov.a@meta.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7970-530X

Umbetbekov Askhat, Candidate of Technical Sciences, School of Engineering and Information Technologies, META University, Almaty, Republic of Kakhakhstan, e-mail: umbetbekov.a@meta.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-7970-530X

Усупов Сабий Сейтказиевич, профессор, техника ғылымдарының докторы, доцент, Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., 050012, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.ussupov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5772-9295

Усупов Сабий Сейтказиевич, профессор, доктор технических наук, доцент, Алматинский технологический университет, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан, e-mail: s.ussupov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5772-9295

Ussupov Sabiy Seytkazievich, Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Almaty Technological University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.ussupov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5772-9295

Хан Валерий Анатольевич, техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: v.khan@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-4198-2712

Хан Валерий Анатольевич, кандидат технических наук, ст.преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: v.khan@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-4198-2712

Khan Valery Anatolievich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: v.khan@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-4198-2712

Хусенов Уткир Уктамжон, PhD, доцент, «Темір жолды пайдалану жұмысын басқару» кафедрасының докторанты (DSc), Ташкент мемлекеттік көлік университеті, 100167, Ташкент қ., Өзбекстан Республикасы, e-mail: otkirxusenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7500-4741

Хусенов Уткир Уктамжон, PhD, доцент, докторант (DSc) кафедры «Управление эксплуатационной работой железной дороги», Ташкентский государственный транспортный университет, 100167, г. Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: otkirxusenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7500-4741

Khusenov Utkir, PhD, Associate Professor, Doctoral Student (DSc) of the department “Management of operational work of the railway”, Tashkent State Transport University, 100167, Tashkent city, Republic of Uzbekistan, e-mail: otkirxusenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7500-4741

Шабанов Ербол Жақсылықұлы, PhD, қауымд.профессор, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының профессоры, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ye.shabanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6902-1211

Шабанов Ербол Жақсылықұлы, PhD, ассоц. профессор, профессор кафедры «Металлургия и горное дело», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: ye.shabanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6902-1211

Shabanov Yerbol, PhD, Associate Professor, Professor of the Department of Metallurgy and Mining, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ye.shabanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6902-1211

Шадхин Юрий Исаевич, қауымд.профессор, Г. Ж. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0009-0009-2743-9092

Шадхин Юрий Исаевич, ассоц.профессор, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Ж. Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0009-0009-2743-9092

Shadkhin Yuri, Associate Professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. D. Daukeev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: lizavita@list.ru, https://orcid.org/0009-0009-2743-9092

Шеров Айбек Карибекұлы, PhD, «Машинажасау» мамандығы бойынша Техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sherov_ak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Шеров Айбек Карибекович, PhD по специальности «Машиностроение», Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: sherov_ak@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1433-957X

Sherov Aibek Karibekovich, PhD in Mechanical Engineering, Faculty of Technology, S.Seifullin Kazakh agrotechnical research university, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sherov_ak@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/0000-0001-8007-1690

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/0000-0001-8007-1690

Шукаманов Жанибек Ерикович, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасының аға оқытушысы, 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

Zhanibek Yerikovich, Shukamanov, 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

Шуленова Асем Манарбековна, «Тамақ және өңдеу өнеркәсібінің технологиясы» кафедрасының докторанты; С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана қ., Қазақстан; e-mail: shulenovaa@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0003-2812-075X

Шуленова Асем Манарбековна, докторант кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан; e-mail: shulenovaa@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0003-2812-075X

Shulenova Assem, Doctoral student of the Department «Technology of food and processing industries», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana, e-mail: shulenovaa@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0003-2812-075X

Яковлев Владимир Сергеевич, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, аға оқытушы, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., 070010, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Яковлев Владимир Сергеевич, ст.преподаватель, ВКТУ имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г.Усть-Каменогорск, 070010, 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, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 070010, e-mail: vel1051@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0002-7315-4719

Яцек Циеслик, профессор, Краковтағы AGH университеті, Краков қ., 30-059, Польша, e-mail: cieslik@agh.edu.pl, https://orcid.org/ 0000-0002-0203-5149

Яцек Циеслик, профессор Краковского университета AGH, Краков, 30-059, Польша, e-mail: cieslik@agh.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-0203-5149

Jacek Cieślik, professor at AGH University of Krakow, Krakow, 30-059, Poland, e-mail: cieslik@agh.edu.pl, https://orcid.org/ 0000-0002-0203-5149

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

***В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.**

***Количество соавторов одной статьи не более 5.**

***Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 %.**

***Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.**

***Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.**

***Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

***Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.**

*** Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз.**

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц печатного текста.** *Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).*

Структура научной статьи включает название, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение,

заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. *ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Фамилия, имя, отчество** (полностью) автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках *(жирным шрифтом, по центру)*;

4 **Ученая степень, ученое звание;**

5 **Аффилиация** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

6 **E-mail;**

7 **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность *(не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий)*;

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (*рекомендуемый объем аннотации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец)*;

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования *(оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.)*. Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке *(см. образец)*;

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- Введение / Кіріспе / Introduction *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** *(при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

- **Выводы / Қорытынды / Conclusion** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников / Пайдаланған деректер тізімі / References** *(жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре)* включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 *(см. образец)*.

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. Объем не менее 10 не более чем 20 наименований (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом*.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

11 **Иллюстрации, перечень рисунков** и подрисуночные надписи к ним представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

12 **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)
В электронном варианте приводятся полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются):

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

Информация для авторов

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления.

Периодичность издания журналов – четыре раза в год (ежеквартально)

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимостьпубликации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.

Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на почту: nitk.tou.edu.kz. Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,
НАО «Торайгыров университет»,
Издательство «Toraighyrov University», каб. 137.
Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).
E-mai1: **nitk.tou.edu.kz.**

Наши реквизиты:

НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	Приложение kaspi.kz Платежи – Образование –Оплата за ВУЗы – Заполняете все графы (в графе Факультет укажите «За публикацию в научном журнале, название журнала и серии»)
АО «Jýsan Bank» ИИК KZ57998FTB00 00003310 БИК TSESKZK A Кбе 16 Код 16 КНП 861	АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxxxx

С. К. Антикеева
Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомых компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.

2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХК ИППК ПК, 2001. – 152 с.

2 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.

4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университеті, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : suschnost, effectivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod 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 «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология» НАО «Торайгыров университет», Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

Публикационная этика научных журналов «Вестник Торайгыров университета», «Краеведение», «Наука и техника Казахстана»

Редакционная коллегия журналов «Вестник Торайгыров университет», «Краеведение» и «Наука и техника Казахстана» в своей работе придерживается международных стандартов по этике научных публикаций и учитывает информационные сайты ведущих международных журналов.

Редакционная коллегия журнала, а также лица, участвующие в издательском процессе в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (использование недостоверных сведений, изготовление данных, плагиат и др.), обеспечения общественного признания научных достижений обязаны соблюдать этические нормы и стандарты, принятые международным сообществом и предпринимать все разумные меры для предотвращения таких нарушений.

Редакционная коллегия ни в коем случае не поощряет неправомерное поведение (плагиат, манипуляция, фальсификация) и приложит все силы для предотвращения наступления подобных случаев. В случае, если редакционной коллегии станет известно о любых неправомерных действиях в отношении опубликованной статьи в журнале или в случае отрицательного результата экспертизы редколлегий статья отклоняется от публикации.

Редакционная коллегия не должна раскрывать информацию о принятых к опубликованию рукописей третьим лицам, не являющимся рецензентами, потенциальными рецензентами, членами редакционной коллегии, работниками типографии. Неопубликованные данные, полученные из рукописей, не должны использоваться в личных исследовательских целях без письменного разрешения автора.

Ответственность экспертов (рецензентов)

Рецензенты должны давать объективные суждения и указывать на соответствующие опубликованные работы, которые еще не цитируются. К рецензируемым статьям следует обращаться конфиденциально. Рецензенты будут выбраны таким образом, чтобы не было конфликта интересов в отношении исследования, авторов и / или спонсоров исследования.

Ответственность авторов

Ответственность за содержание работы несет автор. Авторы обязаны вносить исправления, пояснения, опровержения и извинения, если такие имеются.

Автор не должен представлять статью, идентичную ранее опубликованной в другом журнале.В частности, не принимаются переводы на английский либо немецкий язык статей, уже опубликованных на другом языке.

В случае обнаружения в рукописи статьи существенных ошибок автор должен сообщить об этом редактору раздела до момента подписи в печать оригинал-макета

номера журнала. В противном случае автор должен за свой счет исправить все критические замечания.

Направляя статью в журнал, автор осознаёт указанную степень персональной ответственности, что отражается в письменном обращении в редакционную коллегию Журнала.

Теруге 03.03.26 ж. жіберілді. Басуға 31.03.26 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
5,07 Mb RAM
Шартты баспа табағы 1,09 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4522

«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