ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ МЕН ТЕХНИКАСЫ

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ

TORAIGHYROV UNIVERSITY

НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 2 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агенства 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/HPYP5442

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);
Омарова Айгерим Рымболатовна – 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

Аукенова Б. Қ., Дудкин М. В., Молдаханов Б. А.,
Васильков Д. С., Старостина Ж. А.
Методика расчета бульдозерного отвала с разноуровневой
геометрией угла поворота боковых секций.....7
Байгереев С. Р, Сулейменов А. Д,
Гурьянов Г. А, Жаксалыков К. Н.
Разработка и экспериментальные исследования
новой конструкции измельчителя.....22
Басқанбаева Д. Ж., Елемесов Қ. К., Ерік Ә. Қ.
Сенімділік параметрлерін арттыру үшін сорғы паркінің
техникалық жай-күйінің мониторингі.....40
Бекмырза Ж. А., Курманов А. К., Камышева Н. А.
Совершенствование конструктивно-режимных параметров ленточного
транспортера для работы с сильно засоренными зерновыми культурами.....50
Берг А. С., Берг А. А.
Исследование прочности кран-балки с оптимизированной геометрией.....69
Бузауова Т. М., Сарсенгалиева Г. К.
Оценка качества плазменной резки.....82
Ергешев А. А., Ракишев А. К., Кузминова Н. Ю.
Аддитивті технологиямен алынған pla үлгілерінің беріктігін талдау.....94
Kassenov A. Zh., Taskarina A. Zh., Itybayeva G. T.,
Iskakova D. A., Yanushkin A. S.
Optimization of the process of processing holes with a tool assembly reamer.....105
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.....116
Мусина Ж. К., Луб Т. Л., Шумейко И. А.,
Деревягин С. И., Ткачук А. А.
Математическое моделирование процесса износа при ротационной
обработке инструментом с самовращающейся кромкой.....128
Мухитова А. Е., Нуржанова О. А., Жаркевич О. М., Černašėjus O.
Исследование износостойкости наплавочных материалов
для восстановления поверхностей валов электродвигателей.....143
Поветкин В. В., Татыбаев М. К., Абілқайыр Ж. Н.,
Дуйсенбекова О. О., Манкешева О. Т.
Машиналар мен материалдардың қызмет ету мерзімін
және тозуға төзімділігін арттырудың негізгі бағыттары.....154

Табылов А. У., Букаева А. З., Булекбаева Г. Ж.,
Суйеуова Н. Б., Рзаева К. С.
Тегіс бетке балқытылған қабатты домалату әдісімен серпімді емес деформациялаудың бір өлшемді мәселесін қою.....169
Тұрсынбаева А. Н., Исаметова М. Е., Дүйсенғали А. М., Ильясов Е. С.
Разработка технологического процесса 3D печати матрицы для гибки листового металла композитными гранулами.....182

МЕТАЛЛУРГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

Абілберікова А. А., Есенгалиев Д. А., Қуатбай Е. Қ.,
Келаманов Б. С., Бензесик К.
Моделирование восстановления латеритной никелевой руды месторождения «Батамша» газообразными восстановителями в программном комплексе «HSC Chemistry 10».....193
Арбуз А. С., Найзабеков А. Б., Попов Ф. Е., Лутченко Н. А.
Анализ устранения литейных дефектов циркониевых сплавов с использованием метода равноканального углового прессования.....209
Аринова С. К., Алтынова А. Е.
Исследование свойств огнеупорных материалов на основе отходов металлургического производства.....221
Kabylkanov., Makhambetov Ye., Abdulina S., Zhakan A., Yucel O.
Research of physico-chemical properties of charge materials for the production of chromium-manganese ligature.....233
Kassymova D. B., Sapinov R. V.,
Kulenova N. A., Adilkanova M. A.
Study of the material composition of gold-copper ores from Kazakhstani deposits.....248
Ким А. С., Акбердин А. А., Султангазиев Р. Б.,
Орлов А. С., Адамова Г. Х.
Совершенствование технологии окомкования медных концентратов.....259
Куликов В. Ю., Байбеков Ш. С., Ковалев П. В., Жолдубаева Ж. Д.
Вариативті статикалық қысымды қолдана отырып, құм-шайыр қалыбының механикалық және технологиялық қасиеттерін арттыру.....268
Сариев О. Р., Алмагамбетов М. С., Нургали Н. З.,
Жумагалиев Е. У., Әбдірашит А. М.
Физико-химические свойства пыли при дроблении феррохрома и её окускование.....284

КӨЛІК
ТРАНСПОРТ
TRANSPORT

Аймуханов Д. С., Кадыров А. С., Сембаев Н. С.,
Байгушкарова А. Б.,Лукаш Варгула
Применение «контрактных» автомобильных силовых агрегатов в качестве привода исполнительных механизмов транспортной техники.....297
Балтабекова А. Н., Абишев К. К., Муканов Р. Б.,
Бухнер Петр, Ғабдолла Ж. Ж.
Надежность работы водителя в обеспечении безопасности дорожного движения.....311
Zhandarbekova A. M., Mukhametzhanova A. V.,
Murzabekova K. A., Kulmurzina A. A.
On the competitiveness of the Trans-Caspian international transport corridor.....324
Касымжанова К. С., Шарипова А. М, Увалиева А. Б,
Оразов О. Ш, Саукенова И. Қ
Жүргізушінің жұмыс қабілеттілігі мен жолдағы қауіпсіздік шараларын зерттеу.....340
Саменов Г. К., Алипбаев Ж. Р., Каражанов А. А.,
Жаманбаев, Б. У. Болатова А. Б.
Терең карьерлерде карьерлік жүк көліктерінің оңтайлы жұмыс жағдайларын негіздеу.....350
Үстемірова Р. С.,Тұрдалиев А. Т., Карпов А. П.,
Майлыбаев Е. К., Камзанов Н. С.
Екінші сатыдағы пневматикалық ілулі экипаждың бір осьті құрылғысының тербелістерінің математикалық моделін есептеу.....363

ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ МҰНАЙ-ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ
ХИМИЧЕСКАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ
CHEMICAL AND OIL GAS ENGINEERING

Егимбаев Е. С., Масакбаева С. Р.,
Бакибаев А. А., Еремеев Д. Н.
Влияние химических реагентов на процесс очистки сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий.....377

ТАМАҚ ӨНІМДЕРІН ӨНДІРУ ПРОИЗВОДСТВО ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ
FOOD PRODUCTION

Satayeva Zh. I., Zhetimkarinov E. D.
Research of the antler of the reble deer (Cervus Elaphus) Xanthopygus.....386

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors.....398

Авторларға арналған ережелер
Правила для авторов
Rules for authors.....433

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics.....443

МАШИНОСТРОЕНИЕ

МРНТИ 55.01.77
DOI

***А. Ж. Абекова[1], Б. Д. Жунисбеков[2],
Ж. Т. Шәріпов[3], Б. У. Асанов[4], Н. С. Төлебаев[5]***

[1,5]Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекоова, Республика Казахстан, г. Алматы
[2,3,4]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0881-8707
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0067-2178
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7150-2227
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4363-0808
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6842-194X
*e-mail: Abekova310792@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОГО КРИВОШИПНОГО ПРЕССА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В данной статье представлена математическая модель адаптивного управления гибридного кривошипного пресса с обратной связью. Рассмотрена динамическая модель пресса, включающая механическую и электрическую составляющие, а также учтены изменения параметров системы в реальном времени. Предложен адаптивный закон управления, основанный на методах идентификации параметров и корректировки управляющего воздействия в зависимости от текущего состояния пресса. Приведены алгоритмы адаптации, использующие обратную связь для минимизации ошибки и обеспечения высокой точности работы пресса. Проведен анализ устойчивости системы и показаны преимущества предложенного подхода перед классическими методами управления.

Статье рассматриваются методы синтеза систем управления при решении задач слежения для многомерных стохастических моделей объектов, функционирующих в условиях неполной информации о состоянии объекта и его параметров. При этом проектирование систем управления осуществляется путем постепенного добавления и усложнения используемых методов и алгоритмов: от оптимального управления для детерминированных моделей, до адаптивных следящих систем для стохастических моделей при неполном измерении с ошибками. В связи со сложностью рассматриваемых задач единственным способом их решения является имитационное моделирование.

Результаты моделирования подтверждают эффективность разработанной системы управления при изменяющихся нагрузках и внешних воздействиях. Также рассмотрено влияние помех и непредсказуемых отклонений

в работе оборудования на точность управления. Предложенная система демонстрирует высокую устойчивость и способность адаптироваться к широкому спектру эксплуатационных условий.

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

Введение

В современной промышленности кривошипные прессы широко применяются для выполнения технологических операций штамповки, вырубки и формовки. Однако традиционные механические прессы обладают рядом ограничений, связанных с жесткостью механической передачи и невозможностью оперативной корректировки режимов работы в процессе эксплуатации[1]. Введение гибридных систем управления, сочетающих механические, электрические и программные компоненты, позволяет существенно повысить эффективность работы прессов за счет адаптации их параметров к изменяющимся условиям [1].

Одним из ключевых элементов гибридного пресса является система адаптивного управления с обратной связью, обеспечивающая коррекцию параметров в реальном времени. Разработка математической модели такой системы управления играет важную роль в повышении точности, надежности и энергосбережения оборудования.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения точности, надежности и энергоэффективности кривошипных прессов за счет внедрения адаптивных систем управления с обратной связью. Традиционные механические прессы имеют ограниченные возможности регулирования и адаптации к изменяющимся условиям, что снижает их производительность и ресурс [2]. Разработка математической модели гибридного управления позволит оптимизировать рабочие параметры пресса, снизить энергопотребление, увеличить срок службы оборудования и улучшить качество обработки, что актуально для современной промышленности [2].

Целью данной работы является построение математической модели адаптивного управления гибридного кривошипного пресса с обратной связью, учитывающей динамику механической системы, характеристики исполнительных механизмов и алгоритмы корректировки управляющих воздействий. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

– анализ существующих методов управления кривошипными прессами;

– разработка математической модели гибридного пресса с учетом обратной связи;

– исследование алгоритмов адаптивного управления и их влияние на динамические характеристики системы;

– оценка эффективности предложенного подхода на основе моделирования.

Материалы и методы

Анализ существующих методов управления кривошипными прессами. Кривошипные прессы широко применяются в промышленности для штамповки, ковки и обработки материалов. Их управление играет ключевую роль в обеспечении

точности, надежности и эффективности работы. Рассмотрим основные методы управления такими прессами:

Классическое релейное управление В традиционных системах кривошипные прессы управляются с помощью релейных схем, которые обеспечивают включение и выключение привода по заранее заданным условиям[3]. Этот метод прост в реализации, но не обладает достаточной гибкостью для адаптации к изменяющимся нагрузкам и условиям работы .

Программируемое логическое управление (ПЛК). Современные прессы часто оснащаются ПЛК, который позволяет задавать сложные алгоритмы управления, интегрировать датчики и обеспечивать точное слежение за состоянием пресса. Такой метод дает больше возможностей для автоматизации и диагностики неисправностей.[4]

Управление с обратной связью. В системах с обратной связью используются датчики для измерения параметров работы пресса (например, положения ползуна, усилия прессования, скорости движения)[4]. Контроллер анализирует эти данные и корректирует управляющие воздействия в режиме реального времени. Это значительно улучшает стабильность и повторяемость работы.

Применение адаптивного управления. Адаптивные системы управления позволяют изменять параметры регулятора в зависимости от изменения характеристик пресса, например, из-за нагрева, износа механизмов или изменения нагрузки. Использование ПДИ-контроллеров с адаптацией коэффициентов делает пресс более устойчивым к неопределённостям.

Применение интеллектуальных систем управления. В последнее время активно развивается применение нейронных сетей, машинного обучения и алгоритмов предсказательного управления (MPC). Эти методы позволяют анализировать большие объемы данных и находить оптимальные стратегии управления для различных условий эксплуатации.

Математическая модель адаптивного управления гибридного кривошипного пресса с обратной связью может включать несколько ключевых компонентов, отражающих динамику самого пресса, систему управления и процесс адаптации параметров управления. Важнейшим элементом модели является описание механической части пресса, включающее кинематические и динамические характеристики кривошипно-шатунного механизма, а также учет силовых и инерционных нагрузок. Система управления представляет собой совокупность алгоритмов регулирования, обеспечивающих коррекцию усилия и скорости в зависимости от технологических условий. Обратная связь играет ключевую роль в адаптации, анализируя параметры работы пресса в реальном времени и внося необходимые корректировки для повышения точности, надежности и эффективности работы оборудования.

Кинематические и динамические характеристики кривошипно-шатунного механизма определяют его движение и силовые воздействия в процессе работы пресса. Кинематические параметры включают зависимости перемещения, скорости и ускорения ползуна от угла поворота кривошипа, что важно для

анализа рабочего цикла пресса. Динамические характеристики описывают силы, действующие в механизме, включая инерционные нагрузки, моменты, возникающие в подвижных соединениях, а также влияние массы и упругих деформаций элементов конструкции. Учет этих факторов в математической модели позволяет повысить точность управления, минимизировать вибрации и перегрузки, а также оптимизировать энергозатраты при работе пресса.

На рисунке 1 представлена кинематическая схема исполнительного механизма гибридного кривошипного пресса (ГКП). В качестве основных параметров движения рассматриваются: φ – угол вращения кривошипа OA и Δ и – линейное перемещение кулисной пары D. Введены обозначения переменных координат: θ угловая координата звена AB; ψ- угловая координата звена BC; ϑ- угловая координата звена EB; S – перемещение рабочего ползуна, также постоянные параметры: $r, l_1, l_2, d, x_E = a, y_E = b$ – длина кривошипа, длины шатунов , координата шарнира соответственно.

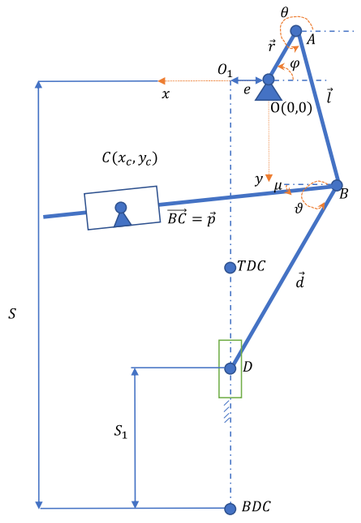


Рисунок 1 – кинематическа схема исполнительного механизма гибридного кривошипного пресса

Построение системы кинематических уравнений, описывающих движение узлов кривошипного пресса:

$$x = Rcos\theta + \sqrt{L^2 - R^2 sin^2\theta} \quad (1)$$

$$\vartheta = \frac{dx}{dt} = -Rsin\theta \cdot \dot{\theta} - \frac{R^2 \sin\theta\cos\theta \cdot \dot{\theta}}{\sqrt{L^2 - R^2 \sin^2\theta}} \quad (2)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

Таким образом установлены аналитические функций скоростей и ускорений звеньев, которые позволяют построит явный алгоритм кинематического анализа механизма. Эти зависимости используются для вывода уравнений динамики гибридного пресса.

Определение уравнения движения, основанного на законах Ньютона:

$$F = ma + B\vartheta + kx \quad (4)$$

где m – масса ползуна, $\underline{B}$ – коэффициент вязкого трения, k – жесткость системы.

Представлено решение, основанное на предложенном алгоритме (таблица 1)

Таблица 1 – Этапы алгоритма решения

№	Этап	Описание
1	Задание параметров механизма	Ввод исходных данных: длина кривошипа R, длина шатуна L, масса ползуна m, коэффициент сопротивления B, жёсткость возвратной пружины k.
2	Определение угловой скорости ω	Назначается или вычисляется значение угловой скорости вращения кривошипа.
3	Вычисление кинематических параметров	Для каждого момента времени t: - Координата ползуна x(t) -Скорость $\dot{x}(t)$ -Ускорение $\ddot{x}(t)$ на основе геометрических уравнений механизма.
4	Определение силы F(t)	Вычисляется сила, действующая на ползун, с учётом инерционных, упругих и сопротивляющихся сил: $F=m\ddot{x}+B\dot{x}+kx$
5	Численная реализация в MATLAB	Численное моделирование алгоритма в среде MATLAB для анализа точности, визуализации и верификации результатов.

На примере по заданному параметру:

R = 0.1; % длина кривошипа, м

L = 0.4; % длина шатуна, м

m = 5; % масса ползуна, кг

B = 0.1; % коэффициент вязкого трения

k = 1000; % жесткость системы, Н/м

$\boldsymbol{\omega}$ = 10; % угловая скорость кривошипа, рад/с получены результаты вычисление параметров визуальном виде (рисунке 2)

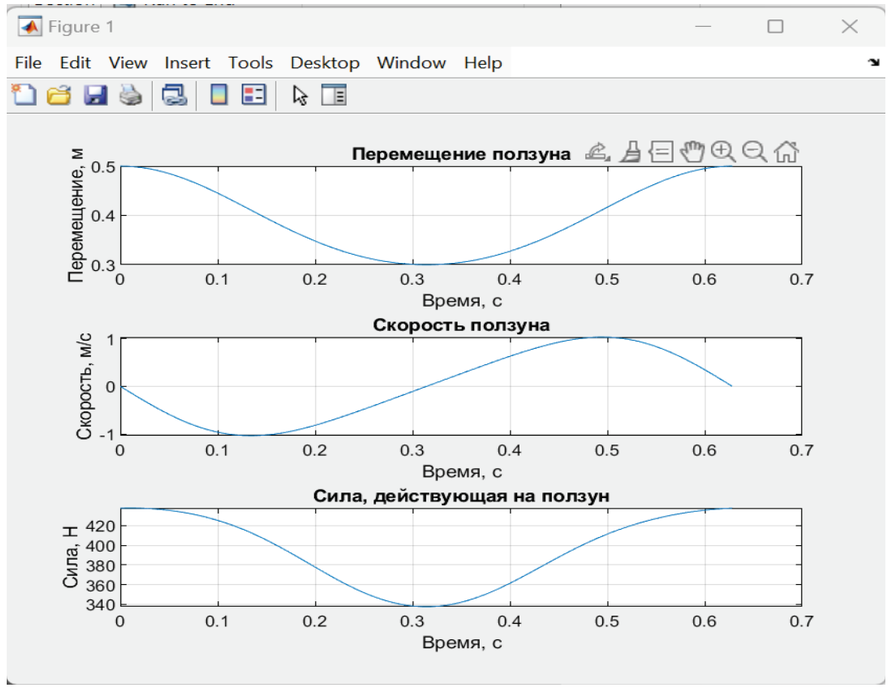


Рисунок 2 – Движение ползуна кривошипно-шатунного механизма

Эти результаты показывают движение ползуна кривошипно-шатунного механизма и вычисляет действующую на него силу.

Модель динамики гибридного пресса учитывает как статические, так и динамические аспекты работы устройства, что позволяет глубже понять поведение системы и оптимизировать её характеристики для повышения производительности и точности работы пресса. Гибридный кривошипный пресс сочетает механические и электрические компоненты, такие как двигатели, трансмиссии, редукторы и другие. Для описания динамики можно использовать дифференциальные уравнения второго порядка, которые моделируют движение кривошипа:

$$M(\theta)\dot{\theta}+C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta}+G(\theta)=T(t) \quad (4)$$

где:

$M(\theta)$ – момент инерции, зависящий от угла поворота;

$C(\theta,\dot{\theta})$ корригирующий момент, зависящий от угла и угловой скорости;

$G(\theta)$ сила сопротивления(например, сила тяжести);

T(t) – приложенный момент от двигателя;

θ – угол поворота кривошипа

Система управления может быть представлена как контроллер с обратной связью, использующий данные о текущем положении и скорости для вычисления управляющего сигнала. Например, классический пропорционально-дифференциально-интегральный (ПДИ) контроллер может быть использован:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + K_i \int e(t)dt \quad (5)$$

где:

$e(t)=\theta_{ref} - \theta(t)$ – ошибка положения;

K_p, K_d, K_i – коэффициенты пропорциональной, дифференциальной и интегральной частей контроллера.

Адаптивная система управления необходима для корректировки параметров контроллера в зависимости от изменений в динамике системы, таких как изменения нагрузки или износ компонентов[5-6]. Для этого часто используется метод адаптации параметров в реальном времени, например, на основе метода наименьших квадратов (НМК) или алгоритма LMS (Least Mean Squares). Математически это можно выразить как:

$$\dot{\theta}_i = \propto_i e(t) \quad (6)$$

где θ_i – адаптируемые параметры контроллера, $\propto_i$ – скорость адаптации.

Обратная связь используется для корректировки действий контроллера в зависимости от ошибки и её производной. Это позволяет системе поддерживать стабильность и минимизировать отклонения от заданной траектории. С учетом параметров адаптивного управления обратная связь становится более гибкой и точной, чем в классических системах управления.

Таким образом, полная модель может включать систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику пресса, систему управления с PID контроллером, а также механизм адаптации параметров управления в ответ на изменения внешних условий. В классических системах с обратной связью контроллер вычисляет ошибку e(t) как разницу между заданным значением и текущим состоянием:

$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t) \quad (7)$$

где:

Y_{ref} желаемое значение (или траектория);

y(t) – текущее значение состояния системы.

В адаптивных системах с обратной связью контроллер использует информацию об ошибке и её производной, а также адаптирует параметры управляющего воздействия для обеспечения устойчивости и оптимальности. Например, для ПИ контроллера, который регулирует систему на основе ошибки и её интеграла, его параметры могут адаптироваться следующим образом:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt \quad (8)$$

где:

K_p, K_i – параметры пропорциональной и интегральной частей контроллера, которые могут изменяться в зависимости от текущих условий работы системы.

Пример применения адаптивного управления с обратной связью: Рассмотрим задачу управления роботом с изменяющейся нагрузкой. Если известна исходная модель робота, но в процессе работы его динамика меняется (например, меняется масса груза), адаптивный контроллер с обратной связью будет корректировать параметры управления, чтобы компенсировать эти изменения и поддерживать желаемую траекторию.

В этом случае контроллер будет использовать ошибки, такие как разница между текущим положением и целевым, а также скорости и ускорения, чтобы определить требуемое управляющее воздействие, в то время как параметры контроллера адаптируются для компенсации изменений динамики.

Для симуляции динамики системы с учётом внешних воздействий и использования адаптивного ПИ-контроллера, заданы следующие параметры модели и контроллера:

Исходная масса m=5кг, коэффициент трения b=2, жёсткость пружины k=50 Н/м. Шаг дискретизации Ts=0.01 с., время моделирования T_{end}=10 с.

Параметры адаптивного ПИ-контроллера пропорциональный коэффициент Kp=10, интегральный коэффициент Ki=5 то есть коэффициент интегральной части ПИ-контроллера, который учитывает накопленную ошибку во времени для повышения точности управления.

Начальные условия системы положение равно x=0, начальная скорость объекта, равная нулю v=0. Заданное положение xref=1, к которому система должна стремиться. Начальное значение интеграла ошибки для ПИ-контроллера, отражающее суммарную ошибку за все предыдущие шаги integral_error=0. Параметр, определяющий скорость адаптации коэффициентов ПИ-контроллера в процессе моделирования, что позволяет изменять параметры управления в зависимости от динамики системы. α=0.1

Получены результаты вычисление параметров визуальном виде: (рисунке 3)

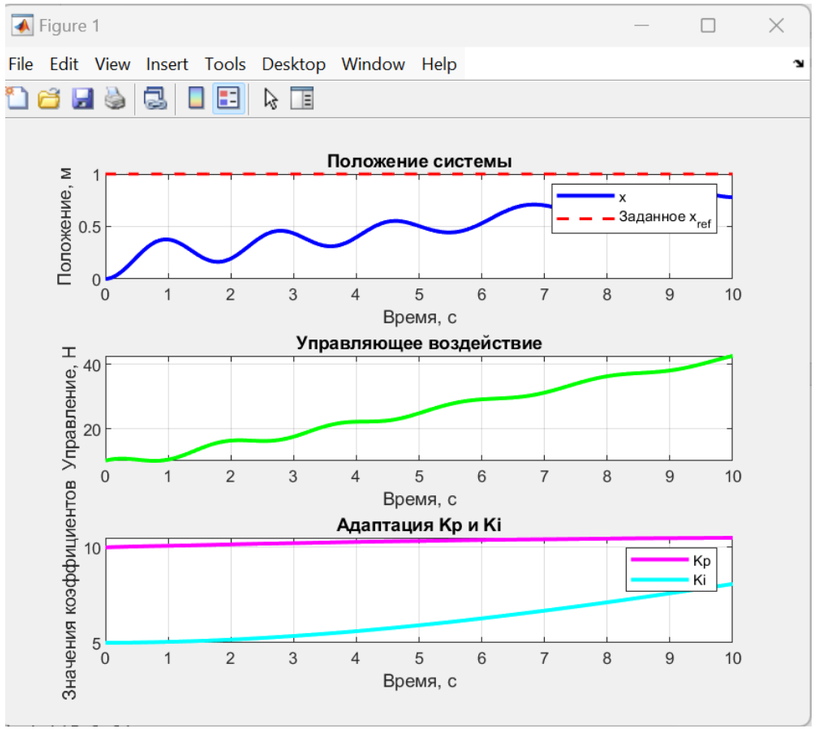


Рисунок 3 – Положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации

Результаты и обсуждение

Эти результаты показывают положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации и вычисляет действующую на него силу.

Объединенный модель систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику пресса, систему управления с ПИД контроллером.

Объединенный модель включает систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику пресса, систему управления с ПИД контроллером, а также механизм адаптации параметров управления в ответ на изменения внешних условий.

Получены результаты вычисление параметров визуальном виде (рисунок 4)

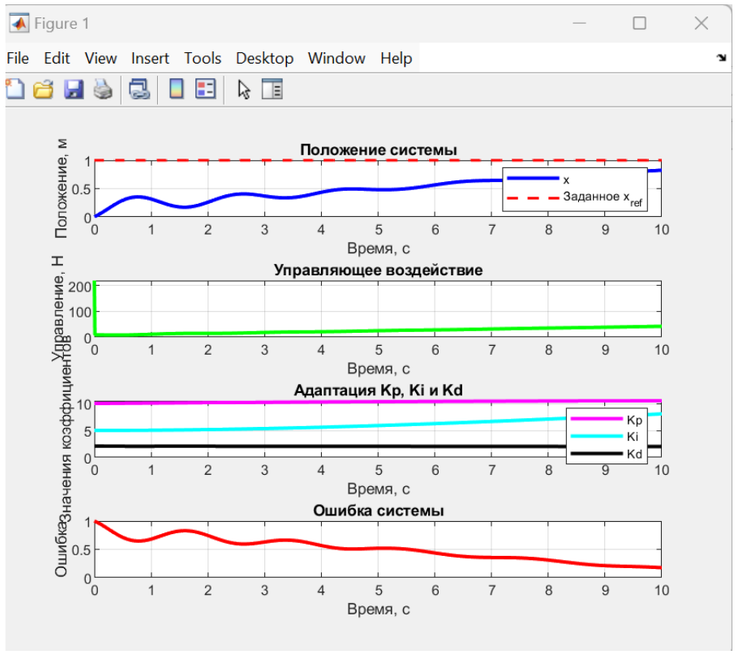


Рисунок 4 – Положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации и ошибка системы

Эти результаты показывают положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации, ошибка системы и вычисляет действующую на него силух [7-8].

Выводы

Разработка математической модели адаптивного управления гибридного кривошипного пресса с обратной связью является важной задачей для повышения эффективности и устойчивости работы такого оборудования. В данной модели учитываются динамика системы, принципы адаптивного управления и влияние внешних факторов, что позволяет обеспечивать высокую точность и стабильность процесса. Использование ПИД-контроллера в сочетании с механизмами адаптации параметров управления позволяет компенсировать изменения нагрузки, износ компонентов и другие внешние возмущения, что делает пресс более надежным и производительным [8,9,10]. Представленный подход может быть использован для оптимизации работы прессового оборудования и повышения его энергоэффективности, а также может быть адаптирован для управления другими сложными мехатронными системами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Murata C., Endou J., Futamura S.** Development of direct drive digital servo press [Steel Grips-Journal and related materials] [Text] // Supplement 10 th Metal Forming. – 2004. – P. 371–374.

2 **Murata C., Machira T., Futamura S., Endou J.** Intelligent control system for direct drive digital servo press [Text] // Proceeding of the 5th International Conference on «Intelligent Proceeding and Manufacturing of Materials»// – IPMM. – № 05. – 2005.

3 **Hasegawa K., Endou J., Inada A., Kawachi N.** Effect of control of press with eccentric force [Text] // Steel Research International. Special Edition: 13th Metal Forming. – 2010. – Vol.81-9. – P. 690–693.

4 **Kütük M., Halicioglu R., Dülger L. C.** Kinematics and Simulation of a Hybrid Mechanism [Text] // MATLAB/SimMechanics «Journal of Physics»: Conference Series. – 01.2016. – Vol 574. – P. 215.

5 **Ichikawa K., Murata C., Takahashi T.** Nonsimultaneouse press forming using 4-axes direct drive digital servo press [Text] // [Procedia Engineering]. Proceedings of the 11th International Conference on Technology of Plasticity. – 2014.

6 **Hollerbach J. M.** Dynamic Scalling of Manipulator Trajectories [Text] // Trans ASME, J. Dyn. Systems, Measurement and Control. –1984. – P. 102–106.

7 **Rooney R. H., Shapiro E. Y.** The use modal control to minimize errors in the analytical reconstruction of flight control sensor signals [Text] // Proc. IEEE Nat, Aerospace and Electron. Conf. NAECON 1982. Dayton, Ohio, 1982. New York. – 1982. – № 4.

8 **Luh J. Y. S., Walker M.W., Paul R. P.** On Line – Computational Scheme for Mechanical Manipulators [Text] // Trans. ASME, J. Dyn. Systems, Measurement and Control. – 1980. – Vol. 120. – P. 69–76.

9 **Lee C. S. G., Lee B. H., Nigam R.** Development of the Generalized d'Alembert Equations of Motion for Mechanical Manipulators [Text] // Proc.2nd Conf. Decision and Control, San Antonio, Tex. – 1983. – P. 1205–1210.

10 **Walker M. W., Orin D. E.** Efficient Dynamic Computer Simulation of [Text] // Mechanisms Trans. ASME, J. Systems, Measurement and Control. – 1982. – Vol. 104. – P. 205–211.

REFERENCES

1 **Murata C., Endou J., Futamura S.** Development of direct drive digital servo press [Steel Grips-Journal and related materials] [Text] // Supplement 10 th Metal Forming. – 2004. – P. 371–374.

2 **Murata C., Machira T., Futamura S., Endou J.** Intelligent control system for direct drive digital servo press [Text] // Proceeding of the 5th International Conference on «Intelligent Proceeding and Manufacturing of Materials»// – IPMM. – № 05. – 2005.

3 **Hasegawa K., Endou J., Inada A., Kawachi N.** Effect of control of press with eccentric force [Text] // Steel Research International. Special Edition: 13th Metal Forming. – 2010. – Vol.81-9. – P. 690–693.

4 **Kütük M., Halicioglu R., Dülger L. C.** Kinematics and Simulation of a Hybrid Mechanism [Text] // MATLAB/SimMechanics «Journal of Physics»: Conference Series. – 01.2016. – Vol 574. – P. 215.

5 **Ichikawa K., Murata C., Takahashi T.** Nonsimultaneouse press forming using 4-axes direct drive digital servo press [Text] // [Procedia Engineering]. Proceedings of the 11th International Conference on Technology of Plasticity. – 2014.

6 **Hollerbach J. M.** Dynamic Scalling of Manipulator Trajectories [Text] // Trans ASME, J. Dyn. Systems, Measurement and Control. –1984. – P. 102–106.

7 **Rooney R. H., Shapiro E. Y.** The use modal control to minimize errors in the analytical reconstruction of flight control sensor signals [Text] // Proc. IEEE Nat, Aerospace and Electron. Conf. NAECON 1982. Dayton, Ohio, 1982. New York. – 1982. – № 4.

8 **Luh J. Y. S., Walker M.W., Paul R. P.** On Line – Computational Scheme for Mechanical Manipulators [Text] // Trans. ASME, J. Dyn. Systems, Measurement and Control. – 1980. – Vol. 120. – P. 69–76.

9 **Lee C. S. G., Lee B. H., Nigam R.** Development of the Generalized d'Alembert Equations of Motion for Mechanical Manipulators [Text] // Proc.2nd Conf. Decision and Control, San Antonio, Tex. – 1983. – P. 1205–1210.

10 **Walker M. W., Orin D. E.** Efficient Dynamic Computer Simulation of [Text] // Mechanisms Trans. ASME, J. Systems, Measurement and Control. – 1982. – Vol. 104. – P. 205–211.

***А. Ж. Абекова[1], Б. Д. Жунисбеков[2],**
Ж. Т. Шәріпов[3], Б. У. Асанов[4], Н. Толебаев[5]
[1,5]У. А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[2,3,4]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

ГИБРИДТТІ ҚОСИІНДІ БАСПАҚТЫҢ КЕРІ БАЙЛАНЫСЫ БАР АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл жұмыс кері байланысы бар гибридті қосиінді престі адаптивті басқарудың математикалық моделін ұсынады. Пресстің динамикалық моделі, оның ішінде механикалық және электрлік құрамдас бөліктер қарастырылып, нақты уақыттағы жүйе параметрлерінің өзгерістері есепке алынады. Баспаның ағымдағы жағдайына байланысты параметрлерді анықтау және бақылау әрекетін реттеу әдістеріне негізделген адаптивті бақылау заңы ұсынылады. Қателерді азайту және пресс жұмысының жоғары дәлдігін қамтамасыз ету үшін кері байланысты пайдаланатын бейімдеу алгоритмдері ұсынылған. Жүйе тұрақтылығына талдау жүргізіліп, ұсынылған тәсілдің классикалық басқару әдістеріне қарағанда артықшылықтары көрсетілген.

Мақалада объект жағдайы мен оның параметрлері туралы толық емес ақпарат жағдайында жұмыс істейтін объектілердің көп өлшемді стохастикалық үлгілерін бақылау есептерін шешу кезінде басқару жүйелерін синтездеу әдістері қарастырылады.

Бұл жағдайда басқару жүйелерін жобалау қолданылатын әдістер мен алгоритмдерді бірте-бірте қосу және қиындату арқылы жүзеге асырылады: детерминирленген модельдер үшін оңтайлы басқарудан қателері бар толық емес өлшеуі бар стохастикалық модельдер үшін адаптивті бақылау жүйелеріне дейін. Қарастырылып отырған мәселелердің күрделілігіне байланысты оларды шешудің бірден-бір жолы имитациялық модельдеу болып табылады.

Модельдеу нәтижелері өзгермелі жүктемелер мен сыртқы әсерлер кезінде әзірленген басқару жүйесінің тиімділігін растайды. Жабдық жұмысындағы кедергілер мен болжанбайтын ауытқулардың басқару дәлдігіне әсері де қарастырылады. Ұсынылған жүйе жоғары тұрақтылықты және жұмыс жағдайларының кең ауқымына бейімделу мүмкіндігін көрсетеді.

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

A. Zh. Abekova[1], B. D. Zhunisbekov[2],
Zh. T. Sharipov[3], B. U. Asanov[4], N. Tolebayev[5]
[1,5]Institute of mechanics and engineering named after academician U. A. Dzholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty.
[2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty c.

MATHEMATISCHES MODELL DER ADAPTIVEN STEUERUNG EINER HYBRID-KURBELPRESSE MIT RÜCKKOPPLUNG

This paper presents a mathematical model of adaptive feedback control of a hybrid crank press. The dynamic model of the press, including mechanical and electrical components, is considered, and the changes in the system parameters in real time are taken into account. An adaptive control law based on the methods of parameter identification and adjustment of the control action depending on the current state of the press is proposed. Adaptation algorithms using feedback to minimise the error and ensure high accuracy of the press are given. The stability of the system is analysed and the advantages of the proposed approach over classical control methods are shown.

The article considers methods of synthesis of control systems when solving tracking problems for multidimensional stochastic models of objects functioning under conditions of incomplete information about the state of the object and its parameters. In this case, the design of control systems is carried out by gradual addition and complication of the methods and algorithms used: from optimal control for deterministic models, to adaptive tracking systems for stochastic models under incomplete measurement with errors. Due to the complexity of the considered problems, the only way to solve them is simulation modelling.

Modelling results confirm the effectiveness of the developed control system under varying loads and external influences. The influence of disturbances and unpredictable deviations in equipment operation on control accuracy is also considered. The proposed system demonstrates high stability and ability to adapt to a wide range of operating conditions.

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

FTAMP 55.39.31
DOI

Д. Р. Абсолямова[1], А. Ж. Касенов[2], Г. Т. Итыбаева[3],
М. Ж. Тусупбекова[4], К. Н. Жаксалыков[5]
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1591-2822
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9552-1439
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6385-8627
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4976-7061
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1659-6051
*e-mail: absolyamova.d@mail.ru

АРАЛАСТЫРҒЫШ ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН НЕГІЗДЕУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ

Бұл мақалада қатты ұнтақ тәрізді белсенді заттың сулы ортада біркелкі таралуына арналған үш қалақшалы араластырғыш негізінде араластырғыш құрылғының параметрлерін есептеу және негіздеу келтірілген. Оңтайлы параметрлерді таңдау үшін диаметрі 1000 мм және биіктігі 1270 мм болатын аппарат үшін РД 26-01-90-85 сәйкес араластырғыштың геометриясын есептеу жүргізілді, бұл араластырғыш құрылғының 1 м³ сыйымдылығына сәйкес келеді.

Араластырғыштың диаметрі $d_м$=700 мм, араластырғыш қалақшаларының ені h=140 мм, ал втулка диаметрі $d_{вт}$=120 мм болды. Араластырғыш қалақшаларының көлбеу бұрышы 45 градус. Есептеу деректері қатты күйдегі модельді КОМПАС бағдарламасында құру үшін пайдаланды. Жетекқуаты 3,2 кВт және айналу жиілігі 75 айн/мин. Араластырғыш моделі сұйықтық ағындарының сипатына негізделген араластырғыш моделінің өнімділік сипаттамаларын визуализациялау, талдау және анықтау үшін соңғы элементтер (СЭ) әдісі бойынша жұмыс атқаратын Ansys Student (CDF) бағдарламасына жүктелген. Соңғы элементтер көмегімен ұсынылған модельдеу әдісі араластырудың тиімділігін, ағынның жылдамдығын және араластырғыш құрылғының көлеміндегі турбуленттік деңгейін бағалауға мүмкіндік берді. Әрі қарай 3,2-ден 15 кВт дейін әртүрлі қуаттылықтағы сұйықтық ағындарындағы қатты бөлшектердің әрекетін және айналу жылдамдығы 95-тен 750 айн/мин дейін ағындардағы бөлшектердің әрекетін зерттеу жоспарлануда.

Кілтті сөздер: араластырғыш құрылғы, аппарат, араластырғыш, суспензия, қалақша.

Кіріспе

Араластырғыш құрылғылары бар аппараттар химия, мұнай-химия, металлургия, тамақ, фармацевтика және басқа да байланысты салаларда кеңінен қолданылады, өйткені олар аппараттардың барлық көлемінде жоғары біркелкілікті қамтамасыз етеді. Алынған заттардың әсер ету тиімділігі суспензияның

біркелкілігіне байланысты. Процестің техника-экономикалық көрсеткіштері араластырғыш аппараттардың жұмыс органын қаншалықты тиімді пайдалануға байланысты

Процестің техника-экономикалық көрсеткіштері араластырғыш аппараттардың жұмыс органын қозғалысқа келтіретін энергияның қаншалықты тиімді пайдаланылуына байланысты. Араластыру әртүрлі типтегі араластырғыштармен жүзеге асырылуы мүмкін. Араластырғыш құрылғының конструкциясын таңдау көбінесе технологиялық процест қол жеткізуге болатын мақсаттарға байланысты: сұйық көлемде бөлшектердің тұнбаға түсуіне жол бермеу, біртекті суспензия алу. Араластыру үшін әдетте қалақша араластырғышы қолданылады, әр түрлі қалақша саны бар, олар аралыстырғыштың диаметріне тең қашықтықта түбінен орналасады [1, 461–472 бб.; 2, 33–34 бб.]. Қалақшалары көлбеу орналасқан үш қалақшалы араластырғыштар негізгі құрылымдар болып табылады. Параметрлерді талдауды зерттеу екі бөлікті қосатын сызықтан пайда болған бұрыш аралыстыру өнімділігі мен қуат тұтынуына әсер ететін ең маңызды параметр екенін көрсетеді. Негізгі конструкциясымен салыстырғанда, эксперименттік нәтижелері жақсартылған конструкциялар энергияны тұтынуды сәйкесінше 10 % және 35 % төмендете алатынын көрсетеді. Бұл жағдайда жоғарғы қуатты араластырғыштар араластыру уақытын 20–30 % қысқартады [3, 709 б.]. Араластырғыштардың параметрлерін есептеу дәстүрлі түрде мамандырылған әдебиеттердің көмегімен жүзеге асырылады. Алайда мұндай тәсіл араластырғыш жабдыққа қойылатын заманауи талаптары қанағаттандыра алмайды. Кәзіргі қажеттілікті қанағаттандыру үшін әртүрлі тәсілдер қолданылады. Заманауи қажеттіліктерді қанағаттандыру үшін әртүрлі тәсілдер қолданылады. Араластырғыш құрылғылары бар аппараттардың технологиялық және энергетикалық тиімділігін арттыруға арналған қалақша түрінің аппараттың төменгі қабатындағы суспензия бөлшектерінің тұндырылуына әсерін зерттейтін жұмыс қарастырылды. 11 түрлі қалақшалар сынақтан өтті – су асты қататтары бар, 24º, 35º және 45º көлбеу қалақшалары бар жұмыс дөңгелектері және CVS 69 1043 стандартына сәйкес жасалыңған жұмыс дөңгелектері (https://www.vakspol.cz/ (accessed on 23 April 2025). Сыналған қалақшалардың тиімділігі суспензия бөлшектерінің түбіне түсуіне жол бермеу үшін қажетті қуатты тұтыну арқылы салыстырылды. Гидроқанаттары бар жұмыс дөңгелектері ең тиімді болып табылады және CVS 69 1043 стандартына сәйкес жасалған дөңгелектер ең қарапайым геометрияға ие болады. Қуатты тұтыну араластырғыш қалақтарының санына байланысты емес. Қалақшаның көлбеу бұрышы төменгі қабаттаға салыстырмалы түрде ұсақ бөлшектерді араластыру тиімділігіне минималды әсер етеді [4, 1149–1150 бб.]. Төрт түрлі көлбеу қалақшалы араластырғыштардың әсеоін зерттеу үшін келесі жұмыста (15º, 30º, 45º және 60º) аралыстырғыш резервуарындағы араластыру сапасы үшін қатты-сұйық есептеу гидродинамикасы әдісі (CFD) қолданылады. Ағынның әрекеті Эйлер-Лагранждың екі фазалы тәсілімен модельденген. Стандартты ауытқу критерийіне сүйене отырып , 30º көлбеу бұрышы бар араластырғыштағы қатты фазаның

осьтік таралуы басқаларға қарағанда шамамен 55 % жақсы екендігі атап өтілді. Сонымен қатар, нәтижелер 30º көлбеу қалақшалардың басқа қалақшалармен салыстырғанда біркелкі ридиалды таралуын және ыдыстағы қатты фазаның максималды таралуын көрсетті. Араластырғыштардың қуат тұтынуын зерттеу 30º көлбеу қалақшалардың басқа көлбеу қалақша араластырғыштар арасында ең жоғарғы қуат тұтынуына ие екенін көрсетті. Сонымен қатар, 30º қалақшалы араластырғыш осы күйде ең жақсы араластыру сапасына ие [5, 2735 б.]. Ағынның бұзылуының пайда болу проблемаласы және нәтижесінде араластыру энергиясын тиімсіз пайдалану нәтижесінде қалақшалар арасында, сондай-ақ қалақшалар мен бөлімдер мен резервуар қабырғасы арасында екі араластырғышы бар келесі жұмыта шешілді. Соболь әдісін (Монте-Карлоның сандық әдістері) қолдана отырып, прототиппен салыстырғанда энергия шығынын 15,6 % төмендететін шамамен модель жасалды. Оңтайландыруға дейін және одан кейін араластырғыш ыдыста жүргізілген сынақтар алынған оңтайландыру нәтижелерінің сенімділігін растады [6, 47635 б.]. Араластырғыштарды пайдалану кезінде араластырғышты толтыру және босату кезінде жетек жүктемесінің ескерту қажет. Пропеллер қалақшалары үшін бакты босату кезінде араластыру қуатының өзгеруңн зерттеуде энергияны тұтынудың жоғарылауы және типті жетектің сыну мүмкіндігі анықталды. Кең қалақшалы бұрандалы жұмыс дөңгелектер үшін араластыру қуаты толық резервуардың араластырукуатынан үш есе жоғары болуы мүмкін. Резервуарларды босату кезінде араластыру қуатын арттыру құбылысы тек осьтік әсер ететін қалақшалар жағдайында болады. Ортақ білікке орналастырылған және сұйықтықты араластырғыштың түбіне айдайтын екі жұмыс дөнгелегі үшін араластыру қуатының лезде артуы есептік қуатқа қатысты типті 50 % астам болуы мүмкін. Бұл қозғалтқыштың бұзылуына әкелуі мүмкін. Доңғалақтың айналу жиілігі неғұрлым аз болса (яғни, Фруд саны неғұрлым аз болса), резервуарды босату кезінде араластыру қуатының салыстырмалы өсуі соғұрлым көп болады. Араластыру қуатын арттыру коэффициентінің жұмыс дөңгелегінің түріне емес, араластырғыштағы қайталама айналым мөлшеріне тәуелділігі бағытында қосымша зерттеулер жүргізу қажет. Сондай-ақ тиісті сандық моделдеуді жүргізген жөн [7, 341 б.; 8, 1796–1797 бб.].

Жобалау процесінде сипаттамаларды болжау үшін араластырғыштың оңтайлы параметрлерін есептеу үшін ньютондық емес сұйықтық ағынын араластыру үшін пропеллер араластырғышты есептеу әдісі де қолданылады. Бұрандалы араластырғыштың толық сипаттамаларын анықтау үшін кері жұмыс алгоритмі енгізілді. Ұсынылған процедура жобалаудың жаңа әдісіне – кері есептеуге негізделген. Дегенмен, бұл процедураның функционалдығын әртүрлі қасиеттері бар әртүрлі сұйықтықтар үшін дәлелдеуге болады [9, 422 б.]. Сондай-ақ, араластырғыштарды есептеу және оңтайландыру үшін ішкі ағын өрісін модельдеу қолданылады. Нәтижелерге әртүрлі параметрлердің әсерін анықтау үшін араластырғыштағы кейбір құрылымдық параметрлерді бір факторлы сандық модельдеу және талдау жүргізілді. Латын гиперкубының үлгісі жұмыс дөңгелегінің биіктігі мен қалақша бұрышы үшін 100 сандық кестесінің жиынтығын жобалау

үшін пайдаланады. Нәтижелер оңтайландырылды. Осыдан кейін араластырудың біркелкілігі 10 % жақсарды және жұмыс дөңгелегінің қуаты 8,30 % төмендеді [10, 1808 б.].

Осылайша, араластырғыштардың параметрлерін және араластыру процессін әзірлеу, оңтайландыру саласындағы ғылыми әдебиеттерді талдауға сәйкес негізгі ережелерді бөліп көрсетіге болады:

– көлбеу қалақшалары бар үш қалақшалы араластырғыштар негізгі конструкциялар болып табылады;

– қалақшалардың көлбеуі сұықтықтағы бөлшектердің біркелкі таралуына және энергия тұтынуға әсер етеді;

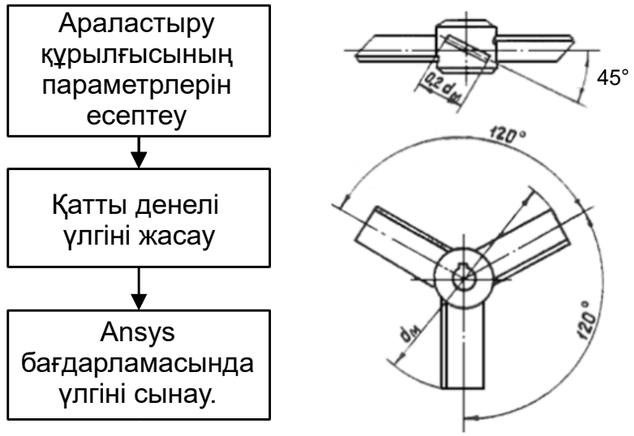
– математикалық және компьютерлік модельдерді қолдана отырып жүргізілген зерттеулер араластырғыштың конструкциясын жасау уақыты мен шығындарын едәуір қысқартады;

– қалақшалардың көлбеуіне және басқа геометриялық сипаттамаларға қатысты біртұтас пікір жоқ.

Бұл зерттеудің мақсаты үш қалақшалы араластырғышы бар аппараттың оңтайлы консрукциясын жасау болып табылады. Құрылғы сұйықтыққа біркелкі бөлінген белсенді материалдың қатты қосылыстарының біркелкі берілуін қамтамасыз ету керек. Бірінші кезеңде мамандырылған әдебиеттерде көрсетілген дәстүрлі әдістерді қолдана отырып негізгі геометриялық параметрлерді есептеу жүргізілді. Деректер қатты күйдегі модельді жасау үшін пайдаланылады. Араластырғыш моделі араластырғыш моделінің жұмыс сипаттамаларын анықтау үшін соңғы элементтер әдісімен жұмыс істейтін арнайы бағдарламаға жүктелді.

Материалдар мен әдістер

Барлық эксперименттер Торайғыров университеттің негізінде жүргізілді (https://tou.edu.kz/ru/). Эксперимент схемасы 1-суретте (а) көрсетілген. Зерттеу объектісі ретінде ішкі диаметрі d бар втулкадан тұратын оның сыртқы диаметрі $d_{вт}$ бойынша араластырғыштың айналу жазықтығына 45º бұрышта үш жазық қалақшалар дәнекерленген үш қалақшалы араластырғыш болып табылады. Қалақшалардың көлбеу бұрышы 45º. Араластырғыштың диаметрі $d_м$=0,7D, мұндағы D – аппараттың ішкі диаметрі. Араластырғыш қалақшаларының ені 0,2$d_м$ тең деп таңдалады (1-сурет, б).



1-сурет – Эксперимент жүргізу схемасы (а),
үш қалақшалы араластырғыштың параметрлері (б)

1÷3 м/сек диапазонында араласатын ортаның тұтқырлығына байланысты араластырғыш қалақшаның соңындағы айналмалы жылдамдық. Араластырғыштың параметрлері РД 26-01-90-85 ұсыныстарын ескере отырып анықталды. Сұйық-қатты фаза фазалық жүйеде суспензияларды араластыру кезінде (С:Қ) турбулентті гидродинамикалық режимді құру мүмкіндігі бар қосымша ішкі құрылғыларсыз қалақша араластырғыш қолданылады [11, 6 б.]. Қолданылатың жетектің номиналды қуаты қосу қуатын ескере отырып таңдалады Рейнольдс сандары 500-ден асатын және $Г_D$≤1,5 болатын ішкі құрылғылары жоқ аппараттар үшін 100 % құрайды

$$Re = \frac{N \cdot d_м^2 \cdot \rho}{\mu}, \quad (1)$$

мұндағы N – араластырғыштың айналу жылдамдығы, айн/сек;

$d_м$ – резервуар диаметрі 1 м болған жағдайда араластырғыш диаметрі, dм=0,7 м;

ρ – сұйықтықтың тығыздығы (су), ρ=1000 кг/м^3;

μ – сұйықтықтың динамикалық тығыздығы (су), μ= 0,001 Па·с.

Есептеулерді орындау кезінде араластырғыштардың конструктивтік ерекшеліктерінің әсері – араластырғыштың кедергі коэффициенті ξм=0,56 және айналым ағынының коэффициенті $К_2$=0,0028 екі коэффициентті пайдалану арқылы ескеріледі. Турбулетті режимдегі осы коэффициенттердің мәндердің тұрақты шамалар болып табылады [11, 13 б.]. Араластырғыштың парметрлерін

есептегеннен кейін КОМПАС (https://kompas.ru/) бағдарламасында қатты күйдегі модель жасалады. Қатты күйдегі модель Ansys CDF (https://www.ansys.com/) бағдарламасына жүктеледі.

Нәтижелер және талқылау

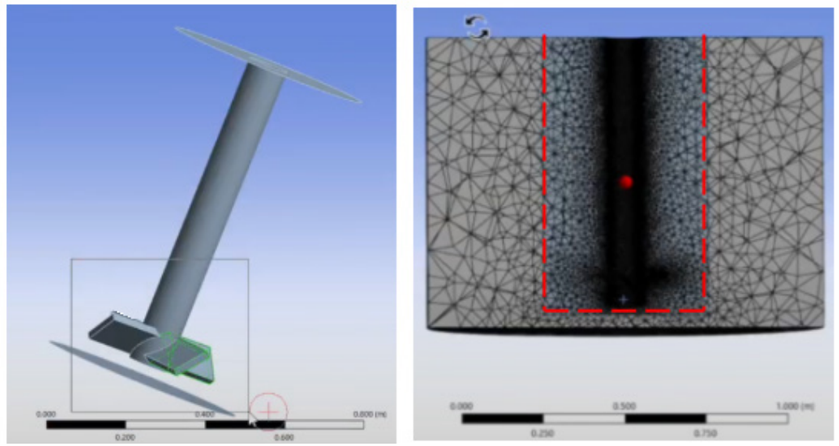
Араластырғыштың геометриялық параметрлерін есептеу нәтижелері төменде көрсетілген. Құрылғының ішкі диаметрі D=1 м, биіктігі H=1,27 м, сыйымдылығы V=1 м^3. Осыны ескере отырып:

- араластырғыштың диаметрі $d_м$=700 мм;
- араластырғыш қалақшаларының ені h =140 мм;
- втулка диаметрі $d_{вт}$=120 мм;
- жекек қуаты 3,2 кВт [7-кесте, 12];
- айналу жылдамдығы 75 айн/мин [2-кесте, 12, 8 б.].

Барлық параметрлерді ескере отырып, Рейнольдс саны турбулентті араластыру режимінде екенін көреміз [11, 6 б.]. Рейнольдс саны Kn анықтау үшін белгілі араластырғыш конструкциялары бойынша эксперименттік деректерді пайдалануға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде араластырғыштың жылдамдығын анықтау үшін қажет.

Берілген параметрлерге сәйкес аппараттардың қатты күйдегі моделі құрастырылған және Ansys CDF бағдарламасына модельдеу мәселесін шешу үшін жүктелген. 2-суретте араластырғыш машинаның қатты күйдегі моделі және соңғы элементтер торымен модельдің қимасы көрсетілген. Ansys CDF жүйесіне деректерді енгізу алгоритмі Basic of CDF Simulation with Ansys Fluent көмегімен толық сипатталған [13]. Бұл жағдайда сыйымдылықтың ішкі кеңістігі араластырғыш жазықтықтарының айналу нүктелерінің айналу жазықтығынан бөлінеді (2-суретте (б) қызыл нүктелері сызық көрсетілген).

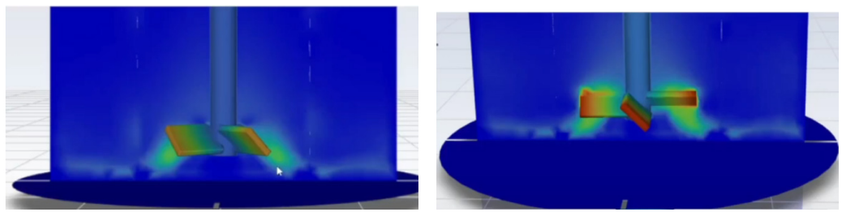
Әрі қарай, судың физикалық сипаттамаларын сипаттайтын мәліметтер енгізілгеннен кейін, 21 ºС температурада турбулентті режимде сұйықтық ағындарының қозғалысын қамтамасыз ететін араластырғыштығы оңтайлы айналу параметрлерін анықтау үшін шешуші бағдарлама іске қосылды, бірақ ауадан газдарды белсенді сору арқылы көбік пайда болмайды.



2-сурет – Араластырғыш аппараттың қатты күйдегі моделі
(а) және соңғы элементтер торымен модель қимасы (б)

Модельдеу нәтижелері 3-суретте көрсетілген. Ansys Student мүмкіндіктері шектеулі болғандықтан, араластырғыш жұмыс істеп тұрған кезде сұйықтық ағындарының таралуы анықталады, орнатылған жетек қуаты 3,2 кВт және айналу жылдамдығы 60 және 90 айн/мин. 3-суреттен сұйықтың ағындарының қозғалыс сипаты бойынша араластыру турбулетті режимде жүзеге асырыатындығын көруге болады, бірақ қоршаған ауадан ағынмен тартылатын газдар арқылықөбік түзілмейтіні анық көрінеді.

Сонымен қатар, 60 айн/мин кезінде бұрандадан шығатын ағын қысымы бүйірлерге көбірек бағытталған, ал түбіне 90 айн/мин, бұл суспензияның жақсы араласуын қамтамасыз етеді.



3-сурет – 60 айн/мин (а) және 90 айн/мин (б) жылдамдықтағы
араластырғыш аппараттың қатты күйдегі моделі

Қорытынды

Бұл конструкция С:Қ жүйесін араластыру кезінде қолдануға арналған оңтайлы конструкцияға ие болады, бұл қалақшалардың 45º көлбеу бұрышына байланысты. Сонымен қатар, мәлімделген қуат 3,2 кВт қуаты және айналу жылдамдығы 60 айн/мин және 90 айн/мин автомобильдің қуат жүйесінен немесе аккумуляторлық

жүйеден қуат алу сияқты дәстүрлі әдістерді қолдану арқылы қол жеткізу өте оңай. Ұсынылған соңғы элементтер модельдеу әдісі өзін толығымен ақтады. Әрі қарай 3,2-ден 15 кВт дейінгі әртүрлі қуаттылықтағы сұйықтық ағындарындағы бөлшектердің әрекетін және айналу жылдамдығы 95-тен 750 айн/мин дейін зерттеу жоспарлануда [12, 23 б.].

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Stelmach J., Kuncewicz C., Jirout T., Rieger F.** Mixing tank hydrodynamics and mixing efficiency for propeller impellers // Chemical Engineering Research and Design. – 2023. – Vol. 199. – P. 460–472. ISSN 0263-8762.

2 **Baba A. F., Samiran, N. A., Abd, R. R.** Effect of Impeller's Blade Number on The Performance of Mixing Flow in Stirred Tank using CFD Simulation Method // CFD Letters. – 2022. – Vol. 14. – P. 33–42.

3 **Wu M., Jurtz N., Hohl L., Kraume M.** Multi-objective geometrical optimization of single and dual impeller stirred tanks: An application of the mean age theory approach // Chemical Engineering Research and Design. – 2024. – Vol. 203– P. 709–720. ISSN 0263-8762.

4 **Jirout T., & Rieger F.** Impeller design for mixing of suspensions // Chemical Engineering Research and Design. – 2011. – Vol. 89(7). – P. 1144–1151.

5 **Heidari A.** CFD simulation of impeller shape effect on quality of mixing in two-phase gas-liquid agitated vessel // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28(11). – P. 2733–2745.

6 **Ding Xia, Zijian Mao, Shuiqing Zhou, Xing He, and Yixi Wang.** Optimized Design of Solid-Liquid Dual-Impeller Mixing Systems for Enhanced Efficiency. ACS Omega. – 2023. – Vol. 8 (50). – P. 47635–47645.

7 **Stelmach J., Kuncewicz C., Adrian Ł., Jirout T., Rieger F.** Change in Mixing Power of a Two-PBT Impeller When Emptying a Tank // Processes. – 2021. – Vol. 9. – P. 341. – https://doi.org/10.3390/pr9020341.

8 **Fitschen J., Maly M., Rosseburg A., Wutz J., Wucherpfennig T., Schlüter M.** Influence of Spacing of Multiple Impellers on Power Input in an Industrial-Scale Aerated Stirred Tank Reactor // Chem. Ing. Technol. – 2019. – Vol. 91. – P. 1794–1801.

9 **Reviol T., Kluck S., Etringer G., Wang P. & Böhle M.** Investigation of propeller mixer for agitation of non-Newtonian fluid flow to predict the characteristics within the design process // Chemical Engineering Science. – 2018. – Vol. 191. – P. 420–435.

10 **Wang H., Zhou P., Chen T., Mou J., Cui J., Zhang H.** Optimization of Liquid-Liquid Mixing in a Novel Mixer Based on Hybrid SVR-DE Model // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 1808.

11 Ресми сайт ГОСТ ассистент. Руководящий нормативный документ. механические перемешивающие устройства. Метод расчета. – [Электрондық ресурс]. – https://gostassistent.ru/doc/9b38e310-c30f-4e5b-b2ee-15cf4ba90443 (Жүгінген күні 02.05.2025)

12 Ресми сайт Meganorm.ru/. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами вертикальные. ГОСТ 20680-75. – [Электрондық ресурс]. – https://meganorm.ru/Data2/1/4294726/4294726630.pdf (Жүгінген күні 02.05.2025)

13 Ресми сайт Ansys. Basics of CFD Simulation with Ansys Fluent. – [Электрондық ресурс]. – https://www.ansys.com/academic/educators/education-resources/basics-of-cfd-simulation-with-ansys-fluent (Жүгінген күні 02.05.2025)

REFERENCES

1 **Stelmach J., Kuncewicz C., Jirout T., Rieger F.** Mixing tank hydrodynamics and mixing efficiency for propeller impellers // Chemical Engineering Research and Design. – 2023. – Vol. 199. – P. 460–472. ISSN 0263-8762

2 **Baba A. F., Samiran, N. A., Abd, R. R.** Effect of Impeller's Blade Number on The Performance of Mixing Flow in Stirred Tank using CFD Simulation Method // CFD Letters. – 2022. – Vol. 14. – P. 33–42.

3 **Wu M., Jurtz N., Hohl L., Kraume M.** Multi-objective geometrical optimization of single and dual impeller stirred tanks: An application of the mean age theory approach // Chemical Engineering Research and Design. – 2024. – Vol. 203– P. 709–720. ISSN 0263-8762.

4 **Jirout T., & Rieger F.** Impeller design for mixing of suspensions // Chemical Engineering Research and Design. – 2011. – Vol. 89(7). – P. 1144–1151.

5 **Heidari A.** CFD simulation of impeller shape effect on quality of mixing in two-phase gas-liquid agitated vessel // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28(11). – P. 2733–2745.

6 **Ding Xia, Zijian Mao, Shuiqing Zhou, Xing He, and Yixi Wang.** Optimized Design of Solid-Liquid Dual-Impeller Mixing Systems for Enhanced Efficiency. ACS Omega. – 2023. – Vol. 8 (50). – P. 47635–47645.

7 **Stelmach J., Kuncewicz C., Adrian Ł., Jirout T., Rieger F.** Change in Mixing Power of a Two-PBT Impeller When Emptying a Tank // Processes. – 2021. – Vol. 9. – P. 341. – https://doi.org/10.3390/pr9020341

8 Fitschen J., Maly M., Rosseburg A., Wutz J., Wucherpfennig T., Schlüter M. Influence of Spacing of Multiple Impellers on Power Input in an Industrial-Scale Aerated Stirred Tank Reactor // Chem. Ing. Technol. – 2019. – Vol. 91. – P. 1794–1801.

9 Reviol T., Kluck S., Etringer G., Wang P. & Böhle M. Investigation of propeller mixer for agitation of non-Newtonian fluid flow to predict the characteristics within the design process // Chemical Engineering Science. – 2018. – Vol. 191. – P. 420–435.

10 **Wang H., Zhou P., Chen T., Mou J., Cui J., Zhang H.** Optimization of Liquid-Liquid Mixing in a Novel Mixer Based on Hybrid SVR-DE Model // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 1808.

11 Official website GOST assistent. Rukovodyashhij normativny`j dokument. mexanicheskie peremeshivayushhie ustrojstva. Metod rascheta. [The guiding normative document. mechanical mixing devices. Calculation method]. – Electronic resource.

– https://gostassistent.ru/doc/9b38e310-c30f-4e5b-b2ee-15cf4ba90443 (Date of request 02.05.2025)

12 Official website Meganorm.ru/. Apparaty` s mexanicheskimi peremeshivayushhimi ustrojstvami vertikal`ny`e. GOST 20680-75 [Vertical devices with mechanical mixing devices. State Standard 20680-75]. – https://meganorm.ru/Data2/1/4294726/4294726630.pdf (Date of request 02.05.2025)

13 Official website Ansys. Basics of CFD Simulation with Ansys Fluent. – https://www.ansys.com/academic/educators/education-resources/basics-of-cfd-simulation-with-ansys-fluent. (Date of request 02.05.2025)

Д. Р. Абсолямова[1], А. Ж. Касенов[2], Г. Т. Итыбаева[3],
М. Ж. Тусупбекова[4], К. Н. Жаксалыков[5]
[1,2,3,4,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

РАСЧЕТ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

В данной статье представлены расчет и обоснование параметров перемешивающего устройства на основе трех лопастной мешалки предназначенной для подачи равномерно распределенного в водной среде твердого порошкообразного активного вещества. Для выбора оптимальных параметров был произведен расчет геометрии мешалки согласно РД 26-01-90-85 для аппарата диаметром 1000 мм и высотой 1270 мм что соответствует вместимости перемешивающего устройства равно 1м³. Диаметр мешалки составил dм=700 мм, ширина лопастей мешалки h = 140 мм, а диметр втулки $d_{вт}$=120 мм. Угол наклона лопастей в 45 градусов. Данные расчетов были использованы для создания твердотельной модели. Мощность привода 3,2 кВт и скорость вращения 75 об/мин. Модель мешалки была загружена в программу Ansys Student (CFD), работающую по методу конечных элементов (КЭ), для визуализации, анализа и определения рабочих характеристик модели мешалки по характеру возникающих потоков жидкости. Предложенная методика моделирования с помощью КЭ позволила оценить эффективность перемешивания, распределения скорости потока и уровня турбулентности в объеме перемешивающего устройства. Далее планируется исследование поведения твердых частиц в потоках жидкости при различных мощностях от 3,2 до 15 кВт и скорости вращения от 95 до 750 об/мин.

Ключевые слова: перемешивающее устройство, аппарат, мешалка, суспензия, лопасть.

D. R. Absolyamova[1], A. Zh. Kasenov[2], G. T. Itybayeva[3],
M. Zh. Tusupbekova[4], K. N. Zhaxalykov[5]
[1,2,3,4,5]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

CALCULATION AND JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE MIXING DEVICE

This article presents the calculation and justification of the parameters of a mixing device based on a three-bladed agitator designed to supply a solid powdered active substance evenly distributed in an aqueous medium. To select the optimal parameters, the geometry of the agitator was calculated according to RD 26-01-90-85 for an apparatus with a diameter of 1000 mm and a height of 1270 mm, which corresponds to the capacity of the mixing device equal to 1 m³. The diameter of the agitator was $d_м$ = 700 mm, the width of the blades of the agitator was h = 140 mm, and the diameter of the sleeve in d_{em} = 120 mm. The angle of inclination of the blades is 45 degrees. The calculation data was used to create a solid-state model. The drive power is 3,2 kW and the rotation speed is 75 rpm. The agitator model was uploaded to the Ansys Student (CFD) program, which uses the finite element method (FE), to visualize, analyze, and determine the performance characteristics of the agitator model based on the nature of the fluid flows that occur. The proposed modeling technique using CE made it possible to evaluate the efficiency of mixing, the distribution of flow velocity and the level of turbulence in the volume of the mixing device.

Keywords: mixing device, apparatus, agitator, suspension, blade.

ҒТАМР 55.01.81
DOI

Т. М. Бузауова[1], *К. А. Давлетова[2]
[1,2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7219-6274
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0809-9811
*e-mail: kunsulu.davletova@bk.ru

ЭЛЕКТРҚОЖБЕН БАЛҚЫТЫЛҒАН ТІСТЕР САПАСЫНЫҢ КЕШЕНДІ КӨРСЕТКІШІН БАҒАЛАУ

Бұл жұмыста электрқожбен балқытудың технологиялық параметрлерінің (ток күші, қож ваннасының кернеуі, судың шығыны) балқытылған тісті доңғалақтар сапасының кешенді көрсеткішіне әсері зерттеледі. Ток күші балқыту аумағындағы бөлінетін жылу көлемін анықтайды, балқу тереңдігіне, негізгі металл мен тістің кристалдану шарттарына әсер етеді. Электрлі қож ваннасының кернеуі қождың электрлі қарсыласуын және доға разрядының тұрақтылығын білдіреді, ал бұл ақаусыз біркелкі тісті балқыту үшін критериялық маңызды. Судың шығыны кристаллизатордың салқындатуын анықтайды, бұл салқындау жылдамдығына, балқытылған тістің микроқұрылымына және механикалық қасиеттеріне әсер етеді. Сондықтан, балқытылған тістің сапасын бағалау үшін осы параметрлер негізгі критериялар ретінде таңдалды. Технологиялық параметрлер мен балқытылған тістердің сапа деңгейі арасындағы елеулі байланысты анықтайтын корреляциялық талдау жүргізілді. Ток күшінің 375 А дейін артуы Кі-нің өсуіне ықпал ететіні анықталды, алайда бұл мәннен асқан жағдайда қызып кету орын алып, құрылымдық ақауларға әкеледі. Қож ваннасының кернеуі процестің тұрақтылығына әсер етеді, ал ең оңтайлы нәтижелер 70,8–73,25 В аралығында байқалады. Зерттеу сонымен қатар кристаллизатордың жеткіліксіз салқындатылуы (3,5 л/мин дейін) термиялық кернеулердің жиналуына, қуыстардың түзілуіне және сапаның төмендеуіне әкелетіні көрсетілді. Нәтижелер өндірістің әртүрлі салаларында бөлшектерді қалпына келтіру технологияларын жетілдіру үшін қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: кешенді сапа көрсеткіші, балқытылған тіс, қаттылық, кедір-бұдырлық, су шығыны.

Кіріспе

Тістерді қалпына келтірудің заманауи әдістері, мысалы, балқыту, механизмдердің қызмет ету мерзімін едәуір ұзартуға, бөлшектерді ауыстыру шығындарын азайтуға және олардың өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді [1]. Электрқожды балқыту – бұл қалпына келтіру әдісі, мұнда тозған тіс толығымен кесіледі, ал дайындалған бетке қож қабатының астында кристаллизаторды пайдалана отырып, берілістің химиялық құрамына сәйкес келетін материал

қалыптастырылады. Балқыту процесінде тісті доңғалақтың бастапқы механикалық қасиеттерін қалпына келтіруді қамтамасыз ететін жаңа тіс қалыптасады. Қалпына келтірілген тістер — бұл пайдалану барысында зақымдалған және электрқождық балқыту әдісімен қалпына келтірілген тістер, бұл тісті доңғалақтардың қызмет ету мерзімін едәуір ұзартуға мүмкіндік береді [2]. 20MnCr5 болатынан цементтелген тісті доңғалақтардың тозған тістерін балқыту арқылы қалпына келтіру технологиялық операциялары кезінде геометриялық және физика-механикалық параметрлердің өзара байланысына әртүрлі балқыту әдістерінің әсерін зерттей отырып, авторлар [3] балқыту арқылы қалпына келтірілген беріліс беттерінің ең жақсы трибологиялық сипаттамаларын қамтамасыз ететін орташа үйкеліс коэффициенттері мен қосымша материалдарды анықтады. Алайда, балқытумен қалпына келтірілген беттердің тиімділігі көбінесе олардың кілттік параметрлерімен анықталады, олардың ішінде ең маңыздысы — қаттылық пен кедір-бұдырлық.

Қаттылық материалдың тозуға және деформацияларға қарсы тұру қабілетін сипаттайды [4], ал кедір-бұдырлық тістердің жанасу қасиеттері мен олардың тозуға төзімділігіне тікелей әсер етеді [5]. [6] жұмыста авторлар балқыту технологиясының тістердің қаттылығына әсерін қарастырады. Зерттеу нәтижесінде материал мен балқыту әдісін таңдау механикалық қасиеттерге, әсіресе қаттылыққа айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Мақалада балқыту температурасының жоғарылауы қаттылықтың төмендеуін көрсететін эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Балқыту жасалған тістердің беттерінің кедір-бұдырлығын [7], оның өлшеу әдістерін және олардың тістердің жұмыс сипаттамаларына әсерін бағалай отырып, авторлар кедір-бұдырлықтың артуы тозудың жоғарылауына және жұмыс тиімділігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін екенін атап көрсетеді. Қаттылығы орташа тісті доңғалақтар бетінің кедір-бұдырлығының беріктікке әсерін зерттей отырып, авторлар [8] бірдей қаттылық жағдайында кедір-бұдырлықтың әртүрлі шамаларын өзара қиюластыру бөлшектердің тозуға төзімділігі мен механикалық сипаттамаларына әсер ететінін анықтады. Қаттылығы орташа тісті доңғалақтардың тісті жұптарындағы қаттылық айырмашылығы тозуға төзімділік пен ұзақ мерзімділікті жақсартуы мүмкін [9].

Балқытылған тістердің сапа деңгейін бағалау үшін осы сипаттамалардың өзара байланысын ескеру қажет, бұл кешенді талдау әдістерін қолдануды болжайды [10]. Сапаның кешенді көрсеткіші (Кі) балқытылған тіс беттерінің көптеген талаптарын ескере отырып, кешенді бағалауға мүмкіндік береді және әртүрлі балқыту технологиялары мен олардың параметрлерін объективті салыстыруды қамтамасыз етеді [11].

Зерттеудің мақсаты. Балқытылған қабаттың пайдалану сипаттамаларын жоғарылату үшін технологиялық параметрлердің (ток күші, қож ваннасының кернеуі, су шығыны) сапа деңгейінің кешенді көрсеткішіне әсерін анықтау.

Материалдар және әдістер

Мақсатқа сәйкес келесі материалдар мен әдістер қолданылады. Эксперименттік әдістер: сапаның кешенді көрсеткішін (Ki) есептеу, балқытылған тістің қаттылығы мен кедір-бұдырлығының өлшенген мәндері; технологиялық параметрлердің сапа көрсеткіштеріне әсер ету коэффициенттерін анықтау.

Статистикалық талдау: параметрлердің (ток күші Ii, кернеу Ui, су шығыны Qi және Ki) арасындағы өзара байланысты анықтау үшін корреляциялық талдау жүргізу; факторлардың әсерінің маңыздылығын бағалау бойынша талдау жасау.

Графикалық визуализация: Ki көрсеткішінің Ii, Ui, Qi параметрлеріне тәуелділік графигін тұрғызу; параметрлердің оңтайлы мәндерін анықтау үшін алынған нәтижелерді талдау.

Зерттеу әдістемесі. Ki және Ii, Ui, Qi параметрлер арасындағы кешенді сапа коэффициенттерін есептеу; әрбір параметрдің сапа деңгейінің кешенді көрсеткішіне әсерін анықтау және сандық бағалау заңдылықтарын айқындау.

Осы жұмыста балқытылған тістердің қаттылығы мен кедір-бұдырлығына негізделген сапаның кешенді көрсеткішін бағалау және олардың бөлшектерді қалпына келтіру процестерін оңтайландырудағы маңызы қарастырылады.

Квалиметриялық бағалау. Электрлі қожбен балқытылған тістердің сапасын квалиметриялық бағалауға қажетті бастапқы деректер 1 кестеде көрсетілген. Есептуге ыңғайлы болуы үшін шартты түрде Роквелл шкаласы (HRC) бойынша анықталған қаттылықты Xi, ал орташа арифметикалық кедір-бұдырлық (Ra, mkm) - Yi деп белгілеп аламыз.

1– кесте – Есептеуге қажетті бастапқы мәліметтер

X_i	26,2	27,7	26	29	28,7	30,6	34,8	32	31,6
Y_i	10	9,2	7,9	9	8,6	9,2	7,9	7,5	11,4
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
X_i	33,4	33	31,3	33,8	35	35,7	32,78	30,78	30,9
Y_i	11,1	11,6	12	11,8	13	12,8	13,1	13,8	13,5
№	19	20	21	22	23	24	25		
X_i	29,2	30,1	25,7	25	25,3	24,6	24,98		
Y_i	14,1	14	14,3	15,1	14,9	15,7	15,5		

Нормалау мақсатында эксперименттік деректердің ішінен (1 кесте) қаттылықтың және кедір-бұдырлықтың ең жоғарғы және ең төменгі мәндерін анықтаймыз:

- Ximax = 35,7; Ximin = 24,6;
- Yimax = 15,7; Yimin = 7,5

(1) формула бойынша нормаланған мәндер есептеледі. Нормаландыру кезінде балқытылған тістің қаттылығы максимумға ұмтылады:

$$x_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \quad (1)$$

мұнда

X_i – қаттылықтың өлшенген мәні;

X_{max} и X_{min} – қаттылықтың максималды және минималды мәндері [12].

Ал кедір-бұдырлықты нормаландыру кезінде мән минимумға ұмтылады:

$$y_i = \frac{Y_i - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}}, \quad (2)$$

мұнда

Y_i – кедір-бұдырлықтың өлшенген мәні;

Y_{max} және Y_{min} – кедір-бұдырлықтың максималды және минималды мәндері [12].

(1) және (2) формулалары бойынша әрбір эксперимент үшін есептеулер жүргізілді және есептеу нәтижелері 2 - кестеге енгізілді.

2 – кесте – Балқытылған тістердің сапа көрсеткіштерінің нормаланған мәндері

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_i	0,144	0,279	0,126	0,396	0,369	0,540	0,912	0,667	0,631
y_i	0,655	0,793	0,951	0,817	0,866	0,793	0,951	1	0,524
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
x_i	0,793	0,757	0,604	0,823	0,937	1	0,737	0,557	0,568
y_i	0,561	0,5	0,451	0,476	0,329	0,354	0,317	0,232	0,268
№	19	20	21	22	23	24	25		
x_i	0,414	0,495	0,1	0,036	0,063	0	0,034		
y_i	0,195	0,207	0,171	0,073	0,097	0	0,024		

Салмақтық коэффициент кешенді сапа көрсеткіші мәнінінде кешенді көрсеткіштің құрамына кіретін әрбір параметрдің немесе критерийдің салыстырмалы маңыздылығын анықтау үшін қолданылады. Салмақтық коэффициенттерді анықтау келесі формула бойынша жүргізіледі [12]:

$$\omega_1 + \omega_2 = 1, \quad (3)$$

Бұл жағдайда барлық параметрлердің маңыздылығы бірдей деп бағаланатын субъективті тәсілдер алынып тасталады. Бұл жағдайда (3) формула келесі түрде болады:

$$0,5 + 0,5 = 1 \quad (4)$$

мұнда

ω_1 – тістің қаттылығын ескеретін салмақтық коэффициент – 0,5

ω_2 – тістің кедір-бұдырлығын ескеретін салмақтық коэффициент – 0,5.

Нормаланған мәндер мен салмақтық коэффициенттерді пайдалана отырып, сапаның кешенді көрсеткіші Ki анықталады:

$$K_i = \omega_1 \cdot x_i + \omega_2 \cdot y_i \quad (5)$$

мұнда

ω_1 және ω_2 – қаттылық пен кедір-бұдырлық көрсеткіштері үшін сәйкесінше салмақ коэффициенттері,

x_i және y_i – нормаланған мәндер [12].

Егер Ki көрсеткіші 1-ге жақын болса, онда қаттылық және кедір-бұдырлық мәндері оңтайлы деңгейде, яғни өнімнің немесе сынақтың сапасының жоғарылығын көрсетеді, ал 0-ге жақын болса, бұл төмен сапаны білдіреді. Бұл жағдайда:

$$K_i = 0{,}5 \cdot x_i + 0{,}5 \cdot y_i = 0{,}5 \cdot (x_i + y_i) \quad (6)$$

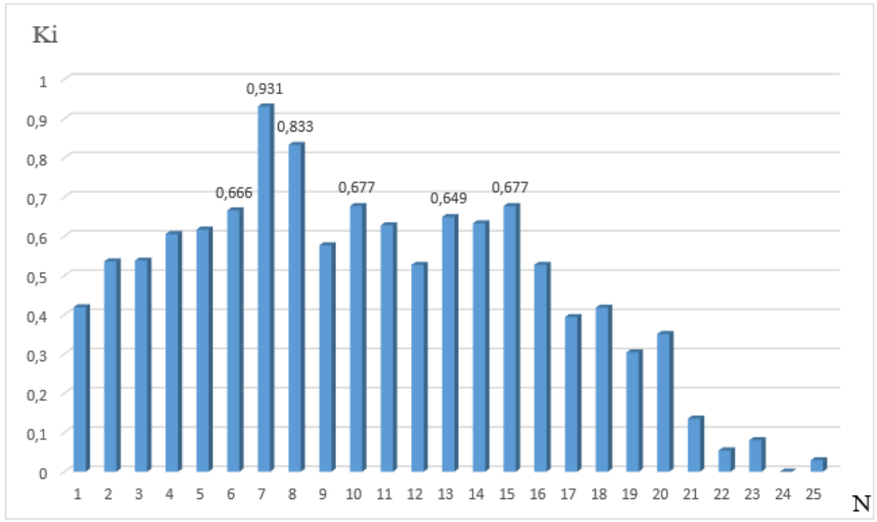
Нәтижелер және талқылау

Әр параметр үшін 1 - кестеде көрсетілген деректерді орнына қойып, сапаның кешенді көрсеткішінің мәнін есептейміз (3 - кесте).

3-кесте – Сапаның кешенді көрсеткішінің K_i мәндері

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K_i	0,419	0,536	0,538	0,606	0,617	0,666	0,931	0,833	0,577
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
K_i	0,677	0,628	0,527	0,649	0,633	0,677	0,527	0,394	0,418
№	19	20	21	22	23	24	25		
K_i	0,304	0,351	0,135	0,054	0,08	0	0,029		

Қалпына келтірілген тістердің жоғары сапа деңгейінің көрсеткіштері 7, 8, 10 және 15 тәжірибелерде байқалады (6 - сурет).



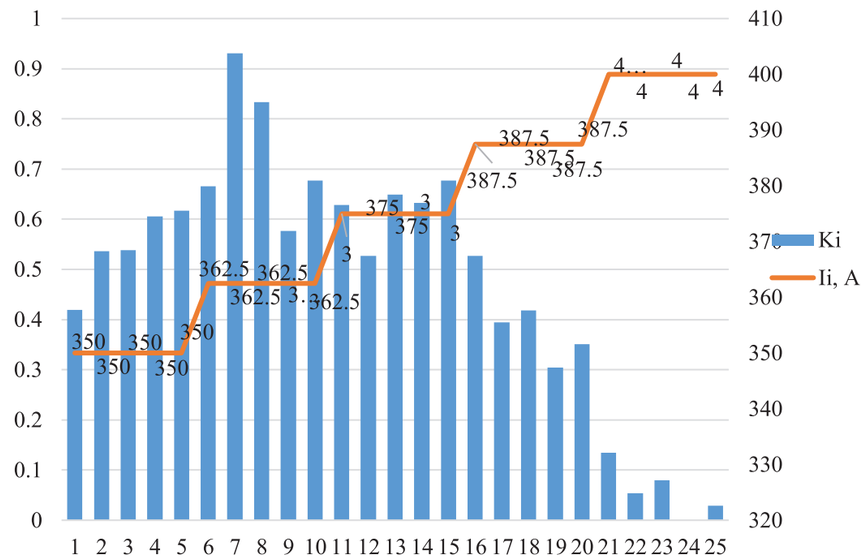
6-сурет –Сапаның кешенді көрсеткішінің мәндері

Сапа көрсеткіштерінің мәндерін бағалау (3 - кесте, 6 - сурет) сынақтардың дұрыстығы мен дәлдігін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда осы көрсеткіштерге ток күші (I), кернеу (U) және кристаллизаторға берілетін су көлемін (Q) қоса алғанда әсер ететін параметрлер қарастырылады және 4-кестеге кешенді сапа көрсеткішінің мәндері енгізіледі.

4-кесте – Балқыту кезіндегі сапаға әсер ететін факторлар: I, U, Q

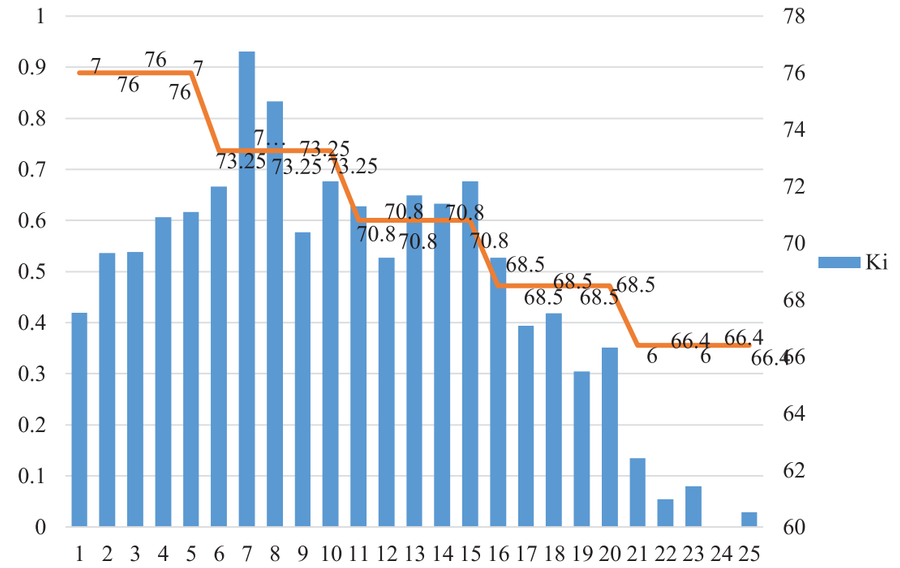
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I*i*, А	350	350	350	350	350	362,5	362,5	362,5	362,5
U*i*, В	76	76	76	76	76	73,25	73,25	73,25	73,25
Q*i*, л/мин	2,5	3,5	3	4,5	4	2,5	3,5	3	4,5
K_i	0,419	0,536	0,538	0,606	0,617	0,666	0,931	0,833	0,577
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I*i*, А	362,5	375	375	375	375	375	387,5	387,5	387,5
U*i*, В	73,25	70,8	70,8	70,8	70,8	70,8	68,5	68,5	68,5
Q*i*, л/мин	4	2,5	3,5	3	4,5	4	2,5	3,5	3
K_i	0,677	0,628	0,527	0,649	0,633	0,677	0,527	0,394	0,418
№	19	20	21	22	23	24	25		
I*i*, А	387,5	387,5	400	400	400	400	400		
U*i*, В	68,5	68,5	66,4	66,4	66,4	66,4	66,4		
Q*i*, л/мин	4,5	4	2,5	3,5	3	4,5	4		
K_i	0,304	0,351	0,135	0,054	0,08	0	0,029		

Ток күші I мен қожды ваннадағы кернеу U мәндері сапаның кешенді көрсеткішіне кері пропорционал әсер етеді (7 - және 8 -суреттер).



7 – сурет – Ток күшінің балқытылған тістер сапасының кешенді көрсеткішіне әсері

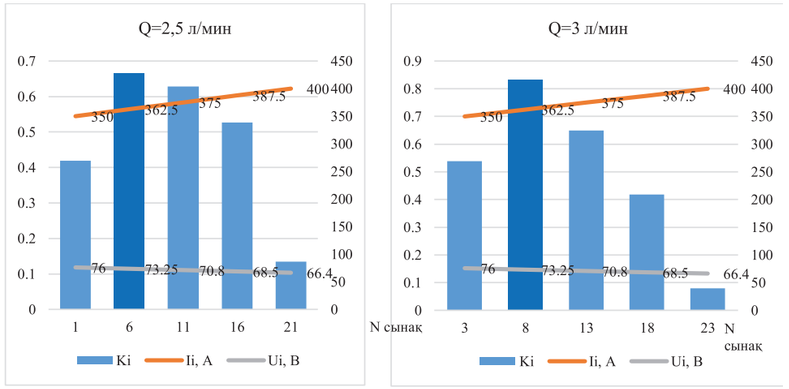
Ток күшінің (Ii) мәндері 350А ден 362,5А дейін жоғарылауы кезінде сапаның кешенді көрсеткішінің (Ki) мәні 0,4 - 0,905 дейін жоғарылағаны байқалады. Алайда ток күшінің одан әрі артуы (375А - 400А) Ki көрсеткішінің төмендеуіне әкеледі (7 - сурет).



8 – сурет – Қож ваннасындағы кернеудің балқытылған тістер сапасының кешенді көрсеткішіне әсері

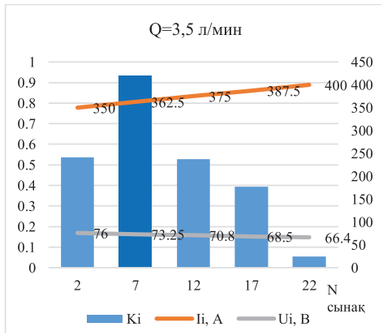
Қож ваннасындағы кернеудің Ui өзгеруі де балқытылған тістің сапасына әсер етеді. Ui мәні 76 В-тан 70,8 В-қа дейін төмендегенде, Ki коэффициенті 0,905 максималды мәнге жетеді. Алайда, Ui мәні 68,5 В-тан 66,4 В-қа дейін одан әрі төмендеген кезде, Ki коэффициенті 0,029-ға дейін төмендейді, бұл электрқожды процесті тұрақтандыру үшін қуаттың жеткіліксіз екенін көрсетеді.

Одан әрі балқыту процесінде кристаллизаторға берілетін су көлемінің Q сапаның кешенді көрсеткішіне әсерін анықтаймыз. Ол үшін 4 - кестедегі мәндерді пайдалана отырып, кристаллизаторды салқындату үшін берілетін судың көлеміне тәуелділігін құрамыз (9 - сурет) 2,5 л/мин (9, а -сурет), 3 л/мин (9, б - сурет), 3,5 л/мин (9, в - сурет), 4 л/мин (9, г - сурет), 4,5 л/мин (9, д - сурет).

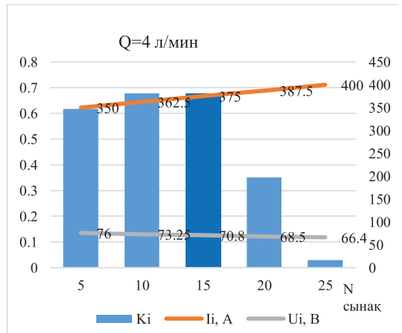


а)

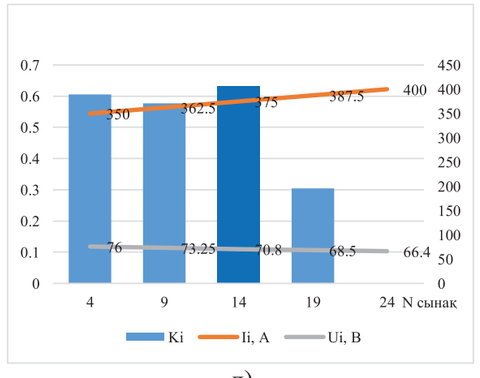
б)



в)



г)



д)

9-сурет – Кристаллизаторды салқындатуға жұмсалатын
су көлемінінің кешенді сапа көрсеткішіне әсері

Балқытылған тістің сапасына ток күшінің, қожды ваннадағы кернеудің және су шығынының әсері нақты қарастырылған жұмыстар болмаса да, жалпы электрлі қожды балқыту үрдісінде бұл параметрлердің маңызы көптеген зерттеулерде атап өтілген. Мысалы, кристаллизатордың жеткіліксіз салқындалуы ірі тетіктерде термиялық ішкі кернеулер туғызуы мүмкін екендігі [13], ток күшінің шамасы металдың құрылымына әсер ететіні, сондай-ақ, қожды ваннадағы кернеудің үрдістің тұрақтылығына ықпал ететіні көрсетілген [14].

Зерттеу нәтижесінде кристаллизаторды жеткіліксіз салқындату термиялық кернеулердің жинақталуына, қуыстар мен ақаулардың, мысалы, гофрлардың пайда болуына себепші болатыны байқалды, бұл қалпына келтірілген тістің сапасына теріс әсер етеді (9-сурет, а–в). Электрқожды балқыту кезінде кристаллизатордың тиімді жылу бөлуі және біркелкі салқындатылуы ірі модульді тістің шамадан тыс қызуын және құрылымдық ақауларын болдырмайды (9-сурет, г және д).

Электрлі қожбен қайта қалпына келтіру мәзірлерінің экономикалық тиімділігін негіздеу: ірі модульды сынған тісті (m = 20 мм, ұзындығы 450 мм) ұсынылған мәзірлермен (I = 362,5–375 А, U = 70,8–73,25 В, Q = 4,0–4,5 л/мин) балқытқанда 13897,63 теңге (шығын материалдары және электр энергиясы ескерілген). Ал қалған мәзірлермен балқыту кезінде ақаулардың пайда болуына байланысты (тісті қайта кесу, тазалау, балқыту) 20815,81 теңгені құрайды. Осылайша, бір тіске қатысты экономикалық тиімділік 6915,18 теңгені құрайды.

Қорытынды

Балқытылған тістердің қаттылығы мен бетінің кедір-бұдырлығын ескеретін кешенді көрсеткіш Ki негізінде сапаны бағалау әдісі әзірленді.

Ток күшінің артуы Ki көрсеткішіне оң әсер ететіні, алайда кристаллизатордың шамадан тыс қызуынан шекті критикалық мәндер (Ii=375А) сапаның төмендеуіне әкеледі.

3. Қож ваннасының кернеуінің Ui мәні 76 В-тан 70,8 В-қа дейін төмендегенде, Ki коэффициенті 0,905 максималды мәнге жетеді

4. Корреляциялық талдау технологиялық параметрлер мен балқытылған тістердің сапа деңгейі арасында айтарлықтай тәуелділік бар екенін көрсетті.

5. Балқытылған тістің жоғары сапасы келесі балқыту режимдерінде қамтамасыз етіледі:

- I = 362,5–375 А,
- U =70,8–73,25 В,
- Q = 4,0–4,5 л/мин.

6. Жоғарыда келтірілген балқыту мәзірлермен модулі m= 20мм кез-келген ірі модулды тісті дөңгелектердің тісін (бәсеңдеткіштер, ауыл шаруашылығы қазу машиналарының жетектері) жөндеуге болады.

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Onishchenko, V.** Investigation of tooth wear from scuffing of heavy-duty machine spur gears // Mechanism and Machine Theory. 2015. – Vol. 83. – № – P. 38–45. – https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.016.

2 **Smailova B. K., Buzauova T. M., Bartenev I. A., Davletova K.** Restoration of large modular teeth of ball mill gears by electro-slag surface // Journal of Applied Engineering Science. – 2024. – Vol. 22. – № 2. – P. 483–491. – https://doi.org/10.5937/jaes0-49369.

3 **Ružica R. N., Svetislav M., Dusan A., Vukić L.** Influence of different hard-facing procedures on quality of surfaces of regenerated gears // Production Engineering Archives. – 2021. – Vol. 27. – № 4. – P. 257–264. – https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.34.

4 **Клочко А. А., Шелковой А. Н., Шаповалов В. Ф.** Технология ремонта и восстановления крупномодульных закаленных зубчатых колес методом высокоскоростной лезвийной обработки // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2017. – № 2(2). – С. 39–46.

5 **Штефан Ю. В., Зорин В. А.** Основы теории трения и изнашивания: учебно-методическое пособие к семинарским занятиям и лабораторным работам. М. : МАДИ, 2023. 166 с.

6 **Тимохова, О. М., Бурмистрова, О. Н.** Исследование влияния технологических режимов наплавки на физико-механические свойства покрытия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 1(2), с. 293–296.

7 **Бойко, Н. И., Санамян Г. В.** Формирование шероховатости поверхности цилиндрических деталей при механической обработке наплавленного металла // Вестник РГУПС. – 2012. – № 1. – С. 49–56.

8 **Ariura, Y., Ougiya, Y., & Nakanishi, T.** A Fundamental Study on the Surface Durability of Medium-Hardness Gears: 1st Report, Effect of the Combination of Surface Roughness in the Case of the Same Hardness // Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C. – 1989. – Vol. 55. – № 512. – P. 1004–1009. – https://doi.org/10.1299/kikaic.55.1004.

9 **Ougiya, Y., Ariura, Y., & Nakanishi, T.** A Fundamental Study on the Surface Durability of Medium-Hardness Gears: 3rd Report, The Meaning to Give Difference of Hardness Between a Pair of Gears // Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C. 1991. – Vol. 57, № 540. – P. 2709–2715. – https://doi.org/10.1299/kikaic.57.2709.

10 **Зорин Н. Е., Зорин Е. Е.** Материаловедение сварки. Сварка плавлением: учебное пособие. СПб. : Лань, 2017. – 164 с.

11 **Хвастунов Р. М., Феофанов А. Н., Корнеева В. М., Нахапетян Е. Г.** Квалиметрия в машиностроении. – М. : Экзамен, 2009. 288 с.

12 **Чекмарев А. Н.** Квалиметрия и управление качеством. Ч.1. Квалиметрия: учеб. пособие.: Самара, 2010. 172 с.

13 **Ryabtsev I., Fomichov S., Kuznetsov V., Chvertko Y.** Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2023. – 349 p. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-34390-2.

14 Сварка. Резка. Контроль : Справочник. 2-х томах / Под общ. ред 24 и.п Алешина, Г. Г Чернышова. - М. : Машиностроение, 2004. Т. 1 / и.п. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков др. - 624 с.: ил

REFERENCES

1 **Onishchenko, V.** Investigation of tooth wear from scuffing of heavy-duty machine spur gears // Mechanism and Machine Theory. 2015. Vol. 83. – P. 38–45. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.016.

2 **Smailova B.K., Buzauova T.M., Bartenev I.A., Davletova K.** Restoration of large modular teeth of ball mill gears by electro-slag surface // Journal of Applied Engineering Science. – 2024. – Vol. 22. – № 2. – P. 483–491. – https://doi.org/10.5937/jaes0-49369.

3 **Ružica R. N., Svetislav M., Dusan A., Vukić L.** Influence of different hard-facing procedures on quality of surfaces of regenerated gears // Production Engineering Archives. – 2021. – Vol. 27. – № 4. – P. 257–264. – https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.34.

4 **Klochko A. A., Shelkovoj A. N., Shapovalov V. F.** Texnologiya remonta i vosstanovleniya krupnomodul`ny`x zakalenny`x zubchaty`x koles metodom vy`sokoskorostnoj lezvijnoj obrabotki [Technology for the Repair and Restoration of Large-Module Hardened Gears Using High-Speed Blade Processing] // Current State of Scientific Research and Technologies in Industry. 2017. № 2(2). P. 39–46.

5 **Shtefan Yu. V., Zorin V. A.** Osnovy` teorii treniya i iznashivaniya: uchebno-metodicheskoe posobie k seminarskim zanyatiyam i laboratorny`m rabotam / Yu. V. Shtefan, V. A. Zorin [Fundamentals of Friction and Wear Theory: Educational and Methodological Guide for Seminar Sessions and Laboratory Work] – M. : MADI, 2023. – 166 p.

6 **Timoxova, O. M., Burmistrova, O. N.** Issledovanie vliyaniya texnologicheskix rezhimov naplavki na fiziko-mexanicheskie svojstva pokry`tiya [Study of the Influence of Welding Technological Modes on the Physico-Mechanical Properties of Coatings] // The news of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. T. 19, № 1(2). P. 293–296.

7 **Bojko, N. I., Sanamyan G. V.** Formirovanie sheroxovatosti poverxnosti cilindricheskix detalej pri mexanicheskoj obrabotke naplavlennogo metalla [Formation of Surface Roughness of Cylindrical Parts During Mechanical Processing of Welded Metal]. Vestnik RGUPS, 2012. – № 1. – P. 49–56.

8 **Ariura, Y., Ougiya, Y., & Nakanishi, T.** A Fundamental Study on the Surface Durability of Medium-Hardness Gears: 1st Report, Effect of the Combination of Surface Roughness in the Case of the Same Hardness // Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C

Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C. – 1989. – Vol. 55, № 512. – P. 1004–1009. – https://doi.org/10.1299/kikaic.55.1004.

9 **Ougiya, Y., Ariura, Y., & Nakanishi, T.** A Fundamental Study on the Surface Durability of Medium-Hardness Gears : 3rd Report, The Meaning to Give Difference of Hardness Between a Pair of Gears // Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/ Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C. 1991. – Vol. 57. – № 540. – P. 2709–2715. – https://doi.org/10.1299/kikaic.57.2709.

10 **Zorin N. E., Zorin E. E.** Materialovedenie svarki. Svarka plavleniem : uchebnoe posobie / N. E. Zorin, E. E. Zorin [Materials Science of Welding. Welding by Melting : A Study Guide]. – SPb. : Lan`, 2017. – 164 p.

11 **Xvastunov R. M., Feofanov A. N., Korneeva V. M., Naxapetyan E. G.** Kvalimetriya v mashinostroenii [Qualimetry in Mechanical Engineering] – M. : E`kzamen, 2009. – 288 p.

12 **Chekmarev A. N.** Kvalimetriya i upravlenie kachestvom. Ch.1. Kvalimetriya: ucheb. posobie / [Qualimetry and Quality Management. P. 1. Qualimetry: A Study Guide] : Samara, 2010. – 172 p.

13 **Ryabtsev I., Fomichov S., Kuznetsov V., Chvertko Y.** Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. – 349 p. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-34390-2.

14 **Alešin I. P., Černyšov G. G., Gladkov È. A. [et al.]** Svarka. Rezka. Kontrol': spravočnik: v 2 t. [Welding. Cutting. Control: Handbook: in 2 volumes].Mašinostroenie, Moscow. – 2004. – Vol. 1. – 624 p., ill.

Т. М. Бузауова[1], *К. А. Давлетова[2]
[1,2]Карагандинский технический университет имени
Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда

ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА НАПЛАВЛЕННЫХ ЗУБЬЕВ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКОЙ

В данной работе исследуется влияние технологических параметров электрошлаковой наплавки (сила тока, напряжение шлаковой ванны, расход воды) на комплексный показатель качества наплавленных зубчатых колес. Сила тока определяет количество тепла, выделяемого в зоне наплавки, и влияет на глубину проплавления, формирование зоны сплавления и структуру металла. Напряжение шлаковой ванны отражает электрическое сопротивление шлака и стабильность дугового разряда, что критически важно для формирования равномерного слоя наплавленного металла без дефектов. Расход воды определяет интенсивность охлаждения кристаллизатора, что влияет на скорость охлаждения и, соответственно, на микроструктуру и механические свойства наплавленного слоя. Поэтому указанные параметры выбраны в качестве основных критериев для оценки качества наплавленных зубьев. Проведен корреляционный анализ, выявивший значимую зависимость между технологическими параметрами и уровнем качества наплавленных зубьев.

Установлено, что увеличение силы тока до 375 А способствует росту Ki, однако превышение этого значения приводит к перегреву и структурным дефектам. Напряжение шлаковой ванны влияет на стабильность процесса, при этом оптимальные результаты наблюдаются в диапазоне 70,8–73,25 В. Также установлено, что недостаточное охлаждение кристаллизатора (до 3,5 л/мин) вызывает накопление термических напряжений, образование полостей и снижение качества. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологий восстановления деталей в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: комплексный показатель качества, наплавленный зуб, твердость, шероховатость, расход воды.

T. M. Buzauova, *K. A. Davletova
1,2Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda

ASSESSMENT OF THE COMPREHENSIVE QUALITY INDICATOR OF ELECTROSLAG REMELTED GEAR TEETH

This study examines the influence of technological parameters of electroslag surfacing (current intensity, slag bath voltage, and water flow rate) on the comprehensive quality indicators of surfaced gear teeth. The current determines the amount of heat generated in the surfacing zone, which affects the penetration depth and the crystallization conditions of both the base metal and the teeth. The slag bath voltage reflects the electrical resistance of the slag and the stability of the arc discharge, which is critically important for uniform and defect-free surfacing of gear teeth. The water flow rate determines the cooling efficiency of the crystallizer, influencing the cooling rate, microstructure, and mechanical properties of the surfaced teeth. Therefore, these parameters were chosen as the main criteria for evaluating the quality of the surfaced teeth. A correlation analysis was carried out to determine the significant relationship between the technological parameters and the quality level of the surfaced teeth. It was found that increasing the current up to 375 A contributes to an increase in the Ki index; however, exceeding this value causes overheating and leads to structural defects. The slag bath voltage affects the process stability, with optimal results observed in the range of 70.8 to 73.25 V. The study also showed that insufficient cooling of the crystallizer (down to 3.5 L/min) leads to the accumulation of thermal stresses, the formation of cavities, and a decrease in quality. These results can be applied to improve component restoration technologies in various industries.

Keywords: comprehensive quality indicator, remelted tooth, hardness, roughness, water consumption.

МРНТИ 55.33.41
DOI

***Г. А. Гурьянов[1], А. В. Вавилов[2], М. В. Дудкин[3],
А. В. Ликунов[4], О. Ю. Васильева[5]**
[1,2,3,4]ТОО «Научно-производственное объединение ИННОТЕХ»,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск
[5]Восточно-Казахстанский технический университет
имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3657-3735
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0356-0508
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5732-0724
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5387-3284
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9426-6322
*e-mail: gguryanov@mail.ru

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

На основе анализа способов измельчения материалов, сложностей измельчения и существующих измельчителей обоснована целесообразность применения для тонкого и сверхтонкого измельчения способа разрушения ударом, а также высокоскоростных измельчителей ударного действия. Разработана механико-математическая модель разрушения ударом частиц материала, моделируемых формой бруса, позволяющая прогнозировать результат процесса измельчения и определять рациональные параметров измельчителей. Предлагается инженерная методика в виде простых функциональных соотношений для теоретического расчета напряжений, разрушаемого при одном воздействии рабочего органа объема частицы, предела измельчения, количества воздействий рабочего органа и времени, необходимых для измельчения частицы от исходного до конечного размера, регулирования параметров процесса измельчения. Предложена конструкция измельчителя ударного действия с оригинальной организацией многоступенчатого измельчения и повышенной энергонапряженностью процесса. Приведены результаты экспериментальных исследований многоступенчатого измельчителя ударного действия, дополняющие методику расчета и доказывающие работоспособность, эффективность и возможность практического использования измельчителя. Предложенная оригинальная схема многоступенчатого измельчения и конструкция измельчителя имеют возможности для их дальнейшего развития и совершенствования. Результаты работы могут служить основой для дальнейших исследований процессов тонкого и сверхтонкого измельчения материалов ударом, поисков возможностей экономичного измельчения.

Ключевые слова: разрушение, измельчение, измельчитель, мельница, удар, материал, частица, эффективность.

Введение

Тонкое измельчение (помол) применяется для измельчения руд и концентратов, химических веществ, компонентов строительных смесей, твердого топлива, пищевых продуктов, кормов и др. Именно тонкое измельчение во многом способствует эффективному и грамотному использованию природных ресурсов [1, 2, 3].

Качественные и количественные результаты измельчения во многом зависят от способа разрушения и измельчительного оборудования, которое, при большом числе разновидностей, отличается, в основном, схемой реализации того или иного способа разрушения или их сочетания [2, 3, 4].

Современное измельчительное оборудование не вполне справляется с получением тонкодисперсного продукта на фоне острой потребности в сверхтонкоизмельченных материалах и измельчении новых материалов с особыми свойствами, в снижении энергоемкости процесса измельчения, что обуславливает актуальность работы по повышению эффективности процесса и совершенствованию оборудования для тонкого и сверхтонкого измельчения. Одним из решений может быть использование рационально организованного измельчения ударным воздействием.

На сегодняшний день в измельчительных машинах, как правило, применяются механические способы разрушения (раздавливание, удар, раскалывание, излом, истирание и их комбинации), посредством которых наиболее просто достигаются требуемая крупность и форма частиц материала [1; 2; 4; 5].

По причине физических особенностей некоторых способов разрушения велика вероятность полной потери их влияния на процесс измельчения с уменьшением размера частиц материала. Воздействие на мелкодисперсные частицы раздавливанием, раскалыванием, изгибом и истиранием характеризуется неизбирательностью измельчения, демпфированием нагрузок, малым количеством воздействий в единицу времени, низкой вероятностью оказания необходимого разрушающего воздействия и сращиванием частиц дисперсного материала друг с другом под внешним нагружением.

С позиции соотношения количества энергии на измельчение и крупности полученного продукта измельчение до удельной поверхности более 3000 см²/г с использованием измельчителей раздавливающе-истирающего действия требует энергии сверх рационального количества и становится неэкономичным [6; 7].

К настоящему времени проблема повышения трудности измельчения и нелинейного увеличения расхода энергии с уменьшением размера частиц [7; 8; 9] до конца не решена, во многом по причине неверного выбора средств ее решения, то есть раздавливающе-истирающее воздействие при сверхтонком измельчении малоэффективно и не соответствует задачам получения тонкодисперсного продукта.

С этих позиций способ разрушения высокоскоростным ударом практически лишен перечисленных выше недостатков других способов разрушения при наличии существенных преимуществ [4; 5; 7; 10]: возможность формирования

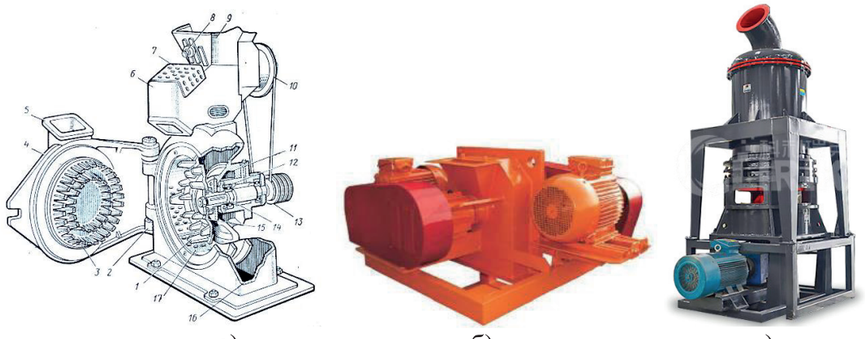
в материале всех видов напряженного состояния; большие по величине силы нагружения и повышенная мощность воздействия; избирательный характер разрушающего воздействия на частицы; большое число воздействий на частицу в единицу времени при малом времени помола; проявление в частицах измельчаемого материала вторичных процессов, усиливающие результат; высокая степень измельчения и минимум затрат энергии.

Таким образом, решить проблему повышения эффективности тонкого и сверхтонкого измельчения частиц может помочь приоритетное применение высокоскоростного удара.

Исходя из преимуществ разрушения ударом, интерес представляют высокоскоростные энергонапряженные измельчители ударного действия (аэробильные мельницы, дезинтеграторы, дисмембраторы и др.) (рисунок 1), в которых частицы материала измельчаются многократным концентрированным ударным воздействием на них рабочих органов, а также соударений частиц с отражательными элементами и между собой [2; 3; 4].

Мельницы ударного действия имеют ряд существенных достоинств: сравнительная простота конструкции, небольшой вес, габариты и металлоемкость; относительно малая мощность и высокая производительность; относительно большой коэффициент полезного действия; высокая энергетика процесса; избирательность измельчения; высокая тонкость помола и степень измельчения; высокое качество помола, предотвращение агломерации частиц; большое количество воздействий на частицу в единицу времени; несложное регулирование режима работы.

Недостатки: наличие быстровращающихся частей, высокие динамические нагрузки, измельчение частиц до нужного размера за один проход через аппарат только в циклическом режиме.



а) б) в)

Рисунок 1 – Измельчители ударного действия: аэробильная мельница (а), дезинтегратор (б), центробежная мельница (в)

Есть основания считать [1, 6, 7, 10, 11], что измельчение частиц до требуемого размера малым количеством нагружений с большой энергией гораздо менее энергозатратно, чем большим количеством нагружений с меньшей энергией. Достигаемое при этом уменьшение количества воздействий на частицы и времени измельчения способствует снижению расхода энергии. Поэтому разрушение материалов высокоэнергетическим ударным воздействием при высоких скоростях движения рабочих органов и среды помола потребует меньших энергозатрат, нежели статическое нагружение, что открывает новые возможности для экономичного измельчения.

Таким образом, при тонком и, особенно, сверхтонком измельчении высокоскоростные измельчители ударного действия в сравнении с измельчителями других типов имеют преимущество по совокупности технологических результатов и затрат на их получение.

Материалы и методы

Для количественной оценки работы измельчительных машин ударного действия, расчета и прогнозирования результата процесса измельчения необходима простая и адекватная механико-математическая модель, и методика расчета на ее основе, имеющие достаточную для инженерных расчетов точность и достоверность.

Процессы измельчения весьма сложно описать и предсказать теоретически, поэтому в настоящее время одновременно существует большое количество моделей измельчения (гипотезы Гриффитса, Риттингера, Кирпичева, Кика, Бонда, Румпфа, Орована, Ребиндера, Гийо, Рундквиста, Ходакова, Кармазина, Татура, Баловнева, Пойкерта, Кальмана, Шёнерта, Тавареса и др.), каждая из которых может быть использована для тех или иных случаев измельчения.

Трудности в практическом использовании существующих гипотез измельчения, среди прочего, вызваны следующим: отражение качественной стороны процесса измельчения и малопригодность для его количественной оценки; необходимость определения эмпирических коэффициентов, различных для каждого измельчаемого материала, и величины действующих сил различной природы; сложность математического аппарата; статистическая или эмпирическая основа расчетной модели, либо вероятностный подход.

Задачу теоретического описания процесса измельчения для получения достаточно простой и пригодной для инженерного применения модели измельчения можно упростить, если модель отнести к конкретному процессу измельчения, например, ударом.

В основу получения механико-математической модели и методики расчета процесса измельчения частицы ударом, как процесса поэтапного отделения от нее локальных объемов материала при взаимодействии с рабочим органом, положим определение напряжений, возникающих в частице в процессе разрушения, на основе известных положений механики упругодеформируемого твердого тела и ряда исходных предпосылок [11; 12; 13; 14].

Определим напряжения (силы сопротивления) при упругом деформировании разрушаемой частицы до момента отделения элемента скола при действии на нее со стороны рабочего органа сосредоточенной силы P (рисунок 2).

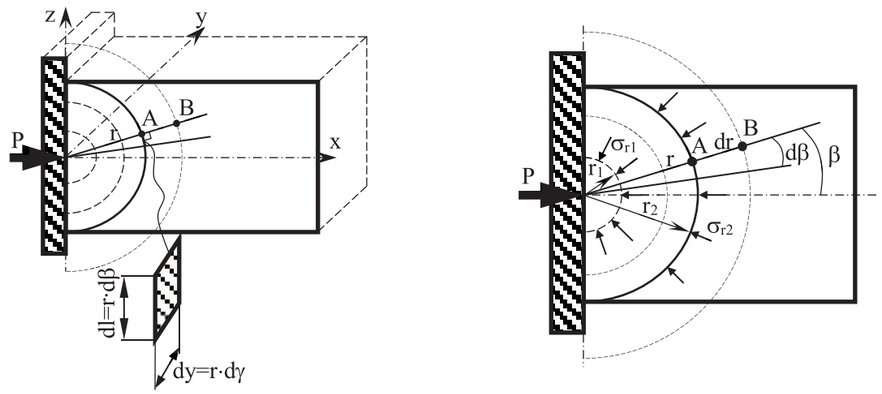


Рисунок 2 – Расчетная схема разрушения ударом частицы в форме бруса постоянного сечения

Рассмотрев перемещение точки А внутри частицы на расстояние dr в точку В при деформации частицы под действием силы P и приняв прямую пропорциональность между напряжениями и деформациями, составим и решим интегральные уравнения равновесия для полусферы радиуса r, к поверхности которой приложены напряжения σ_r, и, после преобразований, получим формулу для определения величины напряжения σ_r, возникающего от действия силы P:

$$\sigma_r = \frac{4 \cdot P}{\pi^2 \cdot r^2} \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma \text{, Па.}$$

Предполагая вследствие малости частицы, что перемещения и соответствующие им напряжения зависят только от радиуса r, что вдоль линии действия силы P они наибольшие, а нормальные к линии действия силы P равны нулю, получим средние действующие напряжения $\sigma_{r.cp}$, одинаковые для всех точек деформируемого слоя, расположенных на некотором радиусе r от точки приложения силы P:

$$\sigma_{r\,cp} = \frac{2 \cdot P}{\pi^2 \cdot r^2} \text{, Па.} \qquad (1)$$

Выразив в формуле (1) силу удара P через массу частицы и ускорение замедления от скорости v до нуля в процессе деформации частицы на пути разрушения r, получим формулу для радиальных напряжений $\sigma_{r.cp}$ следующего вида:

$$\sigma_{r\,cp} = \frac{m \cdot v^2}{\pi^2 \cdot r^3} = \frac{m \cdot R^2 \cdot \omega^2}{\pi^2 \cdot r^3} = \frac{m \cdot R^2 \cdot n^2}{900 \cdot r^3} \text{, Па.} \qquad (2)$$

где m – масса разрушаемой частицы, кг; v – скорость соударения рабочего органа и частицы, м/с; ω – угловая скорость вращения ротора измельчителя, с⁻1; R – радиус ротора (расположения бил) измельчителя, м; n – частота вращения ротора измельчителя, об/мин.

Предлагаемая модель измельчения на основе полученной базовой зависимости (2) позволяет производить расчет параметров процесса измельчения ударом и параметров работы измельчителя, позволяет прогнозировать процесс измельчения и оценивать работу измельчительных машин по таким параметрам, как крупность измельчаемых частиц, предел измельчения, объем разрушаемого за одно воздействие материала частицы и др., предоставляет для практического применения понятные и несложные расчетно-теоретические зависимости, не требует специальных компьютерных программ, но может послужить основой для их создания.

Представленная модель измельчения обладает определенной новизной, так как аналогов этой модели не выявлено, а также может быть удобнее других моделей в практическом применении для некоторых конкретных случаев, например, при измельчении ударом.

Некоторым ограничением предлагаемой модели является ее предпочтительное применение для процессов измельчения свободным ударом, так как в основе модели лежит избирательность воздействия рабочего органа на частицу.

Наряду со скоростью нагружения v большое влияние на тонкость продукта измельчения в ударных мельницах оказывает количество воздействий рабочего органа на частицы, которое для эффективного измельчения материала должно быть от 5 до 20 [15, 16].

Определение количества воздействий рабочего органа на частицу, необходимых для ее измельчения от исходной до требуемой крупности, опирается на определение объема материала частицы, разрушающегося при взаимодействии с рабочим органом. Для этого:

1) из формулы (2) выражаем и находим глубину разрушения материала частицы r:

$$r = \sqrt[3]{\frac{m \cdot v^2}{\pi^2 \cdot [\sigma]_{r\,cp}}} = \sqrt[3]{\frac{m \cdot R^2 \cdot n^2}{900 \cdot [\sigma]_{r\,cp}}} \text{, м;} \qquad (3)$$

2) определяем объем материала, разрушающегося при одном воздействии рабочего органа (приблизительно аппроксимируемый объемом параллелепипеда):

$$V_1 = y_i^2 \cdot r \text{, м}^3\text{;} \qquad (4)$$

3) рассчитываем оставшийся объем частицы после удара:

$$V_i = y^3 - V_1, \text{ м}^3; \quad (5)$$

4) пересчитываем размеры частицы после воздействия (размер стороны куба), исходя из вновь полученного объема Vi:

$$y_i = \sqrt[3]{V_i}, \text{ м}; \quad (6)$$

5) повторяем расчет до тех пор, пока величина yi не станет равна требуемому значению $y_{вых}$.

Проведем расчет процесса измельчения, задавшись исходными данными: форма частицы – кубическая (частная форма бруса); исходная крупность частиц материала (размер стороны куба) $y_{вх}$=0,001 м (1 мм); требуемый размер измельченных частиц (размер стороны куба) $y_{вых}$=0,000005 м (5 мкм); предел прочности частицы при сжатии [$\sigma_{гср}$]=50·106 Па; плотность частицы ρ=2600 кг/м^3; начальная масса частицы m=0,0000026 кг; частота вращения ротора измельчителя n=4000; 5000; 6000 об/мин; средний радиус расположения бил ротора измельчителя R=0,05 м. Материал частиц - однородный, сплошной, изотропный, линейно-упругий (подчиняющийся закону Гука).

Расчет процесса измельчения частицы от начального размера 1 мм до конечного размера 5 мкм для разных значений скоростей соударения рабочего органа и частицы проведен по изложенной выше методике (формулы (3)-(6)) в редакторе Microsoft Excel. Результаты расчета представлены в виде графиков на рисунке 3.

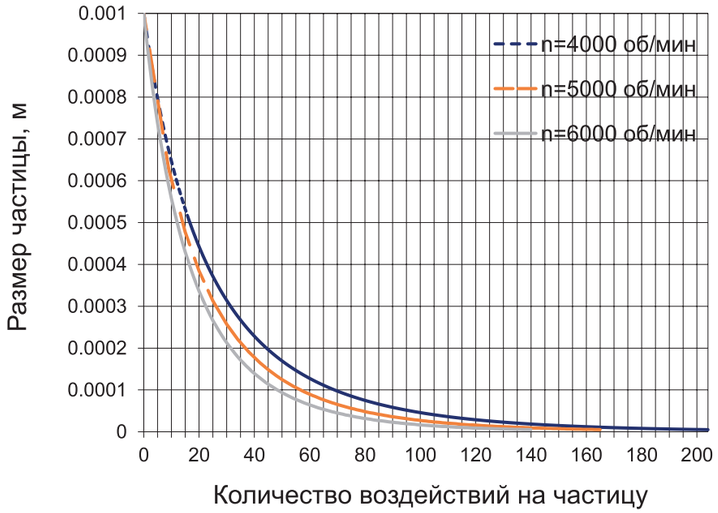


Рисунок 3 – Результаты расчета процесса измельчения частицы

Из графиков рисунка 3 видно, что измельчение от 1 мм до 50 мкм (в 20 раз) происходит за половину от общего числа воздействий, а дальнейшее измельчение от 50 мкм до 5 мкм (в 10 раз) – за вторую половину от общего числа воздействий. Дальнейший расчет измельчения от 5 мкм до 1 мкм (в 5 раз) показывает, что измельчение происходит примерно за такое же количество воздействий, что и каждое предыдущее. То есть более крупные частицы измельчаются более интенсивно, но по мере уменьшения их размера скорость измельчения падает и постепенно стремится к нулю, что соответствует общей тенденции по замедлению процесса измельчения с уменьшением размера частиц [1, 6, 8, 9, 11].

На рисунке 4 представлена расчетная зависимость количества воздействий, необходимых для измельчения частицы от 1 мм до 5 мкм, от скорости соударения рабочего органа с частицей, из которой видно, что интенсивность измельчения падает, несмотря на рост скорости соударения. То есть существует предел скорости соударения (для данных расчетов - примерно 52 м/с при 10000 об/мин), после перехода через который время измельчения уменьшаться не будет, а будут расти лишь энергозатраты на процесс.

Прослеживаемый на графиках рисунков 3 и 4 эффект замедления измельчения при достижении критических размеров частиц достаточно хорошо известен и, как правило, объясняется ростом затрат энергии при уменьшении размеров частиц на пластическое деформирование частиц, на преодоление увеличивающейся прочности, предположительно, вследствие меньшей вероятности встречи опасных дефектов, и очень малых размеров самих дефектов, а также образованием конгломератов мелкодисперсных частиц, на повторное разрушение которых также тратится подведенная энергия.

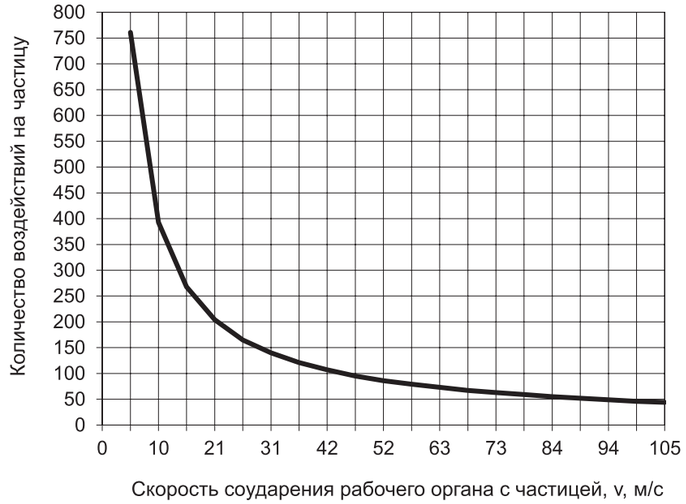


Рисунок 4 – Зависимость количества воздействий, необходимых для измельчения частицы от 1 мм до 5 мкм, от частоты вращения ротора

Таким образом, на основании предложенной методики можно прогнозировать результат и регулировать параметры процесса измельчения, а также ориентировочно определять количество ступеней измельчения или время нахождения материала в измельчителе, необходимое для измельчения от начального до требуемого размера.

Для определения количества ступеней в измельчителе, необходимого для измельчения частиц от исходной до заданной крупности, рассмотрим прохождение частицы материала через одну ступень измельчителя ударного действия, приняв неблагоприятные условия движения материала в вертикальном направлении сверху - вниз под действием силы тяжести и противодействии аэродинамических сил при средней скорости потока материала $v_м$=1 м/с, ширине зоны помола одной ступени измельчителя δ=0,02 м, количестве бил в ступени z=25 шт.

Время прохождения частицы через одну ступень измельчения:

$$t = \frac{\delta}{v_м}, \text{ с.} \quad (7)$$

Количество оборотов ротора измельчителя за время прохождения частицы через одну ступень измельчения:

$$x = \frac{n \cdot t}{60}, \text{ об/с.} \quad (8)$$

Количество бил, проходящих через условную точку в зоне помола за время прохождения частицы через ступень измельчения:

$$w = z \cdot x, \text{ шт.} \quad (9)$$

В результате получаем диапазон чисел от 1 до w, которые являются пределами количества теоретически возможных воздействий рабочего органа на частицу в одной ступени.

Результаты расчета количества воздействий рабочего органа на частицу на одной ступени измельчителя приведены в таблице 1.

В дальнейшем количество воздействий w может корректироваться в зависимости от упругих свойств материала, а также при помощи эмпирических коэффициентов.

Необходимое количество ступеней измельчения iст определяется, исходя из полученного значения теоретического количества воздействий q, необходимых для разрушения частицы от исходного до требуемого размера, и расчетного количества воздействий на одной ступени измельчения w:

$$i_{ст} \geq \frac{q}{w}, \text{ шт.} \quad (10)$$

Количество ступеней измельчения по формуле (10)): при n=4000 об/мин, $i_{ст}$=6 шт; при n=5000 об/мин, $i_{ст}$=4 шт; при n=6000 об/мин, $i_{ст}$=3 шт.

Примем фактическое количество ступеней измельчения $i_{ст.ф}$=5.

Таблица 1 – Определение количества воздействий рабочего органа на частицу на одной ступени измельчителя

Частота вращения ротора измельчителя, n, об/мин		
4000	5000	6000
Время прохождения частицы через одну ступень измельчения (формула (7)): t=0,02 с.		
Количество оборотов ротора за время прохождения частицы через одну ступень измельчения (формула (8)), x, об/с		
1,3	1,7	2
Количество бил, проходящих через условную точку в зоне помола за время прохождения частицы через ступень измельчения (формула (9)), w, шт		
33	43	50

Количество необходимых проходов $i_п$ материала через измельчитель для измельчения до требуемой крупности с учетом расчетного количества ступеней измельчения $i_{ст}$ и фактического количества ступеней измельчения $i_{ст.ф}$=5, определяется:

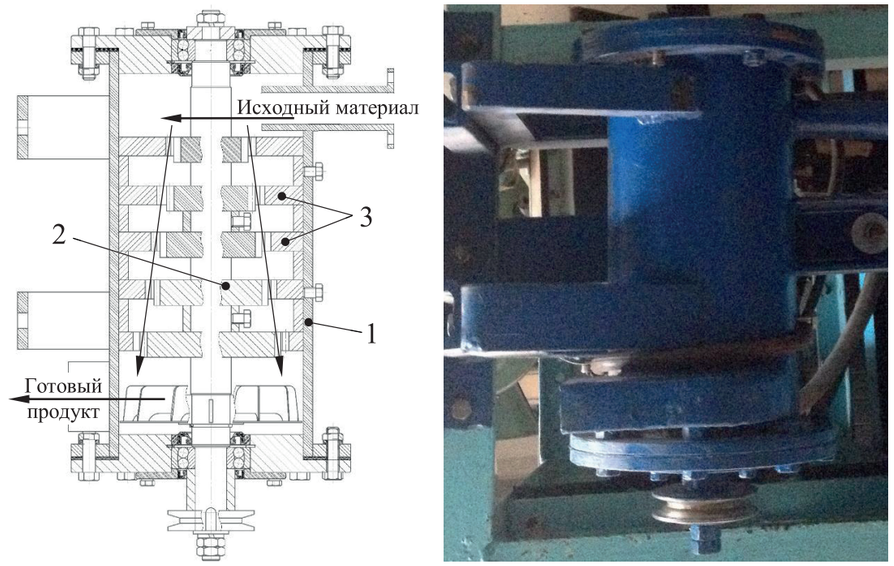
$$i_п \geq \frac{i_{ст}}{i_ф}, \text{ шт} \quad (11)$$

Количество проходов через измельчитель по формуле (11): при n=4000 об/мин, $i_п$=2 шт; при n=5000 об/мин, $i_п$=1 шт; при n=6000 об/мин, $i_п$=1 шт.

Разработанная механико-математическая модель и инженерная методика расчета процесса разрушения частицы ударом позволяют прогнозировать результат процесса измельчения, осуществлять расчет и подбор измельчительного оборудования, а также могут быть положены в основу компьютерной модели процесса измельчения.

Повысить эффективность работы измельчителей ударного действия возможно за счет комплексного подхода [17] к организации процесса измельчения, приводящего к увеличению силы и скорости воздействия на частицы, росту количества воздействий в единицу времени и энергонапряженности.

На этой основе, а также на основе расчета числа ступеней измельчения был разработан и изготовлен пятиступенчатый измельчитель ударного действия (рисунок 5).



1 – корпус; 2 – ротор с валом и зубчатыми колесами;
3 – блок неподвижных зубчатых колес

Рисунок 5 – Многоступенчатый измельчитель ударного действия

Измельчитель работает следующим образом. Материал подается в помольную камеру корпуса 1 измельчителя, где вращается ротор 2, состоящий из вала с установленными на нем зубчатыми колесами, напротив которых в корпусе также установлены неподвижные зубчатые колеса 3. Измельчение частиц материала происходит при их движении от входа к выходу измельчителя через малые зазоры между вращающимися и неподвижными зубчатыми колесами за счет многократных высокоскоростных ударов по ним зубьев ротора 2 и ударов о неподвижные зубья 3. Перемещаясь от ступени к ступени измельчителя, материал подвергается увеличивающемуся силовому воздействию. При вращении ротора частицы измельчаемого материала аэрируются, что препятствует их коагуляции. Такая организация работы измельчителя позволяет интенсифицировать процесс измельчения и повысить его тонкость. Измельченный материал выводится из измельчителя. Конструкция измельчителя позволяет в определенных пределах изменять его параметры для получения требуемой крупности готового продукта за один проход через измельчитель. Измельчитель может устанавливаться в горизонтальном или вертикальном рабочем положении.

Результаты и обсуждение

Для проверки полученных выше теоретических моделей, установления работоспособности и эффективности ступенчатого измельчителя ударного действия были проведены его экспериментальные исследования в ходе которых

использовались следующие оборудование и материалы: пятиступенчатый измельчитель ударного действия; прибор ПСХ–10А для определения удельной поверхности материала и средней крупности его частиц; электронные весы PCE-WS-30 для взвешивания навески материала; песок фракции 0,5…1 мм и лежалый цемент.

Было проведено измельчение песка фракции 0,5…1 мм в пятиступенчатом измельчителе. В ходе эксперимента измерялось время измельчения порции материала и крупность готового продукта, зависящая от частоты вращения ротора измельчителя. На основании этого определен коэффициент длительности измельчения $k_{ди}$ (количество ударов в единицу времени, обеспечивающее измельчение частицы материала от исходного до требуемого размера) на одной ступени измельчителя, как результат деления расчетного количества q воздействий на частицу (определенного на основании разработанной методики) на экспериментальное время измельчения $t_э$ и на количество ступеней измельчения $i_{ст.ф}$=5, т.е. $k_{ди}=q/(t_э \cdot i_{ст.ф})$, уд./сек. Исследования проводились для частоты вращения ротора n=4000; 5000; 6000 об/мин. Результаты эксперимента и расчетов коэффициента длительности измельчения $k_{ди}$ представлены в таблице 2. Значения коэффициента длительности измельчения $k_{ди}$ лежат в пределах 1,5…2, а среднее значение коэффициента длительности измельчения kди.ср=1,73.

Для материалов высокой прочности и при низких скоростях соударения значение коэффициента длительности измельчения kди возможно принимать равным 1,5 и менее, а для материалов низкой прочности и при высоких скоростях соударения - равным 2 и более.

Таблица 2 – Результаты измельчения материала

Частота вращения ротора, n, об/мин	Результат измельчения, d, мкм	Время измельчения, tэ, с	Расчетное количество воздействий, q	Коэффициент длительности измельчения, kди, уд./сек.
4000	10,3	≈18	167	1,85
5000	6,5	≈18	155	1,72
6000	4,1	≈18	147	1,63

На основании полученных результатов предложена методика прогнозирования получения готового продукта требуемого размера в измельчителе данной конструкции. При прогнозировании по приведенной выше теоретической модели рассчитывается необходимое для измельчения частиц материала от исходного до требуемого размера количество воздействий q на частицу, которое затем делится на значение коэффициента длительности измельчения $k_{ди}$ из интервала 1,5…2. В результате получим ориентировочное время t для измельчения частицы материала от начальной до конечной крупности, или практическое потребное время нахождения частиц материала в измельчителе при одноступенчатом измельчении. Для сокращения времени измельчения можно полученное время

измельчения t разделить на требуемое время измельчения $t_{тр}$, получив необходимое для этого количество ступеней измельчения:

$$i_{ст} = \frac{t}{t_{тр}} = \frac{q}{t_{тр} \cdot k_{ди}} \quad (12)$$

При исследовании измельчителя, работавшего при частоте вращения ротора 6000 об/мин, измельчался исходный лежалый цемент с удельной поверхностью S=3692 см^2/г и средним диаметром частиц d=5,4 мкм, который пропускали через измельчитель и после каждого прохода отбирались пробы (по 3 пробы), которые обрабатывались на приборе ПСХ-10. Полученные результаты в зависимости от количества проходов материала через измельчитель представлены на рисунке 6. После третьего прохождения удельная поверхность и средний диаметр частиц цемента изменялись мало, поэтому дальнейшее измельчение при данной частоте вращения ротора нецелесообразно.



Рисунок 6 – Показания ПСХ-10А после одно-, двух- и трехкратного прохождения частиц цемента через измельчитель

В результате измельчения цемента в многоступенчатом измельчителе ударного действия получены результаты, доказывающие его эффективность. Так, например, за три прохода через измельчитель была получена удельная поверхность, соответствующая оптимальной поверхности для портландцементов, принятой в пределах 5000...6000 см^2/г. Результаты экспериментальных исследований показаны на рисунке 7.

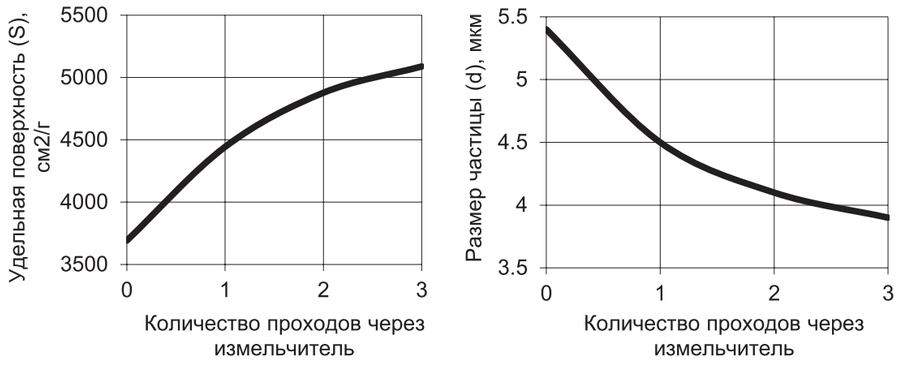


Рисунок 7 – Кинетика измельчения цемента в многоступенчатом измельчителе

Также сравнение с проведенным ранее измельчением цемента в вибрационной мельнице, при котором за счет длительного измельчения (≈80 мин) была получена удельная поверхность 5300 см^2/г при среднем диаметре частиц d=3,4 мкм, позволяет говорить об энергоэффективности измельчения ударом, так как суммарное время измельчения в многоступенчатом измельчителе ударного действия составило 1 мин, а соответствующие энергозатраты на измельчение при мощности двигателя 1 кВт - 1 кВт/мин, тогда как энергозатраты на измельчение в вибрационной мельнице при времени измельчения 80 мин и мощности двигателя 1,1 кВт составили 88 кВт/мин.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23488405 «Разработка инновационного оборудования для измельчения материалов с повышенной эффективностью»).

Выводы

Удар является эффективным способом, а измельчители ударного действия - перспективным оборудованием для тонкого и сверхтонкого измельчения. Разработаны механико-математическая модель процесса измельчения ударом, позволяющая определять и оценивать параметры процесса измельчения и измельчителя, и измельчитель тонкого измельчения ударного действия с повышенной энергонапряженностью воздействия и оригинальной схемой многоступенчатого измельчения. Получена инженерная методика определения количества воздействий на частицы и времени измельчения, количества ступеней измельчения и проходов через измельчитель для измельчения материала от исходной до требуемой крупности. Экспериментально доказана работоспособность, эффективность, возможность практического использования и наличие потенциала для совершенствования многоступенчатого измельчителя ударного действия. Обеспечено измельчение частиц до требуемого размера за один проход через измельчитель, снижены время и, предположительно, затраты энергии на измельчение. Результаты, полученные в работе, являются основой для дальнейших исследований процессов тонкого и сверхтонкого измельчения материалов ударом, поиска возможностей экономичного измельчения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Вердмян, М. А., Каферов, В. В.** Процессы измельчения твердых тел. – В кн.: Процессы и аппараты химической технологии. – М. : – 2007, Т. 5. – С. 5–89.

2 **Сиденко, П. М.** Измельчение в химической промышленности. – М. : Химия, 2007. – 368 с.

3 **Kerry Johanson.** Selecting the proper mill for your product: Understanding breakage behavior is crucial in mills // Chemical Engineering, Vol. 120. – Issue 11. – Nov. 2013.

4 Современное помольное оборудование. // Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов : сб. науч. ст. / под ред. И. П. Сивина. – М. : Химия, 2010. – 62 с.

5 **Акунов, В. И.** О выборе оптимальных типов измельчителей // Строительные материалы, 2012. – № 11. – С. 21-22.

6 **Голосов, С. И.** Принципиальные основы измельчения. // Механохимические явления при измельчении. – Новосибирск : Институт геологии и геофизики СО РАН, 2001. С. 23–40.

7 **Демидов, А. Р., Чирков, С. Е.** Способы измельчения и оценка их эффективности. – М. : ЦИНТИ, 2009. – 49 с.

8 **Гийо, Р.** Проблема измельчения материалов и её развитие. – М. : Стройиздат, 2004. - 112 с.

9 **Румпф, Г.** Об основных физических проблемах при измельчении / Труды Европейского Совещания по измельчению. – М. : Стройиздат, 1966. С. 7–40.

10 **Оспанов А. А., Тлеганов Ш. К.** Основы эффективного измельчения и механики разрушения. − Алматы, 2000. − 107 с.

11 **Лескин А. Д.** Основные закономерности измельчения материалов. // Современное измельчительное оборудование: Обз. инф. - Вып. 3, серия 7. Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов. – М. : ВНИИОСМ, 2008. – С. 2–14.

12 **Григорьевых, Д. П., Хохлов, Н. И., Петров, И. Б.** Расчет динамического разрушения в твердых деформируемых телах. // Математическое моделирование. – 2017. – том 29. – № 4. – С. 45–58.

13 **Партон В. З.** Механика разрушения. От теории к практике. – М. : Наука, 1990. – 240 с.

14 **Guryanov G. A., Abdeev B. M.** The applied model of grinding a spherical solid particle with a direct impact on a non-deformable flat surface. // PNRPU Mechanics Bulletin, 2020. – № 1. – P. 32–42.

15 **Dey S., Dey S., Das A.** Comminution features in an impact hammer mill. // Powder Technology, 2013. – 235. – P. 914–920.

16 **Вайтехович, П. Е.** Измельчители дезинтеграторного типа с регулируемой тониной помола // Вестник Полоцкого государственного университета, 2020. – № 3. Серия В.

17 **Гурьянов, Г. А., Клименко, Е. А.** Об одном подходе к интенсификации процесса помола. // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева / Научный журнал / 2013. № 1 (59). С. 27–35.

REFERENCES

1 **Verdmyan, M. A., Kaferov, V. V.** Protsessy izmelchenia tverdykh tel [The processes of crushing solids]. – V kn.: Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. – Moscow, 2007. – T.5. – P. 5–89.

2 **Sidenko, P. M.** Izmelchenie v khimicheskoy promyshlennosty [Grinding in the chemical industry]. – Moscow : Khimia, 2007. – 368 p.

3 Kerry Johanson. Selecting the proper mill for your product : Understanding breakage behavior is crucial in mills // Chemical Engineering, Vol. 120, Issue 11, Nov. 2013.

4 Sovremennoe pomolnoe oborudovanie [Modern grinding equipment]. // Promyshlennost nerudnykh i nemetallorudnykh materialov: Sb. nauch. st. / pod red. I. P. Sivina. – Moscow : Khimia, 1990. – 62 p.

5 **Akunov V. I.** O vybore optimalnykh tipov izmelchiteley [On choosing the optimal types of grinders] // Stroitelnye materialy, 2012. – № 11. – P. 21–22.

6 **Golosov S. I.** Printsipialnye osnovy izmelchenia [The fundamental principles of grinding] // Mekhanokhimicheskie yavlenia pri izmelchenii. – Novosibirsk: Institut geologii i geofiziki SO RAN, 2001. – P. 23–40.

7 **Demidov A. R., Chirkov S. E.** Sposoby izmel′chenia i otsenka ikh effektivnosti [Grinding methods and evaluation of their effectiveness]. – Moscow : TSINTI, 2009. – 49 p.

8 **Giio, R.** Problema izmelchenia materialov i ee razvitie [The problem of grinding materials and its development]. – Moscow : Stroiizdat, 2004. – 112 p.

9 **Rumpf, G.** Ob osnovnykh fizicheskikh problemakh pri izmelchenii [On the main physical problems in grinding] / Trudy Evropeiskogo soveschania po izmelcheniju. – Moscow : Stroiizdat, 1966. – P. 7–40.

10 **Ospanov A. A., Tleganov Sh. K.** Osnovy effectivnogo izmelchenia i mekhaniki razrushenia [Fundamentals of effective crushing and fracture mechanics]. – Almaty, 2000. – 107 p.

11 **Leskin A. D.** Osnovnye zakonomernosti izmelchenia materialov [The main regularities of grinding materials]. // Sovremennoe izmelchitelnoe oborudovanie: Obz. inf. - Vyp. 3, seria 7. Promyshlennost nerudnykh i nemetallorudnykh materialov. – Moscow : VNIIOSM, 2008. – P. 2–14.

12 **Grigorievyh D. P., Khokhlov N. I., Petrov I. B.** Raschet dinamicheskogo razrushenia v tverdykh deformiruemykh telakh [Calculation of dynamic destruction in deformable bodies] // Matematicheskoe modelirovanie. – 2017. – T. 29. – № 4. – P. 45–58.

13 **Parton V. Z.** Mekhanika razrushenia [Mechanics of fracture]. Ot teorii k praktike. – M. : Nauka, 1990. – 240 p.

14 **Guryanov G. A., Abdeev B. M.** The applied model of grinding a spherical solid particle with a direct impact on a non-deformable flat surface. // PNRPU Mechanics Bulletin, 2020. – №. 1. – P. 32–42.

15 **Dey S., Dey S., Das A.** Comminution features in an impact hammer mill. // Powder Technology, 2013. – 235. – P. 914-920.

16 **Vaitekhovich, P. E.** Izmelchiteli dezintegratornogo tipa s reguliruemoy toninoy pomola [Disintegrator type grinder with adjustable grinding fineness] // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta, 2020. – № 3. Seria V.

17 **Guryanov, G. A., Klimenko, E. A.** Ob odnom podkhode k intensifikatsii protsessa pomola [One approach to the intensification of the grinding process]. // Vestnik VKGTU im. D. Serikbaeva / Nauchnyi zhurnal / 2013. – № 1 (59). – P. 27–35.

Г. А. Гурьянов[1], А. В. Вавилов[2], М. В. Дудкин[3],
А. В. Ликунов[4], О. Ю. Васильева[5]
[1,2,3,4]«ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі ЖШС»,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
[5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

СОҚҚЫ ӘРЕКЕТІН ҰСАҚТАҒЫШТАҒЫ ҰСАҚ ҰНТАҚТАУ ПРОЦЕСІН ЕСЕПТЕУ МОДЕЛІ МЕН ӘДІСТЕМЕСІ

Материалдарды ұнтақтау тәсілдерін, ұнтақтау қиындықтарын және қолданыстағы ұсақтағыштарды талдау негізінде соққыны жою әдісін, сондай-ақ жоғары жылдамдықты ұсақтағыштарды жұқа және өте жұқа ұнтақтау үшін қолданудың орындылығы негізделген. Ағаш пішінімен модельденген материал бөлшектерінің соққысын жоюдың механикалық-математикалық моделі жасалды, бұл ұнтақтау процесінің нәтижесін болжауға және ұсақтағыштардың ұтымды параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді. Бөлшектердің көлемін, ұнтақтау шегін, жұмыс органының әсер ету мөлшерін және бөлшектерді бастапқы мөлшерден соңғы мөлшерге дейін ұнтақтауға, ұнтақтау процесінің параметрлерін реттеуге кететін уақытты бір жұмыс органының әсерінен бұзылатын кернеулерді теориялық есептеу үшін қарапайым функционалды қатынастар түрінде инженерлік әдіс ұсынылады. Көп сатылы ұсақтаудың бастапқы ұйымдастырылуымен және процестің жоғары энергия кернеуімен соққы әрекетін ұсақтағыштың дизайны ұсынылған. Ұсынылған есептеу әдістемесін толықтыратын, ұсақтағыштың жұмыс қабілеттілігін, тиімділігін және практикалық қолдану мүмкіндігін дәлелдейтін көп сатылы соққыны ұсақтағыштың эксперименттік зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. Ұсынылған көп сатылы ұсақтау схемасы мен ұсақтағыштың дизайны оларды одан әрі дамыту және жетілдіру мүмкіндіктеріне ие. Жұмыс нәтижелері материалдарды соққымен жұқа және өте жұқа ұнтақтау процестерін әрі қарай зерттеуге, үнемді ұнтақтау мүмкіндіктерін іздеуге негіз бола алады.

Кілттік сөздер: жою, ұнтақтау, ұсақтағыш, диірмен, соққы, материал, бөлшек, тиімділік.

G. A. Guryanov[1], A. V. Vavilov[2], M. V. Dudkin[3],
A. V. Likunov[4], O. Y. Vasilyeva[5]
[1,2,3,4]INNOTECH Scientific and Production Association LLP,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk
[5]D. Serikbayev East Kazakhstan technical university,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

MODEL AND METHODOLOGY FOR CALCULATING THE FINE GRINDING PROCESS IN AN IMPACT GRINDER

Based on the analysis of the methods of crushing materials, the difficulties of crushing and existing grinders, the expediency of using the impact destruction method for fine and ultrafine grinding, as well as high-speed impact grinders, is substantiated. A mechanical and mathematical model of the impact destruction of material particles modeled by the shape of the beam has been developed, which makes it possible to predict the result of the grinding process and determine the rational parameters of the grinders. An engineering method in the form of simple functional relations for the theoretical calculation of stresses, the particle volume destroyed by a single impact of the working body, the grinding limit, the number of impacts of the working body and the time required to grind the particle from the initial to the final size, and the regulation of the parameters of the grinding process is proposed. The design of an impact grinder with an original organization of multi-stage grinding and increased energy stress of the process is proposed. The results of experimental studies of the multi-stage impact grinder, complementing the calculation method and proving the operability, efficiency and the possibility of practical use of the grinder, are presented. The proposed original multi-stage grinding scheme and the design of the grinder have opportunities for their further development and improvement. The results of the work can serve as a basis for further research on the processes of fine and ultrafine grinding of materials by impact, and the search for economical grinding possibilities.

Keywords: destruction, grinding, grinder, mill, impact, material, particle, efficiency.

МРНТИ 55.15.23
DOI

К. К. Елемесов[1], Б. С. Бейсенов[2], *Д. Д. Басканбаева[3], Е. Е. Сарыбаев[4], Д. Е. Балгаев[5]
[1,2,3,4,5]Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6168-2787
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6501-6746
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1688-0666
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6665-4558
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9278-7653
*e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university

ҚҰЙМА СИЛИКОНДАРДЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада полимербетоннан жасалған бұйымдарды құюға арналған қалыптық жабдықты дайындауда қолданылатын құйма силикондар туралы ақпаратты талдау ұсынылған. Әртүрлі силикон түрлерінің сипаттамалары, соның ішінде Шор қаттылық көрсеткіштері, үзілу кезіндегі ұзарту, сызықтық шөгу және құймалардың дәлдігіне, тозуға төзімділігіне және сапасына әсер ететін басқа да қасиеттері сипатталған. Лабораториялық сынақтар бес түрлі силикон маркаларына жүргізілді: Силагерм 5045, Силагерм 6070П, Пентэласт 710, SilcoTin 40 және PolyFlex 80. Сынақтарды жүргізу әдістемелері және алынған нәтижелердің салыстырмалы талдауы ұсынылған.

Зерттеу мақсаты – әртүрлі мақсаттағы құю қалыптарын жасауға қолданылатын материалдардың физикалық қасиеттерін зертханалық анықтау және салыстыру. Эксперименттік деректер негізінде бұйымдардың өлшемі мен конфигурациясына байланысты силиконды таңдау бойынша ұсыныстар берілген. Кішігірім қалыптар үшін жұмсақ компаундтарды пайдалану ұсынылса, ірі қалыптар үшін жоғары қаттылықтағы силикондарды қолдану ұсынылады. Бұл жұмыс полимерлі материалдардан құю саласында қалыптық жабдықты әзірлеумен және пайдаланумен айналысатын мамандар үшін пайдалы болуы мүмкін.

Бұл сынақ үшін силикондар дайындалды. Ол үшін бірдей қалыпқа силикондар құйылып, нұсқаулық пен қауіпсіздік техникасын қатаң сақтадық. «Силикондық парақтар» қатқаннан кейін, олардан екі жақты қалақша пішініндегі жыртылу сынағы үшін қажетті формалар кесілді. Ал Шор қаттылығын анықтау үшін парақтың қалған бөлігі қолданылды.

Кілтті сөздер: құйма силикон, екі компонентті компаунд, құю қалыптары, қаттылыққа сынау, созылу сынағы.

Кіріспе

Полимерлі материалдардан бұйымдар өндіру кезінде қалыптаушы жабдық маңызды рөл атқарады. Ол өңдеу әдісіне байланысты тұйық немесе ашық қалып, жартылай қалып, өтпелі қалып және т.б. түрінде болуы мүмкін. Жабдықтың мақсаты – бұйымға белгіленген форма мен өлшемдер беру, сондай-ақ оңтайлы техникалық қасиеттерді қамтамасыз ету [1, 144-б.].

Полимерлерден бұйымдарды қалыптау әдістерінің бәрінде (экструзия, үрлеумен экструзия, қысыммен құю, компрессиялық престеу, термоқалыптау және еркін құю) қалыптаушы жабдық ауыспалы болып табылады [2, 432-б.]. Ол болашақ бұйымның сызбаларына сәйкес жобаланып және дайындалады [3, 640-б.].

Құрылғыға орнату және оған қосу үшін қалыптаушы жабдық осы құрылғыға сәйкес келетін тораптарға ие болуы тиіс, яғни жабдық нақты бұйымдар мен құрылғыларға арналған түрде жобаланады.

Материалдар мен әдістер

Полимер бұйымдарын қалыптауға арналған технологиялық жабдықты құрастыру ерекшеліктері өңделетін полимердің реологиялық және жылу-физикалық қасиеттерімен анықталады: оның тұтқырлығы, жылуөткізгіштігі, шөгуі және басқа да қасиеттері, сондай-ақ қабылданған қалыптау технологиясы.

Формалаушы жабдықтың ең маңызды элементі – полимер массасына қажетті пішін мен сыртқы көрініс беретін қалыптаушы беті.

Формалаушы жабдықты жобалау және жасау – арнайы білім мен тәжірибені қажет ететін күрделі процесс [4, 280-б.]. Әсіресе, ірі габаритті бұйымдарды өндіруге арналған құю қалыптары күрделі, мысалы, аспаптық панельдер немесе автокөлік бамперлері. Қазіргі заманғы технологиялар сәйкес бағдарламалық қамтамасыз етуді пайдалана отырып, қалыптарды автоматты түрде жобалауға мүмкіндік береді [5, 256-б.].

Көбінесе, икемді құю қалыптарын жасау кезінде қолданылатын құю силикондарының механикалық қасиеттерінің ауытқуы бұйымдардың сыртқы көрінісінде айтарлықтай ақауларға әкеледі: шөгу, созылу, жарықтар және т.б.

Осыдан шығатыны, күрделі конфигурациялы бұйымдардың көп рет көшірмесін жасау үшін силиконды дұрыс таңдау өте маңызды.

Силикон маркасын дұрыс таңдау, зертханалық жағдайларды ескере отырып, араластыру технологиясын дәл сақтау арқылы қажетті құрылымға, қажетті форма мен өлшемдерге ие және оңтайлы пайдалану сипаттамалары бар бұйымдар алуға болады.

Құю қалыптарын жасауға арналған силикондар – жоғары ылғалдылыққа және температураның ауытқуларына төзімді мықты және берік материалдар. Қалыптардың әртүрлі мақсаттары үшін қолданылатын силикондардың таңғажайып әртүрлілігі бар. Силиконның беріктігі мен қаттылығына байланысты үлкен айырмашылықтар бар, сондықтан силиконды таңдау кезінде бұйымның өлшемдері мен материалы ескерілуі керек. Мысалы, үлкен модельдер үшін жұмсақ силиконды таңдасақ, форма ұлғайып, силиконды сығады, сондықтан форма дәл болмайды.

Эластомер – қалып жасаушылар арасында танымал материал, оны өз қолыңызбен жасау оңай. Қалып жасау үшін екі компонентті силиконды компаундтар қолданылады: негізгі силикондық құрамы + катализатор. Бұл материал оңай араласады және компоненттердің мөлшерін аздап бұзуға мүмкіндік береді. Қалыптар бөлме температурасында қатаяды. Олар орташа беріктікке ие және құю материалының температурасының кең диапазонында 2000-ға дейін құюды көтереді. Егер платина негізіндегі сапалы силиконды қарастырсақ, бұл қалыптар 5000 құюға дейін төзімді.

Екі компонентті сұйық силикондар.

Екі компонентті сұйық силикондар әртүрлі материалдарды құюға арналған қалыптарды жасау үшін қолданылады. Сондай-ақ, силикондарды маскалар, қуыршақтар, тығыздағыштар, телефон чехолдары және басқа да көптеген бұйымдарды жасау үшін қолдануға болады.

Силикондардың ассортименті өте кең, сол сияқты олардың қолдану саласы да әртүрлі.

Қалыптарға арналған силикон – бұл икемді молдтарды жасауға арналған сұйық екі компонентті материал. Бұл материалдан жасалған матрицалар жыртылуға төзімді болып келеді және көп реттік пайдалану үшін жарамды.

Қалыпқа арналған сұйық силикон екі компоненттен тұрады: негізгі масса және қатайтқыш (катализатор). Негізгі массаға катализатор қосылғаннан кейін ғана қатая бастайды, ал оған дейін сұйық күйде болады. Катализаторлардың екі түрі бар: қалайы негізінде және платина негізінде:

“Қалайы негізіндегі силикондар” төмен баға мен аз шөгуімен ерекшеленеді. Мұндай силикондардың қызмет ету мерзімі қысқа, әсіресе агрессивті орта (сұйық пластик, полиэфирлі шайырлар және т.б.) құйылған кезде қысқарады. Уақыт өте келе қалып морт сынғыш болып, шөгуге ұшырайды. Силикон гипс, полиуретан, шайыр, парафин, балауыз және сұйық пластик құюға жарамды. Қызмет ету мерзімін ұзарту үшін силикон майын қолдануды ұсынамыз.

Платина катализаторы негізіндегі силикондар қымбаттау және шөгусіз болып келеді. Ұзақ уақыт қолдануға арналған, жылу төзімділікке ие. Негізгі артықшылығы – тағам өнеркәсібінде қолдану мүмкіндігі.

Кесте 1 – Силикондардың негізгі айырмашылықтары

Платина негізіндегі силикондар	Қалайы негізіндегі силикондар
Шөгусіз материал, кейбір түрлерінде шөгу 0,2%-дан аспайды	Шөгу жоқ
Қалыптың қызмет ету мерзімі құю санына және материалға байланысты: гипс үшін шамамен 1000 құю, сұйық пластик үшін 30-100 құю. Mold Max силиконының көрсеткіштері жоғары: гипс үшін 3000 құю, пластик үшін 200-300 құю.	Қызмет ету мерзімі де құю саны мен материалға байланысты, бірақ «қалайы» силикондармен салыстырғанда әлдеқайда көп рет пайдалануға болады
Күкіртті материалдарға тұрақсыз	Күкіртті материалдарға тұрақсыз
Катализатордың мөлшерін көбейту немесе сәл жылыту арқылы қатуды жылдамдатуға болады	Жылыту арқылы қатуды жылдамдатуға болады
Аз шығынды	Тамақ өнеркәсібі мен кинематографияда қолдану: қалыптар мен маскалар жасау, терімен байланысқа қауіпсіз.

Силиконның негізгі сипаттамалары:

Қаттылық

Қаттылық – бұл материалдың пластикалық деформацияға төтеп беру қабілеті, әдетте қаттырақ дененің материалға енуі нәтижесінде пайда болады.

Бұл параметр Альберт Шор шкаласы бойынша енгізу әдісімен анықталады. ASTMD 2240 стандартына сәйкес, өлшеудің 12 шкаласы бар. Көбінесе А шкаласы (жұмсақ материалдар үшін) немесе D шкаласы (қатты материалдар үшін) қолданылады.

Силикон компаундының атауында қаттылық әдетте цифрмен көрсетіледі, мысалы: 15 саны А шкаласы бойынша Шор әдісімен анықталған қаттылық мәнін білдіреді (жұмсақ материалдар үшін).

Силикон компаундтарының қаттылық көрсеткіштері 10-нан 70-ке дейін өзгеруі мүмкін: 10-15 қаттылықтағы силикондар – шағын және жеңіл бұйымдарды құю үшін: сабын, шам, лепнина; 20-70 қаттылықтағы силикондар – ірі және ауыр бұйымдарды жасауға қолданылады.

Өмір сүру уақыты (жұмсақтық уақыты)

Өмір сүру уақыты – силиконның сұйық күйінде қалатын уақыты.

Қалайы негізіндегі силикондарда катализаторды көп қосқан сайын өмір сүру уақыты қысқарады. Әдетте, қаттылығы жоғары силиконның өмір сүру уақыты қысқа болады. Өндірушілер көбінесе «идеалды уақытты» 25-30 минут деп көрсетеді (белгілі температурада және компоненттерді дәл өлшеу кезінде).

Біз, қаттылық пен катализаторға байланысты, силиконды араластырып және құюды 7–15 минут ішінде аяқтауды ұсынамыз.

Тұтқырлық

Төмен тұтқырлықтағы силикондар сұйықтығы жоғары болып келеді. Төмен тұтқырлық жұмысты жеңілдетеді, бірақ әдетте мұндай силикондар төмен қаттылыққа ие. Жұмыс процесін оңайлату үшін тұтқырлығы төмен силикондарды қолдану ұсынылады.

Жыртылуға төзімділік

Бұл сипаттама силиконның кейіннен жүктеме болатын бөлшектерді жасауға жарамдылығын көрсетеді. Жыртылуға төзімділігі жоғары силикондар қалыптар үшін өте қолайлы, өйткені олар ұзақ қызмет етеді.

Сызықтық шөгу

Құйманың қалыптасу процесінде көлем мен сызықтық өлшемдердің азаюы пайызбен көрсетіледі. Мысалы, биіктігі 300 мм қалыпқа 1% сызықтық шөгуі бар компаунд құйылған жағдайда, силикон полимеризациядан кейін биіктік 0,3 мм-ге азаяды.

Үзілу кезіндегі ұзарту

Бұл силиконның үзілу алдында қаншалықты созылатынын көрсететін параметр. Параметрдің жоғары болуы силиконның сапалы екенін көрсетеді.

Түсі

Түс силиконның біркелкі араласуын бақылау үшін және қалыптардың танымалдылығын арттыру үшін қолданылады. Көптеген өндірушілер компонент А

немесе В-ға түс қосады. Бізде полимерлі материалдарға арналған арнайы бояғыш пасталар да бар, олар түрлі-түсті қалыптарды жасауға мүмкіндік береді.

Ингибиторлар

Қатудың реакциясына әртүрлі материалдар (ингибиторлар) айтарлықтай әсер етуі мүмкін:

– Полиэфирлі шайыр;
– Латекс;
– Күкірт;
– Алкидті лак;
– Спирт;
– Төмен температура.

Құю силикондарын қолдану үшін ең жақсы қасиеттерді анықтау мақсатында әртүрлі құю силикондары таңдалып, бірдей қалыпқа құйылды. Бұл қалыптар кейінгі сынақтар үшін пайдаланылды.

Зерттеу үшін біз келесі 5 түрлі силиконды таңдадық:

1 Силагерм 5045
2 Силагерм 6070П
3 Пентэласт 710
4 SilcoTin 40
5 PolyFlex 80

Силагерм 5045 – суық қататын екі компонентті құюға арналған полиуретанды компаунд, әртүрлі бұйымдарды жасауға арналған: гипс, бетон (тек бөлу майларын қолдану арқылы), қату температурасы +110°С-тан аспайтын әртүрлі шайырларды құю қалыптары. Ол жасанды тас, тротуар плиткасы, гипс пен бетоннан жасалған әртүрлі архитектуралық және көркем бұйымдарды өндіруде икемді қалыптарды жасау үшін (бөлу құрамдарын - эмульсол, солидол және т.б. пайдалану арқылы), сондай-ақ техникалық мақсаттағы бұйымдарды жасау үшін қолданылады.

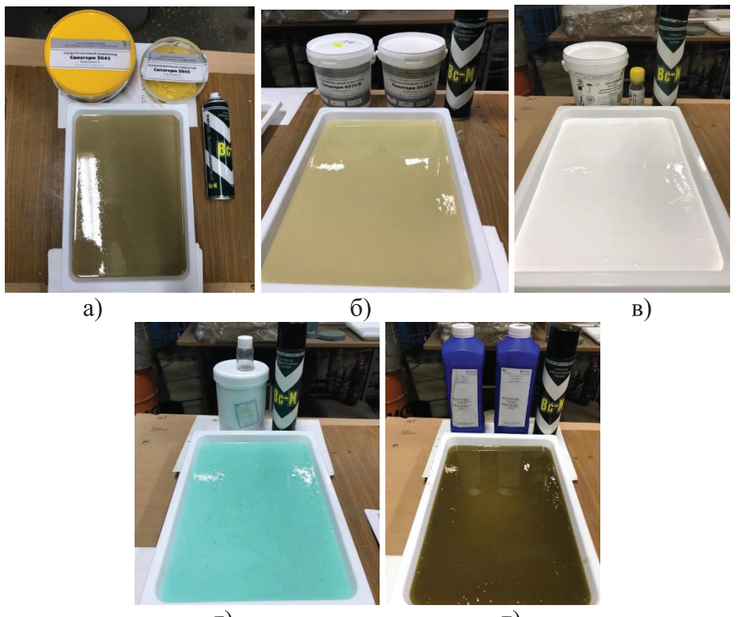
Силагерм 6070П – суық қататын полиуретанды компаунд, икемді және тозуға төзімді бұйымдар мен жабындарды жасауға арналған, агрессивті ортада жұмыс істейді: табиғи газ, су, қышқылдар, сілтілер, еріткіштер. Материал жоғары абразивті төзімділікке ие, дірілді сөндіру қабілеті жоғары, әртүрлі беттерге тамаша адгезия көрсетеді. Ол агрессивті ортада жұмыс істейтін тозуға төзімді бұйымдар мен жабындарды жасауға арналған. ПУ бұйымдарының жұмыс температурасы -60°С-тан +110°С-қа дейін.

ПЕНТЭЛАСТ-710 – күрделі конфигурациялы бұйымдардың көп рет көшірмесін жасауға арналған икемді құю қалыптарын жасауға арналған компаунд. «ПЕНТЭЛАСТА-710» құю қалыптары ұзақ уақыт бойы 200°С-тан аспайтын температурада пайдаланылуы мүмкін. 200°С-тан жоғары температурада қолдану белгілі бір уақыт өткеннен кейін икемділіктің жоғалуына әкеледі. 250°С-тан жоғары қыздыру ұсынылмайды. «ПЕНТЭЛАСТ-710» – ақ түсті тұтқыр ағынды композиция, катализатормен бірге негізгі қоспа түрінде жеткізіледі.

«ПЕНТЭЛАСТ-710» компаундының қатуы бөлме температурасында 24 сағат ішінде резина тәрізді күйге дейін жүзеге асады.

Қалайы негізіндегі силикон компаунды SilcoTin – сұйық силикон және қалайы негізіндегі қатайтқыш, әртүрлі тұтқырлық пен қаттылыққа ие Шор шкаласы бойынша А (10, 15, 20, 25, 30, 40), бөлме температурасында қатады, компоненттер арақатынасы 100:2. Ерекше ағындылыққа, қолданудың қарапайымдылығына және ыңғайлылығына, жеңіл шығару мүмкіндігіне ие. Жақсы созылғыштық, икемділік, жыртылуға төзімділік және аз шөгу көрсетеді. Жоғары көп рет пайдаланушылық және ұзақ мерзімді пайдалану мүмкіндігімен ерекшеленеді. Құрамы: диметикон (Dimethicone) – 50 % және ақ күйе (White carbon black) – 50 %. Икемді қалыптарды жасау үшін қолданылады.

PolyFlex 80 – итальяндық өндірістегі екі компонентті полиуретанды жүйе, бөлме температурасында қататын, төмен тұтқырлыққа ие, бетон, гипс, пенополиуретан және полиуретанды пластиктер, балауыз, сабын және басқа құю материалдары үшін қалыптар мен штамптар жасауға қолданылады [6, 320-б.]. PolyFlex полиуретаны резина-техникалық мақсаттағы әртүрлі бұйымдарды жасау үшін де қолданылады [7, 312-б.].



а) б) в)

г) д)

а – Силагерм 5045, б – Силагерм 6070П,
в – Пентэласт 710, г – SilcoTin 40, д – PolyFlex 80

1-сурет – Бірдей қалыпқа құйылған силикондар

Ең алдымен, сынақ үшін силикондар дайындалды. Ол үшін бірдей қалыпқа силикондар құйылып, нұсқаулық пен қауіпсіздік техникасын қатаң сақтадық (1-сурет). «Силикондық парақтар» қатқаннан кейін, олардан екі жақты қалақша пішініндегі жыртылу сынағы үшін қажетті формалар кесілді. Ал Шор қаттылығын анықтау үшін парақтың қалған бөлігі қолданылды.

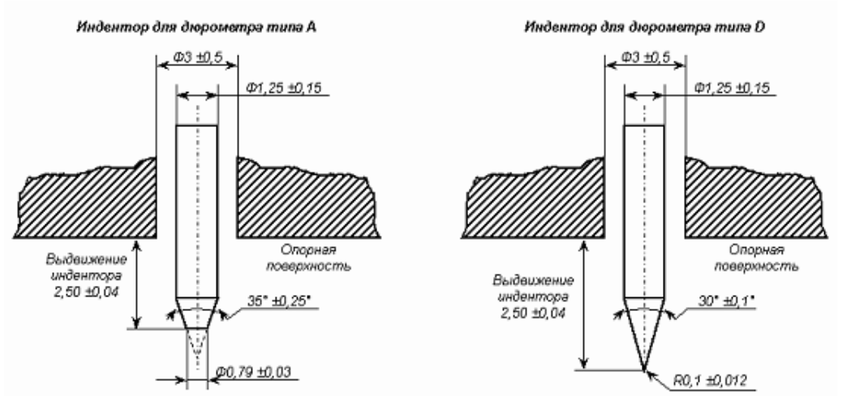
Қаттылық – бұл материалдың жергілікті контактілік әсерден пластикалық деформацияға төтеп беру қасиеті, әдетте қаттырақ дененің материалға енуі нәтижесінде пайда болады.

Шор қаттылығын өлшеу құралы алғаш рет 1920 жылдары әзірленді. Бұл құрал дюрометр деп аталады.

Құралдың орталықта тесігі бар тірек алаңы, индендор (яғни батырғыш) және оған белгілі бір күш түсіретін калибрленген серіппесі бар.

Аппараттың соңғы элементі – индикатор. Ол индендор «тұмсығының» тірек бетінен шығып кету дәрежесін анықтайды.

Құралда бірнеше өлшеу шкаласы бар. Негізгі екі шкала – A және D. Бұл бөлініс тәжірибелердің дәлдігін қамтамасыз етеді, өйткені әртүрлі қаттылықтағы материалдар сынаққа түседі. Жұмсақ материалдар A шкаласымен тексеріледі, ал қаттылығы жоғары және серпімді материалдар D шкаласымен өлшенеді.



2-сурет – A және D типті дюрометрлерге арналған индендорлардың сызбалары

Шор қаттылығын өлшеу сыртқы жағдайларға назар аударуды талап етеді. Кейбір полимерлер, мысалы, ауа ылғалдылығына немесе тікелей күн сәулесінің әсерінен жұмсарып кетуі мүмкін. Материалдың параметрлеріне әсер ететін факторларды жою қажет. Осы мақсатта ISO стандарттары қолданылады [8, 288-б.].

Сынақ үлгісінің қалыңдығына қойылатын талаптар да бар. Ол 6 миллиметрден кем болмауы тиіс. Материалдың ені кез келген шетінен кемінде 12 миллиметр қашықтықты қамтамасыз етуі керек. Үлгінің тегістігі де маңызды. Кедір-бұдыр материалдар тірек бетіне тығыз жанаспай, өлшеу нәтижелерін бұрмалауы мүмкін.

Мысалы, полиуретанның Шор қаттылығын анықтау үшін дюрометрді тігінен орналастырады. Бұл кезде индендордың «тұмсығы» үлгінің шетінен дәл сол 12 миллиметр қашықтықта болуы тиіс. Тірек бетті үлгіге мүмкіндігінше тезірек, бірақ сілкілеусіз басып, беттердің параллельдігін сақтау қажет. Тірек бетке қысым түсіріп, сынақ материалына сенімді жанасуды қамтамасыз ету үшін жүк пайдаланылады, бірақ қолмен басу да рұқсат етіледі.

Лездік өлшеу 1 секунд ішінде жүргізіледі. Дегенмен, әдетте көрсеткіштер 15 секундтан кейін алынады. Дәлдік үшін беткі қабаттың әртүрлі нүктелерінде 5 өлшем жасалады. Орташа мән қаттылық көрсеткіші болып табылады. Ол 0-ден 100-ге дейін болуы мүмкін. Бұл Шор қаттылығының шкаласы.

Кафедра полигонында зерттеу жүргізу үшін (3-сурет) Шордың дюрометрі пластомер негізінде жасалды (реактопласттардың тұтқыр-пластикалық қасиеттері мен қату жылдамдығын өлшейтін құрылғы). Өлшеу жүргізу үшін конустың орнына A түріндегі индентор орнатылды. Жүктеме ретінде сағаттық индикатордың өзегіне 1 кг салмақтағы жүк әсер етті.



3-сурет – Шор әдісі бойынша қаттылықты сынау

Созылуға сынақ жүргізу үшін кафедра полигонында орнатылған (4а-сурет) максималды күші 100 кН болатын қолмен басқарылатын гидравликалық пресс қолданылды.

Полимерлік материалдарды созуға сынау температурасы 23±2°C кезінде МЕСТ 11262–80 [9, 1-б.] және МЕСТ 9550–81 [10, 1-б.] стандарттарына сәйкес жүргізілді. Сынақ алдында жұмыс бөлігіндегі үлгінің енін және қалыңдығын 0,01 мм дәлдікпен кемінде үш жерде өлшеп, көлденең қиманың ауданын есептеді. Есептеу кезінде ең кіші көлденең қима ауданы қабылданды [11, 1-б.].

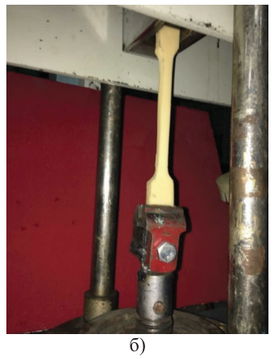
Сынақ алдында үлгіге қажетті белгілер қойылды (үлгіні зақымдамай), ол оның базасын және қысқыш шетіне орналасуын анықтады [12, 47-52 бб.]. Үлгілерді сынақ машинасының қысқыштарына шетіне қарай орналасуын анықтайтын

белгілерге сәйкес бекітті, осылайша қысқыштардың бойлық осьтері мен үлгінің осі бір-бірімен және қозғалмалы қысқыштың қозғалыс бағытымен сәйкес келді. Қысқыштарды біркелкі қатайтты, үлгінің сынақ барысында сырғып кетуіне жол бермей, бірақ бекіту орнында бұзылмауын қамтамасыз етті [13, 84-89 бб.].

Содан кейін деформацияларды өлшеу құрылғысы реттелді. Кейін үлгіге біртіндеп артатын жүктеме беріліп, оның мәні динамометр шкаласы бойынша белгіленді. Жүктеу жылдамдығы беріктік пен салыстырмалы қалдық ұзартуды анықтау кезінде 25 мм/мин құрады. Үлгі бұзылған сәтте ең үлкен күш белгіленіп, созылу беріктігі анықталды [14, 37- 51].



а)



б)

а) гидравликалық пресс; б) №2 үлгінің созылу мысалы

4-сурет – Созылу сынағы

Нәтижелер және талқылау

Шор бойынша қаттылық өлшемдерінің нәтижелері 2-кестеге енгізіліп, орташа мәндері есептелді және ілеспе құжаттардағы деректер келтірілді.

2-кесте – Шор бойынша қаттылық өлшемдерінің салыстырмалы кестесі.

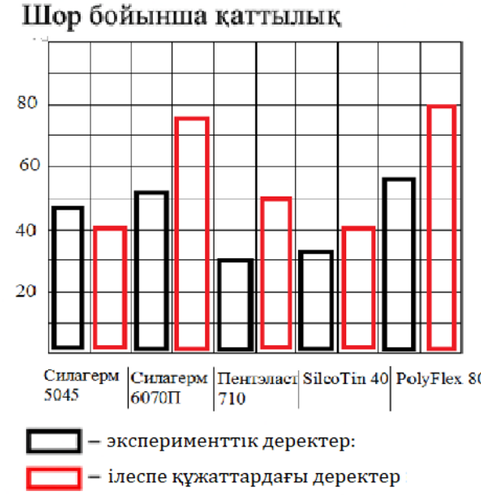
№	Силикон маркасы	Шор бойынша қаттылық өлшеу деректері		Орташа арифметикалық	Ілеспе құжаттардағы Шор бойынша қаттылық мәндері
1	Силагерм 5045	1.1	48	47,6	40±3
		1.2	49		
		1.3	46		
2	Силагерм 6070П	2.1	52	52,3	70…75
		2.2	53		
		2.3	52		
3	Пентэласт 710	3.1	30	30	30…50
		3.2	29		
		3.3	31		

4	SilcoTin 40	4.1	32	33	40
		4.2	34		
		4.3	33		
5	PolyFlex 80	5.1	56	56,3	80
		5.2	58		
		5.3	55		

Кесте деректерін талдау нәтижесі:

Silagerm 6070П және PolyFlex 80 маркалары бойынша қаттылық мәндерінің 35…40% жоғары болғаны анықталды;

қалған барлық үлгілер бойынша ауытқу шамалы – 15…20% аралығында.



5-сурет – Өлшеу деректері мен ілеспе құжаттардағы мәліметтер бойынша Шор қаттылығының салыстырмалы диаграммасы

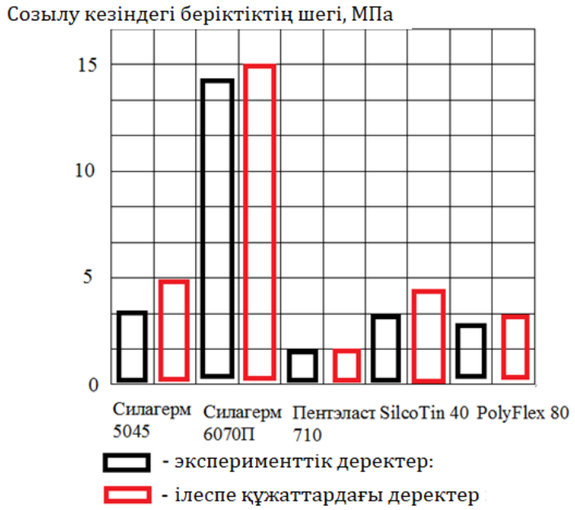
Өлшеу материалдарына сүйене отырып, силикон маркаларын қолданбас бұрын олардың қаттылығын бақылау мақсатында алдын ала өлшеулер жүргізу қажет екенін айтуға болады. Себебі, қаттылықтың көрсетілген мәндерден айтарлықтай ауытқуы байқалады. Бұл ауытқулар зертханадағы температура, компоненттер арақатынасының дәлдігі, араластыру сапасы және басқа да факторларға байланысты болуы мүмкін. Силикон бағасының жоғары екенін ескерсек, сапасыз (қысқа мерзімді) қалып алу қаупі өте жоғары.

Созылуға беріктік өлшеу нәтижелері

3-кесте – Созылуға беріктікті өлшеу нәтижелерінің салыстырмалы кестесі

№	Силикон маркасы	Салыстырмалы ұзарту өлшеу деректері		Арифметикалық орташа, %	Ілеспе құжаттардан алынған мәліметтер, %	Жарылу беріктігінің шекті мәнін өлшеу деректері		Арифметикалық орташа, МПа	Ілеспе құжаттардан алынған мәліметтер, МПа
1	Силагерм 5045	1.1	>200	>200	400…600	1.1	4,2	3,27	3,5…5,0
		1.2	>200			1.2	4,7		
		1.3	>200			1.3	3,9		
2	Силагерм 6070П	2.1	>200	>200	>550	2.1	14	13,67	8…15
		2.2	>200			2.2	11		
		2.3	>200			2.3	16		
3	Пентэласт 710	3.1	126	136	>120	3.1	2,1	1,66	>1,67
		3.2	134			3.2	1,3		
		3.3	150			3.3	1,6		
4	SilcoTin 40	4.1	>200	>200	350	4.1	3,1	3,0	3,8
		4.2	>200			4.2	3,0		
		4.3	>200			4.3	2,9		
5	PolyFlex 80	5.1	>200	>200	≥ 1000	5.1	2,7	2,67	2,95
		5.2	>200			5.2	2,4		
		5.3	>200			5.3	2,9		

*Лабораториялық пресс салыстырмалы ұзартуы 200%-дан аспайтын сынақтарды жүргізуге мүмкіндік береді



6-сурет – Өлшеу деректері мен ілеспе құжаттардағы мәліметтер бойынша жарылу беріктігінің салыстырмалы диаграммасы

Кесте 4 – Әртүрлі құю силикон маркаларының сынақ нәтижелері

№	Атауы	Қаттылық, IRHD	Ұзарту, см	Шөгу, %	Түсі
1	Силагерм 5045	49	үзілу	≥0,1%	қоңыр
2	Силагерм 6070П	52	30	≥0,1%	сарғыш қоңыр
3	Пентэласт 710	30	28	1-1,5%	ақ
4	SilcoTin 40	32	30	≤0,3%	көгілдір
5	PolyFlex 80	56	30	≥0,1%	қою жасыл

Қаржыландыру

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қолдауымен BR21882292 «Тұрақты құрылыс саласын интеграцияланған дамыту: инновациялық технологиялар, өндірісті оңтайландыру, ресурстарды тиімді пайдалану және технологиялық парк құру» бағдарламалық - нысаналы қаржыландыру шеңберінде орындалды.

Қорытынды

Жүргізілген сынақтардың нәтижелеріне сүйене отырып келесі ұсынымдар берілді:

Шағын қалыптарды (200х200х200 мм дейін, қабырға қалыңдығы 20 мм-ге дейін) құю үшін, беріктік сипаттамалары маңызды рөл атқармайтын жағдайларда, №3 және №4 силикондарын (Пентэласт 710, SilcoTin 40) қолдану ұсынылады.

Ірі көлемді бұйымдарды (500х500х500 мм және одан үлкен, қабырға қалыңдығы 20 мм-ден жоғары) жасау үшін жоғары қаттылыққа ие силикондар — №1, №2 және №5 (Силагерм 5045, Силагерм 6070П, PolyFlex 80) қолданылуы тиіс.

Мұндай таңдау жұмсақ силикондарды қолданған кезде қалып өлшемдерінің өзгеруіне байланысты, бұл өз кезегінде құйманың дәлдігіне әсер етуі мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Адаскин, А. М., Красновский, А. Н.** Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов. – М. : Форум, 2011. – 144 с.

2 **Соловьев, В. С.** Материаловедение и технология конструкционных материалов. – М. : Высшая школа, 2005. – 432 с.

3 **Федосеев, С. Д.** Полимерные материалы: Справочник. – М. : Химия, 1990. – 640 с.

4 **Крылов, В. И.** Справочник по формообразующей оснастке. – М. : Машиностроение, 2001. – 280 с.

5 **Мусатов, В. Д.** Формы и оснастка для литья полимерных материалов. – СПб. : Политехника, 2003. – 256 с.

6 **Журков, С. Н.** Физика и механика полимеров. – М. : Наука, 1986. – 320 с.

7 **Миронов, А. Ф.** Физико-химические свойства силиконов и кремнийорганических соединений. – М. : Наука, 1992. – 312 с.

8 **Данилов, С. И.** Испытания полимерных материалов: теория и практика. – М. : Химия, 2008. – 288 с.

9 ГОСТ 11262–80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение.

10 ГОСТ 9550–81. Пластмассы. Метод определения относительного удлинения при разрыве.

11 ISO 7619-1:2010. Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of indentation hardness — Part 1: Durometer method (Shore hardness).

12 **Резникова, Н. С., Салихов, Р. Х.** Определение физико-механических характеристик силиконов, применяемых для литья полимерных изделий // Полимерные материалы. – 2020. – № 2. – С. 47–52.

13 **Кан, Ю. А., Сергеев, Е. М.** Исследование твердости силиконовых резин по Шору и корреляция с другими механическими свойствами // Технология материалов. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 84–89.

14 **Göpferich A., Langer R.** Modeling of polymer erosion. // Advanced Drug Delivery Reviews, 1995. – Vol. 16(1), P. 37–51. → Описание механики разрушения полимеров, включая силиконы, на микроуровне (англ. источник).

REFERENCES

1 **Adaskin, A. M., Krasnovskiy, A. N.** Materialovedeniye i tekhnologiya metallicheskikh, nemetallicheskikh i kompozitsionnykh materialov [Material Science and Technology of Metallic, Non-Metallic and Composite Materials]. – Moscow : Forum, 2011. – 144 p.

2 **Solov'yev, V. S.** Materialovedeniye i tekhnologiya konstruktsionnykh materialov [Material Science and Technology of Structural Materials]. – Moscow : Vysshaya shkola, 2005. – 432 p.

3 **Fedoseyev, S. D.** Polimernyye materialy [Polymer Materials:]: Spravochnik. – M. : Khimiya, 1990. – 640 p.

4 **Krylov, V. I.** Spravochnik po formoobrazuyushchey osnastke [Handbook of Form-Generating Equipment]. – Moscow : Mashinostroyeniye, 2001. – 280 p.

5 **Musatov, V. D.** Formy i osnastka dlya lit'ya polimernykh materialov [Molds and Equipment for Casting Polymer Materials]. – SPb. : Politekhnika, 2003. – 256 p.

6 **Zhurkov, S. N.** Fizika i mekhanika polimerov [Physics and Mechanics of Polymers]. – Moscow : Nauka, 1986. – 320 p.

7 **Mironov, A. F.** Fiziko-khimicheskiye svoystva silikonov i kremniyorganicheskikh soyedineniy [Physical and Chemical Properties of Silicones and Organosilicon Compounds]. – Moscow : Nauka, 1992. – 312 p.

8 **Danilov, S. I.** Ispytaniya polimernykh materialov: teoriya i praktika [Testing Polymer Materials : Theory and Practice]. – Moscow : Khimiya, 2008. – 288 p.

9 GOST 11262–80. Plastmassy. Metod ispytaniya na rastyazheniye [Plastics. Tensile Test Method].

10 GOST 9550–81. Plastmassy. Metod opredeleniya otnositel'nogo udlineniya pri razryve [Plastics. Method for Determining Relative Elongation at Break].

11 ISO 7619-1:2010. Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of indentation hardness — Part 1: Durometer method (Shore hardness).

12 **Reznikova, N. S., Salikhov, R. Kh.** Opredeleniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik silikonov, primenyayemykh dlya lit'ya polimernykh izdeliy // Polimernyye materialy [Determination of the physical and mechanical characteristics of silicones used for casting polymer products // Polymer materials]. – 2020. – №2. – P. 47–52.

13 **Kan, Yu. A., Sergeyev, Ye. M.** Issledovaniye tverdosti silikonovykh rezin po Shoru i korrelyatsiya s drugimi mekhanicheskimi svoystvami // Tekhnologiya materialov [Study of the Shore hardness of silicone rubbers and correlation with other mechanical properties // Technology of materials]. – 2021. – T. 19, № 3. – P. 84–89.

14 **Göpferich A., Langer R.** Modeling of polymer erosion. // Advanced Drug Delivery Reviews, 1995. – Vol. 16(1), P. 37–51.

К. К. Елемесов[1], Б. С. Бейсенов[2], *Д. Д. Басканбаева[3],
Е. Е. Сарыбаев[4], Д. Е. Балгаев[5]
[1,2,3,4,5] НАО КазНИТУ имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЕЙНЫХ СИЛИКОНОВ

В данной статье приведён анализ информации по литейным силиконам, используемым при изготовлении формовочной оснастки для литья изделий из полимерного бетона. Описаны характеристики различных типов силиконов, включая показатели твердости по Шору, удлинения при разрыве, линейной усадки и других свойств, влияющих на точность, износостойкость и качество отливок. Проведены лабораторные испытания пяти марок силиконов: Силагерм 5045, Силагерм 6070П, Пентэласт 710, SilcoTin 40 и PolyFlex 80. Представлены методики проведения испытаний, а также сравнительный анализ полученных результатов.

Цель работы состоит в лабораторном определении и сравнении физических свойств материалов, применяемых для создания литьевых форм различного назначения. На основе экспериментальных данных даны рекомендации по выбору силикона в зависимости от масштаба и конфигурации изделий. Для малогабаритных форм предлагается использовать более мягкие компаунды, в то время как для крупногабаритных — силиконы с повышенной твердостью. Работа может быть полезна специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией формовочной оснастки в области литья из полимерных материалов.

После отверждения «силиконовых листов» вырезали из них нужную форму для испытания на разрыв в форме двусторонней лопаты. А для определения твердости по Шору использовали оставшуюся часть листа.

Ключевые слова: литейный силикон, двухкомпонентный компаунд, литейные формы, испытания на твердость, испытания на растяжение.

K. K. Yelemessov[1], B. S. Beisenov[2], *D. D. Baskanbayeva[3],
Y. Y. Sarybayev[4], D. Y. Balgayev[5]
[1,2,3,4,5]NJSC K.I. Satbayev KazNRTU, Republic of Kazakhstan, Almaty

STUDY OF MECHANICAL PARAMETERS OF FOUNDRY SILICONES

This paper analyzes information on casting silicones used in the manufacture of molding tooling for casting polymer concrete products. Characteristics of different types of silicones are described, including Shore hardness, elongation at break, linear shrinkage and other properties affecting accuracy, wear resistance and quality of castings. Laboratory tests of five brands of silicones: Silagerm 5045, Silagerm 6070P, Pentelast 710, SilcoTin 40 and PolyFlex 80 are carried out. Test methods are presented, as well as a comparative analysis of the results obtained.

The aim of the work is laboratory determination and comparison of physical properties of materials used for creation of injection molds for various purposes. On the basis of experimental data recommendations are given on the choice of silicone depending on the scale and configuration of products. For small-sized molds it is suggested to use softer compounds, while for large-sized ones - silicones with increased hardness. The work can be useful for specialists engaged in the development and operation of molding equipment in the field of molding from polymeric materials.

After the «silicone sheets» had cured, the desired shape was cut out of them for a tear test in the form of a double-sided shovel. And the remaining part of the sheet was used to determine the Shore hardness.

Keywords: molding silicone, two-component compound, casting molds, hardness tests, tensile tests.

МРНТИ 55.03.99
DOI

М. Е. Исаметова[1], *М. Ф. Керимжанова[2],
А. С. Ажаев[3], А. Б. Исаметов[4]
[1,2,3,4]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4630-271X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9475-8239
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6550-6483
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1036-2294
*e-mail: m.kerimzhanova@satbayev.university

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С ПОДШИПНИКОВЫМИ ОПОРАМИ

В данной статье представлены результаты исследований динамики и динамических характеристик ротора центробежного насоса, установленного в подшипниковых опорах, в различных рабочих режимах. Применяемые в транспортной инженерии центробежные насосы представляют собой интерес с точки зрения повышения их качества работы, эффективности и эксплуатационной надежности. Ряд научных исследований посвящен проблемам динамических процессов, происходящих при работе насосов; разработке компьютерных моделей для исследования динамических напряжений и вибраций основных деталей насоса - корпуса и рабочего колеса двойного всасывания. В качестве ротора выступает вал, на котором установлена основная деталь насоса – рабочее колесо. Опорами приняты подшипниковые узлы, установленные с двух сторон колеса, в целом, динамическая система представлена как ротор с опорными узлами в виде подшипников. Возникающие при работе насосов, кавитационные процессы способствуют возникновению пульсаций давления в жидкости и при этом, вызывают колебания в динамической системе в целом. Приведены результаты исследования динамических характеристик центробежного насоса с использованием теории колебаний и анализа в частотной области, метода численного моделирования. Результаты показали, что вибрационные процессы в роторе зависят от геометрии подшипниковых опор, балансировки ротора и рабочих характеристик насоса.

Ключевые слова: центробежный насос, динамика ротора, вибрации, подшипниковые опоры, компьютерное моделирование.

Введение

В промышленности широко применяются различного типа и вида насосное оборудование. Однако, с увеличением потока энергии возрастает и проблема вибрации центробежных насосов, что может оказывать негативное влияние на безопасность эксплуатации, стабильность работы и срок службы оборудования. Особенно остро эта проблема касается узла ротора, что может привести к серьезным повреждениям быстро вращающихся деталей, таких как вал, рабочее колесо и подшипники. Вибрация ротора в сборе зависит в основном от двух типов факторов — механических и гидравлических. Вопросы динамического поведения насосов широко изучены во многих научных исследованиях [1; 10]. В процессе эксплуатации центробежных насосов могут возникать проблемы, влияющие на их эффективность работы, обслуживание и надежность. К таким проблемам относятся гидравлические удары, которые возникают в результате изменения давления при закрытии клапанов, повреждения частей насоса или трубопроводов. Подобные гидроудары могут также вызывать шум и вибрацию. Кавитационные явления, появляющиеся в результате высоких оборотов или неверно выбранного режима работы насоса. Процесс кавитации ведет к повреждению рабочих органов насоса, к снижению его КПД.

Целью статьи является исследование и анализ работы насосного оборудования с учетом требований к его эффективности и надежности с применением современных методов моделирования и анализа роторных систем.

Исследование динамики работы насосов требуют комплексного подхода и углубленного анализа многочисленных факторов. Одним из которых является влияние массовых характеристик ротора и транспортируемой жидкости на разных режимах подачи, что и представлено в данной статье.

Разные подходы к составлению компьютерных моделей динамики насосов представлены в исследованиях разных авторов. Так авторами работы [1] разработана аналитическая модель, в которой все компоненты, за исключением опор, считались жесткими. Затем была создана трехмерная конечно-элементная модель ротора с сосредоточенными массами и, наконец, полностью гибкая многотельная модель для анализа переходных процессов, которая требует много времени [2; 3]. Компьютерные модели в работах [4; 5] были построены как связь CFD (Computational Fluid Dynamics) Model и Rotordynamics Model, но конечно-элементная модель ротора была построена без учета влияния силы дисбаланса. Анализ переходных процессов был проведен с целью изучения динамических напряжений и вибрации спирального корпуса большого центробежного насоса с двойным всасыванием было установлено, что при всех условиях эксплуатации максимальное напряжение приходится на область спирального язычка, тогда как максимальное виброперемещение происходило вблизи области отверстия вала [6].

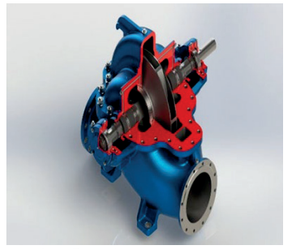
В исследованиях [7] описана картина течения жидкости по спирали, гидродинамическое взаимодействие ротора и статора, явление кавитации и вторичного потока, что в совокупности способствует созданию колебаний

давления. Возникшие колебания могут приводить к вибрации самого рабочего колеса и вызвать резонанс, когда частота колебаний давления может приблизиться к собственной частоте конструкции насоса. Энергия колебаний давления в жидкостях распространяется со скоростью света, что вредно и для насоса, и для окружающей среды и способствует усилению процесса кавитации. Рядом авторов проведены исследования давления колебаний, возникающих в процессе перекачки жидкости в насосах, применяющих колеса двойного всасывания [8; 9]. Много внимания авторами было уделено влиянию на динамику насоса таких факторов, как число лопаток, гидродинамическая сила. Однако, без должного внимания остается такой фактор, как сила дисбаланса. Наш интерес вызывает именно это влияние, которое может способствовать повышению эффективности и производительности работы насоса.

Предыдущие исследователи использовали различные методы для анализа колебаний; некоторые из них использовали аналитический метод, а другие - численные методы; анализ методом конечных элементов (МКЭ) и метод конечных объемов, анализ с подходом MBD (multibody dynamics) никогда не обсуждались [2; 4; 5]. По этим причинам моделирование поведения вращающейся машины с помощью моделей и вычислительных устройств играет важную роль, поскольку оно позволяет прогнозировать критические скорости и оценивать влияние нестабильностей, экономя время и деньги на этапе проектирования, уменьшая необходимость в проведении многочисленных экспериментальных испытаний и изготовлении физических прототипов.

В статье исследуется динамика роторного вала и динамические параметры системы вал-центробежное колесо с использованием метода MBD в программе ADAMS/View.

Объектом исследования является центробежный насос марки CNP 630-90 (рисунок 1), производимый на машиностроительном предприятии KARLSKRONA (Казахстан). Технические и геометрические характеристики насоса двухстороннего всасывания: двигатель 307 кВт 3-фазный, частота вращения вала 1500 об/мин, напор 90 м и расход 630 м3/ч рабочая жидкость – вода. На рисунке 1 приведена модель насоса марки CNP 630-90 и его рабочего колеса.



а) общий вид насоса



б) рабочее колесо двойного всасывания

Рисунок 1 – Центробежный насос марки CNP 630-90

Насосы данного типа применяются в горнодобывающей, перерабатывающих отраслях промышленности, в коммунальном хозяйстве, в снабжении водой городских и сельских местностей, орошении сельскохозяйственных угодий, а также для водозаборных сооружений. Насосы с колесом двойного всасывания имеют преимущество – расход воды возрастает вдвое, что востребовано для передачи воды на большие расстояния или его высокая подъемная сила.

Материалы и методы

Компьютерные модели.

На первом этапе для определения массы жидкости в рабочем колесе по рабочим чертежам насоса, в программе САПР (Система автоматизированного проектирования) «Solidworks», была создана геометрическая модель рабочего колеса. Для определения массы жидкости в колесе, на втором этапе полученную геометрическую модель колеса импортировали в программу «SFlow 4» (рисунок 2). В программе модель разбивается на конечное число ячеек (объемов). В соответствии с выполненными расчетами вмещающий объем рабочего колеса насоса CNP 630-90 составил 0,005 м^3.

Этот этап необходим для создания адекватной модели динамики ротора насоса, так как масса вращающихся элементов определяет основные параметры уравнения колебаний ротора. Другой величиной для определения приведенной массы жидкости является ее плотность. Данные о характеристиках жидкости взяты из справочных данных и представлены в таблице 1.

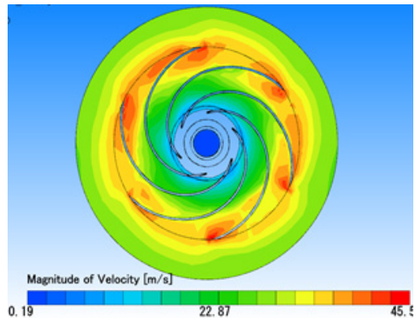


Рисунок 2 – Расчет вмещающих объемов рабочего колеса

Таблица 1 – Плотность воды при различных режимах работы насоса и температурах

Режим работы	Температура воды С0	Плотность воды кг/м3
Нулевая подача	12	998
Максимальная подача	13	997
Оптимальная подача	13	997

Полную массу ротора данного насоса с учетом приведенной массы жидкости в рабочем колесе выполняется по формуле [10]:

$$\boldsymbol{m^* = m_p + m_{ж}} \quad (1)$$

Выявленные и рассчитанные величины введены в модель насоса MSC.ADAMS с целью имитации вибрационного состояния насоса и создания симуляционной модели движения ротора на 2-х подшипниковых опорах.

На основе модели ротора Джеффкотта [11] была построена ротор динамическая модель центробежного насоса. Из рисунка 3 видно, что типичная ротор динамическая модель состоит из главной оси, рабочего колеса и двух подшипников.

В системе ADAMS/View была сформирована база данных проекта, которая состоит из вала, центробежного колеса и подшипников. Геометрия вала и рабочее колесо были импотированы из программы INVENTOR, этод метод создания геометрии в ADAMS/View наиболее адекватно отражает все геометрические особенности сложной формы колеса, что позволяет точно создать расчетную схему, связанную с силой дисбаланса [12]. Упругие элементы подшипники были выбраны из базы плагина ADAMC/Machinery, по радиусу вала, размерам и виду тел качения.

Теоретические подходы MBD.

При интеграции программных сред MBD и CAD анализ MBD позволяет получить информацию о состоянии движения и нагрузках механической системы, не тривиальной геометрии тел. Пакет включает в себя несколько методов форм и решений систем однородных дифференциальных методов, что дает возможность моделировать механизмы различной сложности. Фундаментальный подход,

применяемый Адамсом, использует формулировку Лагранжа второй формы, полученную с помощью следующих уравнений:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = -\frac{\partial P}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} \quad (2)$$

где T – представляет собой кинетическую энергию механической системы;

P – характеризует энергию положения;

R —функция, характеризующая скорость рассеяния механической энергии системы;

qi – величина обобщенной координаты.

Следует отметить, что для каждого вида расчета есть существенные и несущественные параметры, характеризующиеся степенью важности с точки зрения адекватности описания происходящего процесса. Так, для анализа динамического поведения системы наиболее важными являются массово–инерционные, упругодемпфирующие характеристики (амортизаторы, торсионные валы), внешние вынуждающие воздействия. Геометрия в данном виде расчета интересует нас с точки зрения правильной взаимосвязи вышеописанных параметров.

Моделирование MBD.

Моделирование MBD выполняется по следующему алгоритму.

Создание симуляции проводилось в следующем порядке:

– импорт модели в формате x_t;

– создание связей «joint» и подшипников;

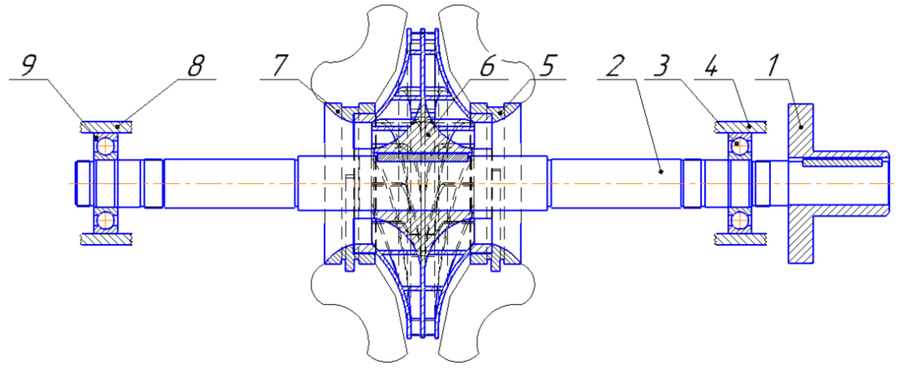
– создание движения «motion»;

– задание параметров симуляции;

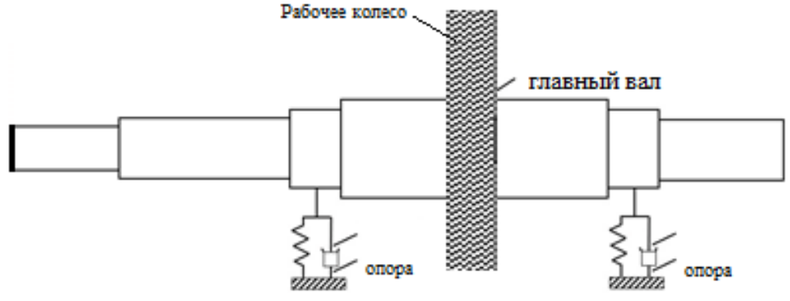
– вывод результатов.

Задание кинематических связей показано на рисунке 4, где элементы движутся по определенному пути.

Здесь приведена схема кинематических связей, используемых для моделирования динамики движений и ограничений между элементами механической системы.



а) элементы насоса



б) механическая схема ротора

Рисунок 3 – Модель ротора насоса: а) элементы насоса 1– муфта, 2 – вал; 3 и 9 – подшипники; 4 и 8 – корпуса подшипников (чашки); 5 и 7 – уплотнительные кольца; 6 – рабочее колесо; б) механическая схема ротора

Эти связи помогают точно описывать взаимодействие между компонентами механизма и обеспечивают соблюдение заданных кинематических условий.

Результаты и обсуждение

Модель ротора насоса представлена на рисунке 5.

Программное обеспечение ADAMS позволило получить результаты изменения скоростей и ускорений в подшипниковых узлах (рисунок 6).

Представленные диаграммы показывают нестабильность процесса вращения ротора насоса. Однако, величины пиков диаграмм находятся на уровне второго и третьего порядков и являются не столь критичными.

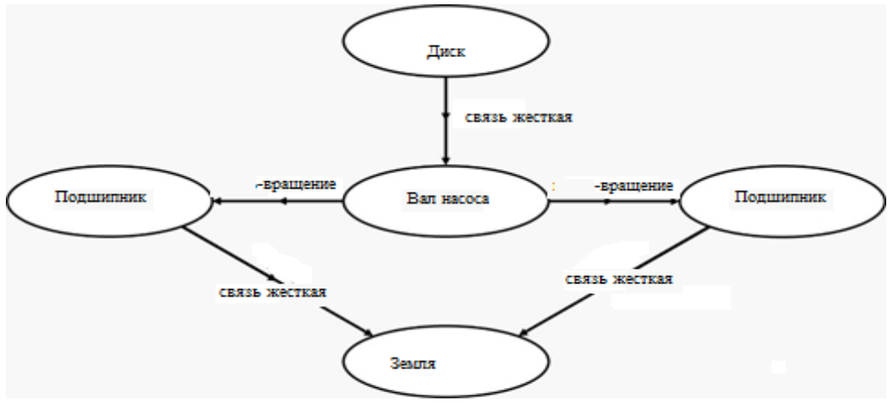


Рисунок 4 – Кинематическая схема ротора

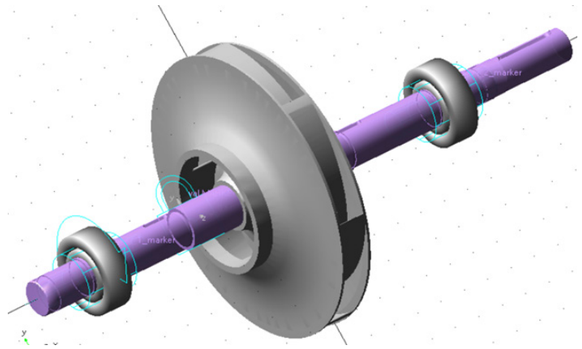
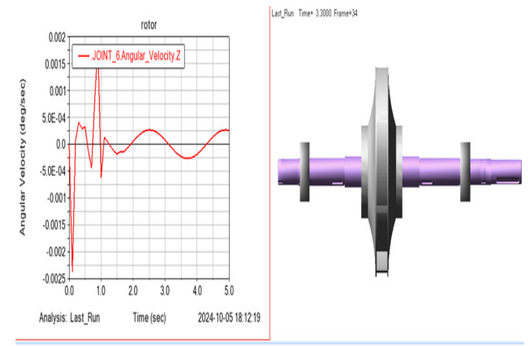


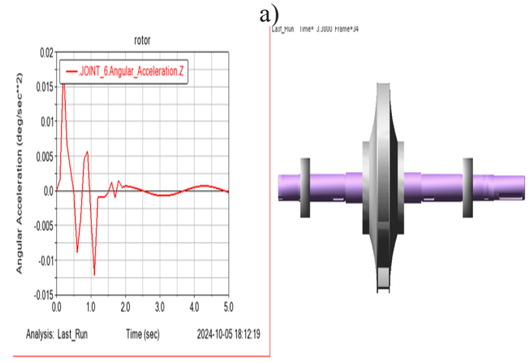
Рисунок 5 – Модель системы насоса ротор-подшипниковые опоры

На рисунке 7 показаны результаты изменения потенциальной энергии ротора и опор.

Исследования показывают, что, используя демпфирующие свойства подшипников, можно изменять амплитуду колебаний, что вытекает из диаграмм потенциальной энергии на роторе и опорах (табл.2).

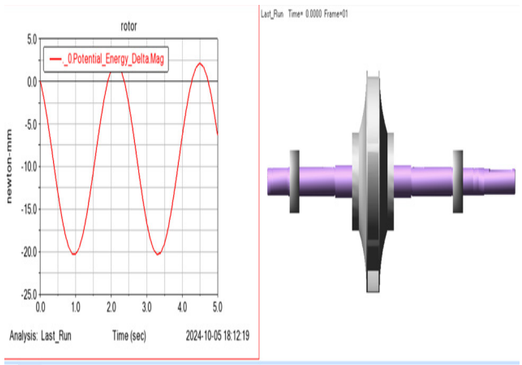


а)

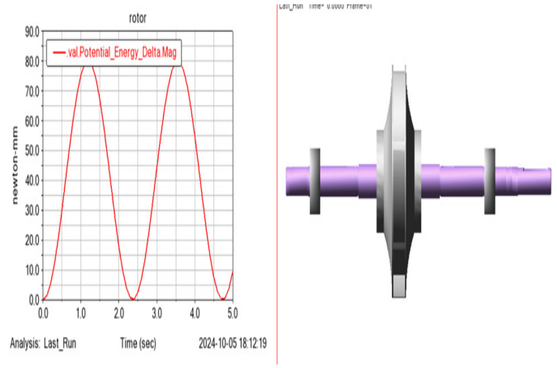


б)

Рисунок 6 – Диаграммы изменений: а) скорости в подшипниковых опорах; б) ускорений в опорах



а)



б)

Рисунок 7 – Изменение потенциальной энергии:
а) вала; б) опор ротора – подшипников

Таблица 2 – Энергия системы ротор- подшипниковые опоры

Узлы	Критическая скорость вращения , об/мин		
	1735	2451	4531
Роторный вал, %	15,07	3,75	87,23
Левая опора, %	48,78	43,610	3,45
Правая опора, %	35,75	53,78	8,75
Суммарное значение, %	100	100	100

Как видно из таблицы, при первых двух скоростях вращения ротора, энергия колебаний сосредоточена больше в опорах, что позволяет делать вывод о возможности их демпфирования. Тогда как, при третьей скорости вращения ротора демпфирование опор (подшипников) становится невозможным.

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ротора в виде диаграммы показаны на рисунке 8.

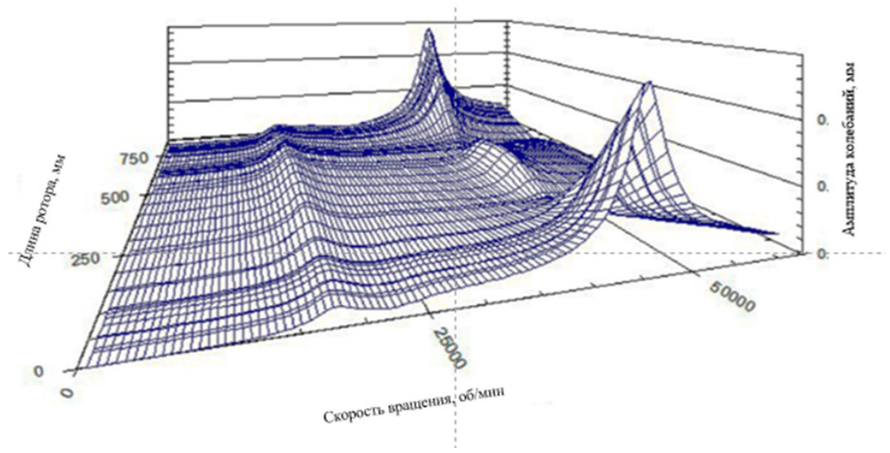


Рисунок 8 – Диаграмма АЧХ ротора

Из трехмерной диаграммы, представляющей зависимость амплитуд по длине ротора и скорости вращения наблюдается, что дисбаланс не вызывает возбуждения второй формы колебаний. Диаграмма АЧХ ротора показывает, что если знать место резонанса, то вполне можно создать программу изменения жесткости или демпфирования роторной системы с целью снижения амплитуд возникающих колебаний.

По результатам исследований упругих и неупругих сопротивлений системы ротор - подшипниковые опоры предлагается для насосов марки CNP 630-90 применять опоры с демпфированием, то есть опоры с упругими кольцами. Такие опоры оснащены дополнительным упругим элементом - тонкостенным кольцом, которое устанавливается в зазор между корпусом и внешним кольцом подшипника. Такие упругие кольца имеют стандартные размеры. Выступы на кольце расположены по внешней и внутренней поверхностям в шахматном порядке, имеют стандартные размеры. В сборе с другими гидравлическими деталями опор, кольца образуют гидравлические полости, в которые подается масло. Небольшая высота выступов от 0,15 до 0,3 мм определяет допустимый по прочности прогиб кольца. Достоинством демпферных опор с упругими кольцами являются высокие демпфирующие свойства.

Выводы

1 Результатом исследований является разработанная методика MBD (multibody dynamics) моделирования и анализа роторных систем насоса. Методика может быть полезна организациям, занимающимся проектированием насосного оборудования.

2 Предложены методы регуляции динамических откликов системы, снижения АЧХ путем введения упругих элементов, таких как упругие кольца в подшипниковые опоры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Vincenzo, D'Addioa, Paola, Fortea, Francesco, Frendoa, Raffaele, Squarcini.** Rotordynamic analysis of a centrifugal pump for automotive applications // AIAS 2019 International Conference on Stress Analysis, Procedia Structural Integrity. – 2019. – Volume 4. – P. 510–525. – [Электронный ресурс]. – https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321620302717.

2 **Rob Eling, Mathys te Wierik, Ron van Ostayen, Daniel Rixen.** Rotordynamic and Friction Loss Measurements on a High Speed Laval Rotor Supported by Floating Ring Bearings // Lubricants. – 2017. – 5(1),7. – [Электронный ресурс]. – https://www.mdpi.com/2075-4442/5/1/7.

3 **Bonneau, O., Arghir, M., Jolly, P.** Dynamic control of a flexible shaft mounted in adaptive or active bearing // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2014. – Volume 4. – Number 6. – P. 521–527. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net/publication/273316971_Dynamic_Control_of_a_Flexible_Shaft_Mounted_in_Adaptive_or_Active_Bearing.

4 **Hehui, Zhang, Haolin, You, Haishan, Lu, Kun, Li and 3 authors.** CFD-Rotordynamics Sequential Coupling Simulation Approach for the Flow-Induced Vibration of Rotor System in Centrifugal Pump // Applied Sciences. – 2020. – 10(3). – [Электронный ресурс]. – https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/1186.

5 **Isametova, M., Omarbekov, B., Nussipali, R., Angarbekov, U., Isametov, A.** Computer simulation and investigation vibration parameters of a centrifugal submersible pump // Journal of Vibroengineering. – 2020. – 22(5). – P. 993–1005. – [Электронный ресурс]. – https://doi.org/10.21595/jve.2020.21014.

6 **Fu-Jun, Wang, Lixia, Qu, Ling-Yan, He and Jiang-Yong, Gao.** Evaluation of Flow-Induced Dynamic Stress and Vibration of Volute Casing for a Large-Scale Double-Suction Centrifugal Pump // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – [Электронный ресурс]. – https://doi.org/10.1155/2013/764812.

7 **J. Y. Gao, F. J. Wang, L. X., Qu, Z., Q. Liu and L. Y. Qi.** Dynamic stress of large double-suction centrifugal pumpimpeller // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. – 2012. – Vol. 43. – Number 1. – P. 42–47. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net/publication/290610719_Dynamic_stress_of_large_double-suction_centrifugal_pump_impeller.

8 **Меньшиков, С. С.** Методы параметрической диагностики грунтовых насосов систем гидротранспорта [Текст] // Обогащение руд. – 2012. – № 2. – С. 37–39. – [Электронный ресурс]. – https://www.rudmet.ru/journal/692/article/8951.

9 **Wang, J. M., Wang, P. F., Zhang, X., Ruan, X. D. & Fu, X.** An adjoint-based optimization method for reducing the axial force of a reactor coolant pump // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, Applied Physics and Engineering. – 2019. – 20(11). – P. 852–863. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net/publication/337162736_An_adjoint-based_optimization_method_for_reducing_the_axial_force_of_a_reactor_coolant_pump.

10 **Марцинковский, В. А.** Динамика роторов центробежных машин: монография [Текст]. – Сумы : Сумский государственный университет, 2012. – 562 с.

11 **Jeffcott, H. H.** The lateral vibration of loaded shafts in the neighborhood of a whirling speed. – The effect of want of balance // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 2019. – Vol. 37. – № 219. – P. 304–314. – [Электронный ресурс]. – https://doi.org/10.1080/14786440308635889.

12 **Isametova, M. E., Absadykov, B. N., Batyrgaliyev, M. K., Borovik, I. I.** Centrifugal pump rotor dynamics study // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2018, 5(431). – P. 226–233. – https://www.researchgate.net/publication/328260055_Centrifugal_pump_rotor_dynamics_study.

REFERENCES

1 **Vincenzo, D'Addioa, Paola, Fortea, Francesco, Frendoa, Raffaele, Squarcini.** Rotordynamic analysis of a centrifugal pump for automotive applications // AIAS 2019 International Conference on Stress Analysis, Procedia Structural Integrity. – 2019. – Volume 4. – P. 510–525. – [Электронный ресурс]. – https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321620302717.

2 **Rob Eling, Mathys te Wierik, Ron van Ostayen, Daniel Rixen.** Rotordynamic and Friction Loss Measurements on a High Speed Laval Rotor Supported by Floating Ring Bearings // Lubricants. – 2017. – 5(1),7. – [Электронный ресурс]. – https://www.mdpi.com/2075-4442/5/1/7.

3 **Bonneau, O., Arghir, M., Jolly, P.** Dynamic control of a flexible shaft mounted in adaptive or active bearing // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2014. – Volume 4. – Number 6. – P. 521–527. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net/publication/273316971_Dynamic_Control_of_a_Flexible_Shaft_Mounted_in_Adaptive_or_Active_Bearing.

4 **Hehui, Zhang, Haolin, You, Haishan, Lu, Kun, Li and 3 authors.** CFD-Rotordynamics Sequential Coupling Simulation Approach for the Flow-Induced Vibration of Rotor System in Centrifugal Pump // Applied Sciences. – 2020. – 10(3). – [Электронный ресурс]. – https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/1186.

5 **Isametova, M., Omarbekov, B., Nussipali, R., Angarbekov, U., Isametov, A.** Computer simulation and investigation vibration parameters of a centrifugal submersible pump // Journal of Vibroengineering. – 2020. – 22(5). – P. 993–1005. – [Электронный ресурс]. – https://doi.org/10.21595/jve.2020.21014.

6 **Fu-Jun, Wang, Lixia, Qu, Ling-Yan, He and Jiang-Yong, Gao.** Evaluation of Flow-Induced Dynamic Stress and Vibration of Volute Casing for a Large-Scale Double-Suction Centrifugal Pump // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – [Электронный ресурс]. – https://doi.org/10.1155/2013/764812.

7 **J. Y. Gao, F. J. Wang, L. X., Qu, Z., Q. Liu and L. Y. Qi.** Dynamic stress of large double-suction centrifugal pumpimpeller // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. – 2012. – Vol. 43. – Number 1. – P. 42–47. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net/publication/290610719_Dynamic_stress_of_large_double-suction_centrifugal_pump_impeller.

8 **Men'shikov, S. S.** Metody parametricheskoi diagnostiki gruntovykh nasosov sistem gidrotransporta [Methods of parametric diagnostics of ground pumps of hydraulic transport systems] [Text]. In Ore processing. – 2012. – № 2. – P. 37–39. – https://www.rudmet.ru/journal/692/article/8951.

9 **Wang, J. M., Wang, P. F., Zhang, X., Ruan, X. D. & Fu, X.** An adjoint-based optimization method for reducing the axial force of a reactor coolant pump // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, Applied Physics and Engineering. – 2019. – 20(11). – P. 852–863. – [Электронный ресурс]. – https://www.researchgate.net/publication/337162736_An_adjoint-based_optimization_method_for_reducing_the_axial_force_of_a_reactor_coolant_pump.

10 **Martsinkovskii, V. A.** Dinamika rotorov tsentrobezhnykh mashin [Dynamics of rotors of centrifugal machines : monograph] [Text]. – Sumy : Sumy State University, 2012. – 562 p.

11 **Jeffcott, H. H.** The lateral vibration of loaded shafts in the neighborhood of a whirling speed. – The effect of want of balance // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 2019. – Vol. 37. – № 219. – P. 304–314. – [Электронный ресурс]. – https://doi.org/10.1080/14786440308635889.

12 **Isametova, M. E., Absadykov, B. N., Batyrgaliyev, M. K., Borovik, I. I.** Centrifugal pump rotor dynamics study // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2018, 5(431). – P. 226–233. – https://www.researchgate.net/publication/328260055_Centrifugal_pump_rotor_dynamics_study.

М. Е. Исаметова[1], *М. Ф. Керімжанова[2], А. С. Ажаев[3], А. Б. Исаметов[4]
[1,2,3,4]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

МОЙЫНТІРЕКТЕРІ БАР ОРТАДАН ТЕПКІШ СОРҒЫ РОТОРЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада әртүрлі жұмыс режимдерінде мойынтіректерге орнатылған ортадан тепкіш сорғы роторының динамикасы мен динамикалық өнімділігін зерттеу нәтижелері келтірілген. Көлік инженериясында қолданылатын ортадан тепкіш сорғылардың жұмыс сапасын, тиімділігі мен пайдалану сенімділігін арттыру тұрғысынан қызығушылық туғызады. Бірқатар ғылыми зерттеулер сорғылар жұмысы кезінде болатын динамикалық процестердің проблемаларына, қос сору сорғы корпусы мен жұмыс дөңгелегінің негізгі бөлшектерінің динамикалық кернеулері мен тербелістерін зерттеу үшін компьютерлік үлгілерді әзірлеуге арналған. Ротор ретінде сорғының негізгі бөлшегі – жұмыс дөңгелегі орнатылған білік болып табылады. Тіректер дөңгелектің екі жағынан орнатылған мойынтіректік тораптарды қабылдайды, тұтастай алғанда, жүйе ротор-динамикалық жүйе ретінде ұсынылған. Сорғылардың жұмысы кезінде туындайтын кавитациялық процестер сұйықтық қысымының ауытқуының пайда болуына және жалпы жүйенің ауытқуының пайда болуына ықпал етеді. Жиілік саласындағы тербеліс теориясы мен талдауды, сандық модельдеу әдісін пайдалана отырып, отртадан тепкіш сорғының динамикалық сипаттамаларын зерттеу нәтижелері келтірілген. Нәтижелер ротордағы діріл процестері мойынтірек тіректерінің геометриясына, ротордың теңгерілуіне және сорғының жұмыс сипаттамаларына байланысты екенін көрсетті.

Кілтті сөздер: ортадан тепкіш сорғы, ротор динамикасы, діріл, мойынтірек тіректері, компьютерлік модельдеу.

M. Y. Issametova[1], * M. F. Kerimzhanova[2], A. S. Azhaev[3], A. B. Issametov[4]
[1,2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

INVESTIGATION OF THE ROTOR DYNAMICS OF A CENTRIFUGAL PUMP WITH BEARING SUPPORTS

Centrifugal pumps used in transport engineering are of interest from the point of view of improving their quality of operation, efficiency and operational reliability. A number of scientific studies are devoted to the problems of dynamic processes occurring during pump operation; development of computer models for studying dynamic stresses and vibrations of the main pump parts – the housing and the double-suction impeller. The rotor is a shaft on which the main part of the pump is installed-the impeller. The bearings are bearing units mounted on both sides of the wheel, in general, the system is represented as a rotor-dynamic system. Canitation processes that occur during pump operation contribute to the appearance of fluid pressure fluctuations and create vibrations of the system as a whole. The results of studying the dynamic characteristics of a centrifugal pump using the oscillation theory and frequency domain analysis, as well as the numerical simulation method, are presented. The results showed that vibration processes in the rotor depend of the geometry of the bearing supports, rotor balancing, and pump performance.

Keywords: centrifugal pump, rotor dynamics, vibrations, bearing supports, computer modeling.

SRSTI 55.03.14
DOI

S. Kalmaganbetov[1], A. Zhankeldi[2], R. Mukanov[3], G. Smailova[4], Zh. Abilkaiyr[5]
[1,2,3,4,5]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9248-4086
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8174-4209
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-0513
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2293-6232
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7568-1061
*e-mail: s.kalmaganbetov@satbayev.university

DESIGN AND OPTIMIZATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF GEARS FOR AN ELECTRIC VEHICLE TRANSMISSION

This study focuses on the design and optimization of the geometric parameters of gears in electric vehicle (EV) transmissions to enhance performance, efficiency, and noise reduction. The optimization process was conducted using KISSsoft, considering constraints such as input speed and torque, transmission system volume, and gear ratios for each driving mode. A novel aspect of this research is the integration of transmission efficiency analysis with a variable efficiency coefficient into the optimization workflow, which has been demonstrated to significantly influence the optimal design of multi-speed EV transmissions.

Throughout the optimization, key factors such as tooth bending stress, contact ratio, and specific sliding were analyzed. Additionally, the impact of module variations on gear profile geometry, overlap ratio, tooth count, and gear pair mass was investigated. Strength calculations for the optimized gear pairs, determined for all geometric parameters using KISSsoft, were performed in accordance with the mathematical model outlined in ISO 6336, and the results were subsequently compared. The findings emphasize the critical role of profile modifications and precise gear design in optimizing gear performance, ultimately contributing to improved efficiency, reliability, and service life.

Keywords: gear design optimization, electric vehicle transmission, KISSsoft, gear profile modification, ISO 6336.

Introduction

In recent years, the automotive industry has been transitioning from internal combustion engine (ICE) vehicles to electric vehicles (EVs) due to increasingly stringent fuel efficiency and emission regulations worldwide. To meet these evolving standards and enhance EV performance, extensive research and development efforts are being directed toward the creation of advanced electric vehicle transmission systems, aiming to improve energy efficiency, driving dynamics, and overall sustainability [1].

The development of electric vehicles is progressing rapidly, with related technologies continuously advancing and gradually reaching maturity. As key components of the

pure electric vehicle drive system, the drive motor and transmission require careful parameter matching and design optimization to maximize the vehicle's driving range under identical battery conditions [2; 3]. Electric vehicles have traditionally relied on single-speed gearboxes due to their straightforward design and high efficiency. Nevertheless, there is growing interest in multi-speed gearboxes for electric vehicles because of their potential advantages. These include improved efficiency of the electric traction machine and inverter, enhanced vehicle acceleration, better gradeability, higher top speed, and possible reductions in the overall mass and volume of the traction system [4]. Multi-speed gearboxes may be particularly advantageous for performance electric vehicles, light to heavy-duty trucks, and buses, given their substantial torque and power demands. It is worth noting that the ideal gearbox design can differ based on the specific use case and driving conditions [5].

For example, [6] shows that optimization outcomes vary between simulations using the New Europe Drive Cycle and Urban Dynamometer Driving Schedule, underscoring the necessity for thorough design and optimization of the entire powertrain system. Furthermore, [7] indicates that single speed gearboxes configurations offer efficiency benefits compared to multi-speed gearboxes, but stresses the importance of considering both application-specific machine design and topology to fully realize the technological potential.

This paper introduces an innovative power solution for electric vehicles that incorporates an electric motor and a planetary gear system. The optimization process focuses on two primary objectives: the volume and transmission efficiency of the two-speed gearbox. The suggested mechanism is particularly suitable for EV drive systems, owing to its uncomplicated design and capacity for smooth gear shifts at high velocities. Additionally, it is adaptable for use in in-wheel drive systems, which require an extremely compact configuration. This arrangement addresses speed disparities through the utilization of open gear shift components, effectively reducing clutch resistance losses.

Materials and methods

This study focuses on selecting the optimal transmission for an electric vehicle by considering its specific characteristics (table 1) and those of the electric motor, utilizing the KISSsoft software [8] for analysis.

Table 1 – Basic requirements for EV

Item	Parameter
Seats	1
Vehicle weight, kg	200
Power reserve, km	100
Maximum speed, km/h	60
Maximum gradeability, %	>20
Wheelbase, mm	1750
Wheel size	R12

The vehicle is equipped with an electric motor rated at 10 kW (table 2), operating at a nominal voltage of 72 V DC. To reduce size and weight, DC propulsion motors generally function at high rotational speeds. As a result, a reduction gearbox is necessary to align the motor's speed with the wheel rotation [9; 10; 11].

Table 2 –Technical characteristics of the electric motor

Item	Parameter
Constant voltage	72 V
Rated power	10 kW
Rated torque	50 Nm
Rated base speed	2000 rpm
Rated maximum speed	5000 rpm

The determination of the overall transmission ratio must satisfy the vehicle's performance criteria, ensuring both adequate gradeability for ascent and the capability to attain the maximum velocity [12]. The corresponding expression is:

$$i_o = \frac{\pi \cdot n_{\max} \cdot d_t}{v_{\max}} = 8.2$$

where, n_{max} – maximum speed of the electric motor (n_{max}= 5000 rpm)

d_t – wheel diameter (d_t= 522 mm = 0.522 m)

v_{max} – maximum speed (V_{max}= 60 km/h = 1000 m/min)

The gear ratio of the first stage can be determined using the following formula [13]:

$$i_1 = 0,9365 \cdot i_o^{0.667} = 3.8$$

$$i_2 = \frac{i_o}{i_1} = 2.1$$

where, i_1 – first stage gear ratio

i_2 – second stage gear ratio

After entering output parameters of electric motor and gear ratios into KISSsoft, program designed 3D model and kinematic scheme. In figure 1. shows kinematic scheme of EV transmission consists of two sequential gear pairs that progressively reduce or increase speed and torque.

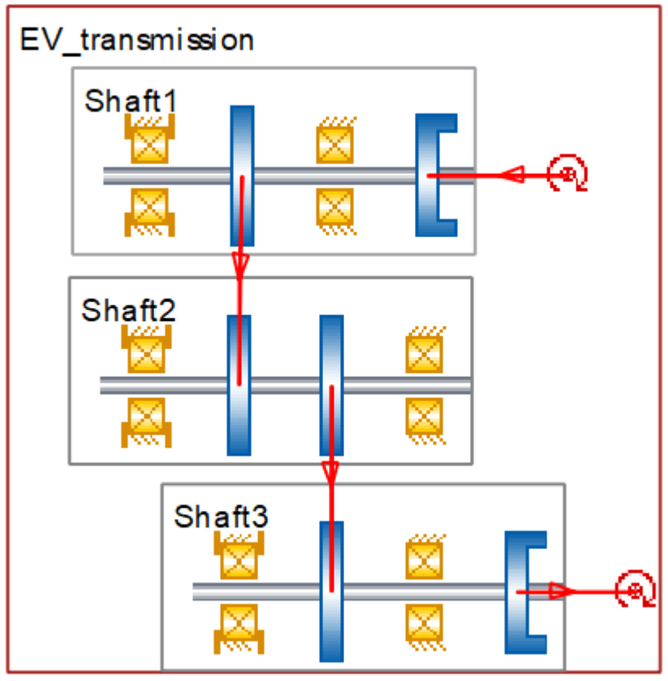
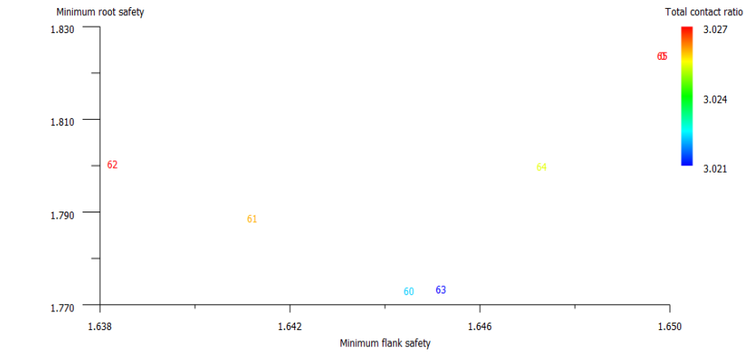


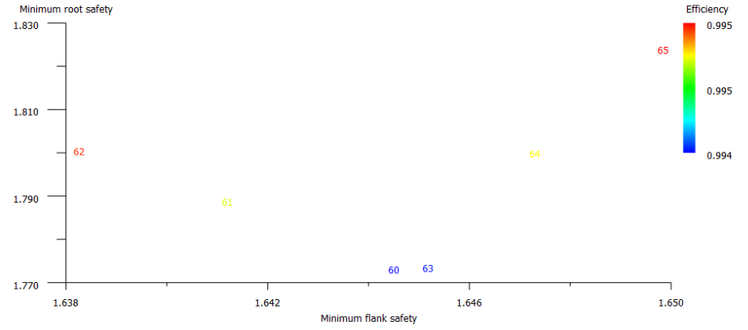
Figure 1 – Kinematic scheme of EV transmission

The preliminary calculation of the gearbox dimensions is carried out using specialized software, determining key parameters such as center distance, tooth width, gear diameters, and gear ratio while considering permissible loads. The optimization process focuses on achieving one of several key objectives: minimizing weight to reduce energy consumption, increasing torque capacity for high-load transmission, or enhancing specific power to balance compactness, strength, and efficiency.

The design process for the first stage of the gearbox in KISSsoft begins with model preparation, which includes defining gear, shaft, and bearing parameters, as well as evaluating their deformations. The nominal gear ratio of the first stage (i_1=3.8) is then specified, dictating both speed and torque, and the operational context of the transmission is selected. An initial calculation is performed to determine center distances, gear module, gear diameters, and tooth width, as well as to estimate component weight for structural mass optimization. Subsequently, six configurations with maximum specific power are analyzed, leading to the selection of the optimal design (Figure 3). This final configuration ensures high power density while maintaining minimal center distance, thereby enhancing the gearbox's compactness, mechanical strength, and overall efficiency.



a)



b)

Figure 2 – Graphs of the dependence of minimum root safety on minimum flank safety for the general contact ratio (a) and for the efficiency (b) of the first speed gear pair.

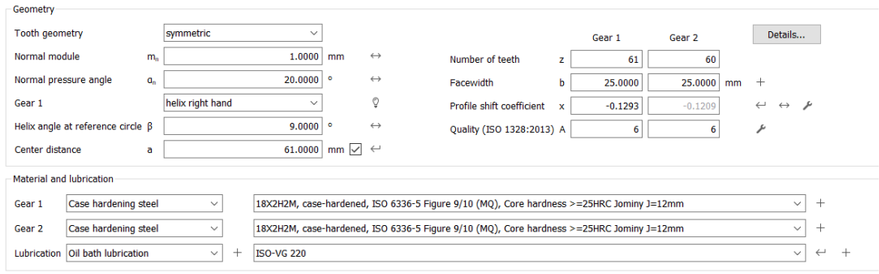


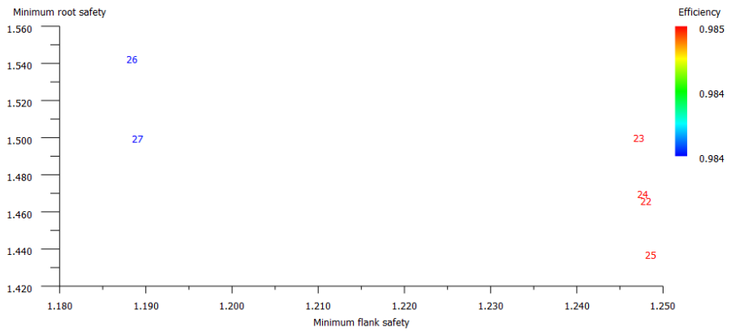
Figure 3 – Geometric parameters of the first speed gear pair

The graph (Figure 2.a) represents the relationship between minimum root safety and minimum flank safety for various gear meshing configurations. The color scale indicates the total contact ratio, which describes the number of tooth pairs engaged simultaneously. A higher contact ratio ensures smoother load transmission and reduces impact forces. Unlike the previous graph, the color scale here represents efficiency, highlighting energy losses within the transmission system. Higher efficiency values correspond to lower energy losses during power transmission.

As a result, the most optimal configuration is represented by point 65, as it demonstrates high flank safety, ensuring resistance to surface wear, high root safety, preventing fatigue failure, a high contact ratio that guarantees smooth load distribution, and superior efficiency that minimizes energy losses.

A similar analysis is conducted for the second gear stage (Figure 4), leading to the selection of point 23 (Figure 5) as the optimal configuration due to its favorable geometric parameters. Additionally, the software generates a 3D model of the transmission system (Figure 6).

a)



b)

Figure 4 – Graphs of the dependence of minimum root safety on minimum flank safety for the general contact ratio (a) and for the efficiency (b) of the second speed gear pair

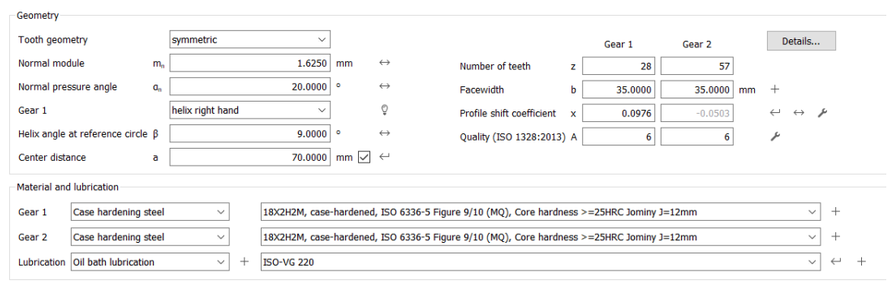


Figure 5 – Geometric parameters of the second speed gear pair

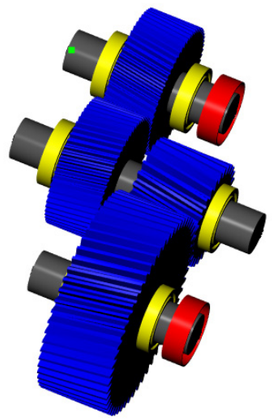


Figure 6 – 3D model of the electric vehicle gearbox

Next, we optimize the gear transmission by implementing deep-tooth profile gears [14] using KISSsoft. This approach significantly enhances transmission performance by enabling precise calculation of meshing parameters.

Within the software, we conduct a contact analysis using the face load factor (Kβ), which quantifies the load distribution variation along the tooth width. The calculation is performed without considering manufacturing deviations, in accordance with Annex E of the ISO 6336-1 standard.

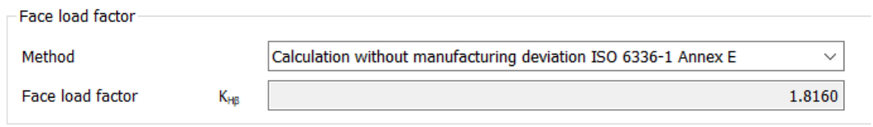


Figure 7 – Load distribution factor along the tooth length Kβ
calculated without considering manufacturing deviations,
in accordance with Appendix E of ISO 6336-1.

In Figure 7, the face load factor K_{β}=1.8160 indicates that the load distribution along the gear tooth width is uneven. This means that in the most heavily loaded areas, the overload reaches 81.6 % compared to a uniform load distribution.

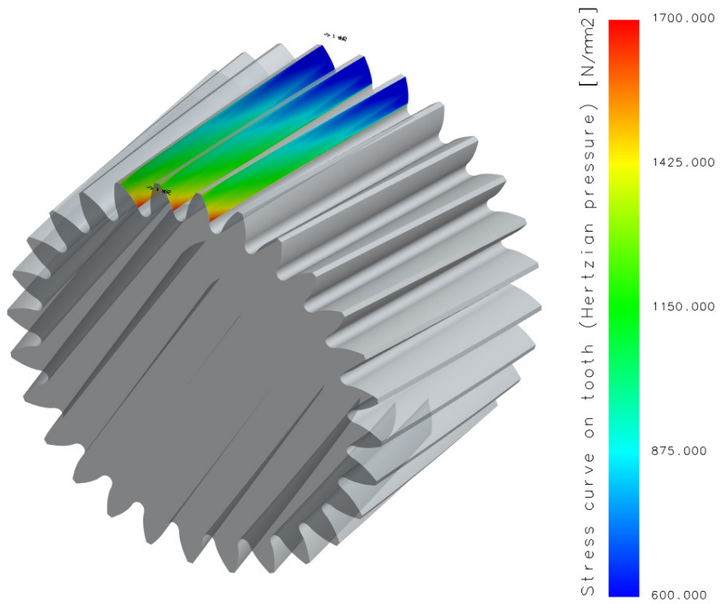


Figure 8 – Contact stress distribution

Figure 8 illustrates the distribution of contact stresses (Hertzman pressure) on the gear teeth. Due to the high face load factor Kβ, a zone of increased stress is observed on the tooth surface, located closer to the beginning of contact, with a gradual decrease towards the tooth base. This indicates an uneven load distribution, which may be attributed to gear meshing geometry, misalignment errors, or insufficient tooth profile modifications.

To reduce the Kβ factor, we will recalculate the values considering manufacturing deviations according to ISO 6336-1 Annex E. Additionally, we will apply further modifications (Figure 9) aimed at optimizing the load distribution along the tooth width.

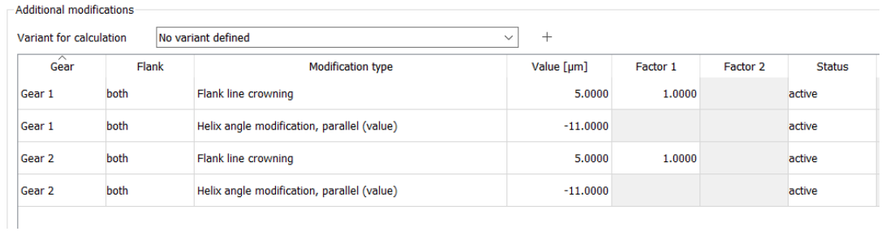
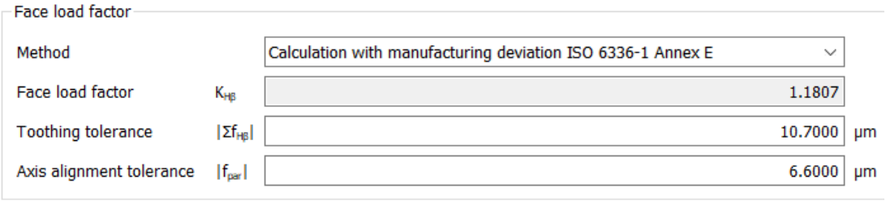


Figure 9 – Variants of additional gear modifications in KISSsoft software



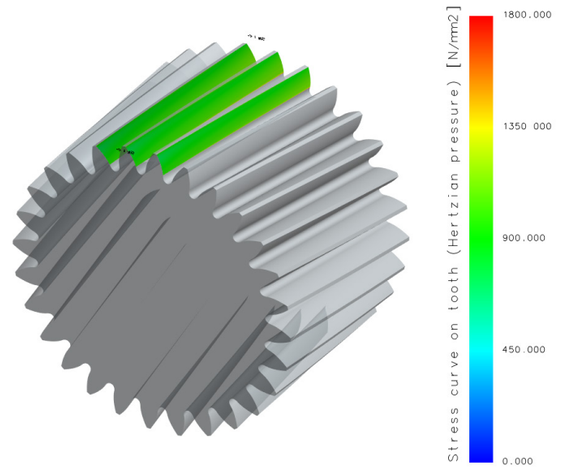


Figure 10 – (a) Load distribution factor along the tooth length KβK_\betaKβ
calculated considering manufacturing deviations according
to ISO 6336-1 Annex E.(b) Contact stress distribution

Figure 9 presents a table of additional gear modifications in KISSsoft. In this configuration, both gears utilize the Flank line crowning modification with a value of 5 µm, which introduces a slight rounding along the tooth width. This helps to reduce stress concentrations and compensate for potential alignment errors. Additionally, both gears include the Helix angle modification, parallel (value) with a value of -11 µm, which

adjusts the helix angle of the tooth line. This modification influences the load distribution among the teeth, reducing local overloads and improving meshing conditions.

After recalculating all parameters, the software produced the results shown in Figure 10a. Comparing this value with the previous one (1.8160, without manufacturing deviations), it is evident that considering real manufacturing tolerances has significantly reduced the load factor. This indicates that after implementing the adjustments, the gear transmission now distributes the load more evenly along the tooth width.

Result and discussion

The study optimized an electric vehicle (EV) transmission using KISSsoft software, focusing on load distribution and design efficiency through a step-by-step approach:

Preliminary Design: Key parameters – center distance, gear module, and tooth width – were calculated, setting the first-stage gear ratio to balance speed and torque.

Configuration Selection: Six configurations were analyzed, selecting point 65 for the first stage and point 23 for the second, based on safety, contact ratio, and efficiency.

Stress Analysis: Initial calculations revealed uneven load distribution, with a face load factor of 1.8160.

Profile Modification: Flank line crowning (5 μm) and helix angle correction (-11 μm) reduced stress concentration.

Recalculation: Considering manufacturing deviations (ISO 6336-1 Annex E), the load factor dropped to 1.1807.

Optimization: The final design improved durability, reduced noise, increased efficiency, and maintained compactness. This structured method highlights KISSsoft as a key tool for optimizing gear design and managing real-world deviations.

This structured approach, combining deep-tooth profile gears, profile modifications, and helix angle corrections, significantly improved the transmission's reliability and operational efficiency, underscoring KISSsoft software as a vital tool for gear design optimization and real-world deviation management.

Conclusion

The analysis of gear transmission performance utilizing KISSsoft software examined various factors affecting the reliability and efficiency of meshing. The transmission error graph analysis revealed significant deviations, indicating fluctuations in gear operation that may result in vibrations and increased noise levels. The initial load distribution factor along the tooth length, Kβ=1.8160, indicated an 80% overload, highlighting a substantial concentration of load in one engagement area.

To mitigate this coefficient, a tooth profile modification was implemented, including flank line crowning of 5 өm for both gears and a helix angle correction of -11 өm to compensate for alignment errors. Subsequent to these modifications, the load distribution factor decreased to Kβ=1.1807, indicating a more uniform load distribution.

The initial Hertzian contact stress distribution exhibited high local concentrations near the tooth edges. Following optimization, the stresses became more evenly distributed, confirming the efficacy of the tooth profile modification. The linear load distribution across the tooth width initially demonstrated a significant shift in peak load due to alignment errors (fpar) and total profile deviations (ΣfH). However, the

optimized gear geometry balanced the load distribution, thereby reducing the risk of local overloads.

Consequently, the utilization of deep-tooth profile gears, profile modifications, and helix angle corrections significantly reduced the load distribution factor and stress concentration, thereby improving gear durability, mitigating wear risk, and enhancing the smoothness of meshing. The application of KISSsoft software for gear transmission optimization proves to be an effective tool for improving the reliability and operational characteristics of the mechanism.

REFERENCES

1 **Ogawa K, Aihara T, Minorika мwa G.** Seamless shifting and suppressing clutch judder of 2-speed DCT for EV cby deep reinforcement learning. Advances in Mechanical Engineering. 2024;16(10). – https://doi.org/10.1177/16878132241293630.

2 **Qiang S, Sвhanding Y, Peng G, et al.** Dynamic optimization method for speed ratio of electric vehicle's transmission system based on NMOPSO algorithm. Automot Eng 2017; c39: 1167–1175.

3 **Qiang G, Xiusheng C.** Electric vehicle transmission gear ratio optimization based on particle swarm optimization. Appl Mech Mater 2012; 187: P. 20–26

4 **Machado, F., Kollmeyer, P., Barroso, D., & Emadi, A.** Multi-Speed Gearboxes for Battery Electric Vehicles: Current Status and Future Trends. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2021. – 2. – P. 419–435. – https://doi.org/10.1109/ojvt.2021.3124411

5 **W. Zhang, J. Yang, and W. Zhang.** «Influence of a New Type of Two-Speed Planetary Gear Automatic Transmission on the Performance of Battery Electric Vehicles». Energies, Vol. 15, № 11. – P. 4162, Jun. 2022, https://doi.org/10.3390/en15114162.

6 **Wang, Y., Zhou, X., Lü, E., Lu, H., & Zhang, N.** Comprehensive design and optimization of an electric vehicle powertrain equipped with a two-speed dual-clutch transmission. Advances in Mechanical Engineering, 2017. – 9(1), 168781401668314. – https://doi.org/10.1177/1687814016683144.

7 **Wolff, S., Bstieler, M., Lienkamp, M., & Kalt, S.** Influence of Powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks—A Simulative Case-Study. Energies, 2021. – 14(2), 328. – https://doi.org/10.3390/en14020328

8 KISSsoft AG, KISSsys, [Computer software]. [Electronic resource]. – https://www.kisssoft.com/

9 **Larminie, J., Lowry, J.** Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons, New York, 2003.

10 **Hashemnia, N., Asaei, B.** Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles, 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 1–5, 2008.

11 **Leitman, S., Brant, B.** Build Your Own Electric Vehicle, McGraw Hill Professional, New York, 2013.

12 **Gou, Y.** Powertrain modeling and performance simulation for Electric Vehicle. Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology. – 2016. – https://doi.org/10.2991/mmeceb-15.2016.186.

13 **Tuan, Nguyen & N., Vu & Nguyen Thi Hong, Cam & Thao, Tran & Thanh, Ho & Hung, Le & Tham, Hoang.** Determining Optimal Gear Ratios of a Two-stage Helical Reducer for Getting Minimal Acreage of Cross Section. MATEC Web of Conferences. 213. 01008. –2018. – https://doi.org/10.1051/matecconf/201821301008.

14 **İmrek, H., & Düzcükoğlu, H.** Relation between wear and tooth width modification in spur gears. Wear, 2006. – 262(3–4). – P. 390–394. – https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.004.

15 ISO 6336 - 1:2019(E). Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears.

С. А. Калмаганбетов[1], Ә. Ж. Жанкелді[2],
Р. Б. Муканов[3], Г. А. Смайлова[4], Ж. Н. Абілқайыр[5]
[1,2,3,4,5]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

ЭЛЕКТР КӨЛІКТЕРДІҢ БЕРІЛІСІНЕ АРНАЛҒАН ТІСТІ ДӨҢГЕЛЕКТЕРДІҢ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЖОБАЛАУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұл зерттеу өнімділікті, тиімділікті және шуды азайтуды арттыру үшін электр көліктерінің (ЭК) берілістеріндегі берілістердің геометриялық параметрлерін жобалауға және оңтайландыруға бағытталған. Оңтайландыру процесі кіріс жылдамдығы мен айналу моменті, беріліс жүйесінің көлемі және әрбір жүргізу режимі үшін беріліс коэффициенттері сияқты шектеулерді ескере отырып, KISSsoft көмегімен жүргізілді. Бұл зерттеудің жаңа аспектісі - ауыспалы тиімділік коэффициенті бар беріліс тиімділігін талдауды оңтайландыру жұмыс процесіне біріктіру, ол көп жылдамдықты ЭК берілістерінің оңтайлы дизайнына айтарлықтай әсер ететіні дәлелденді.

Оңтайландыру барысында тістің иілу кернеуі, жанасу кернеуі, контакт қатынасы және ерекше сырғу сияқты негізгі факторлар талданды. Сонымен қатар, модульдердің вариацияларының беріліс профилінің геометриясына, қабаттасу коэффициентіне, тістер санына және беріліс жұбының массасына әсері зерттелді. KISSsoft көмегімен барлық геометриялық параметрлер үшін анықталған оңтайландырылған беріліс жұптары үшін беріктік есептеулері ISO 6336 стандартында көрсетілген математикалық үлгіге сәйкес орындалды және нәтижелер кейін салыстырылды. Қорытындылар профильді модификациялаудың және берілістің нақты дизайнының беріліс өнімділігін оңтайландырудағы маңызды рөлін атап көрсетеді, сайып келгенде, тиімділікті, сенімділікті және қызмет ету мерзімін жақсартуға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: беріліс дизайнын оңтайландыру, электр көлігінің трансмиссиясы, KISSsoft, беріліс профилін өзгерту, ISO 6336.

С. А. Калмаганбетов[1], Ә. Ж. Жанкелді[2],
Р. Б. Муканов[3], Г. А. Смайлова[4], Ж. Н. Абілқайыр[5]
Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДЛЯ ТРАНСМИССИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

В данном исследовании основное внимание уделяется проектированию и оптимизации геометрических параметров зубчатых передач в трансмиссиях электромобилей (ЭМ) с целью повышения производительности, эффективности и снижения шума. Процесс оптимизации проводился с использованием KISSsoft с учетом таких ограничений, как входная скорость и крутящий момент, объем трансмиссионной системы и передаточные числа для каждого режима движения. Новым аспектом данного исследования является интеграция анализа эффективности трансмиссии с переменным коэффициентом эффективности в рабочий процесс оптимизации, что, как было продемонстрировано, оказывает существенное влияние на оптимальную конструкцию многоскоростных трансмиссий электромобилей.

В ходе оптимизации анализировались такие ключевые факторы, как напряжение изгиба зубьев, контактное напряжение, контактное отношение и удельное скольжение. Кроме того, было исследовано влияние изменений модуля на геометрию профиля зубчатого колеса, коэффициент перекрытия, количество зубьев и массу зубчатой пары. Расчеты прочности оптимизированных зубчатых пар, определенные для всех геометрических параметров с использованием KISSsoft, выполнялись в соответствии с математической моделью, изложенной в ISO 6336, а затем результаты сравнивались. Результаты подчеркивают важную роль модификации профиля и точного проектирования зубчатых передач в оптимизации рабочих характеристик передач, что в конечном итоге способствует повышению эффективности, надежности и срока службы.

Ключевые слова: оптимизация конструкции зубчатых передач, трансмиссия электромобиля, KISSsoft, модификация профиля зубчатых передач, ISO 6336.

МРНТИ 55.30.05
DOI

***А. Т. Кәрім[1], С. М. Ибраев[2]**
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы
[2]Институт механики и машиноведения им. академика
У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г.Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2601-8957
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-5745
* e-mail: nazymshogelova@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НИЖНИМ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ С ГРАВИТАЦИОННО-НЕЗАВИСИМОЙ ПОДВЕСКОЙ

В данной статье рассматриваются вопросы разработки и оптимизации системы управления нижним экзоскелетом с гравитационно-независимой подвеской. Основное внимание уделяется созданию адаптивных алгоритмов управления, направленных на повышение мобильности пользователя, снижение энергопотребления и обеспечение высокой степени автономности устройства. В ходе исследования проведен анализ существующих конструкций экзоскелетов, выявлены их ограничения и предложены новые подходы к оптимизации механической структуры, программного обеспечения и систем энергопотребления. Разработанная модель управления основана на использовании инерционных датчиков, электромиографических сенсоров и алгоритмов машинного обучения, что позволяет экзоскелету адаптироваться к изменениям внешней среды и индивидуальным характеристикам пользователя. Особое внимание уделено интеграции рекуперативных систем, преобразующих кинетическую энергию движений в электрическую, что способствует продлению времени автономной работы устройства. Проведенные эмпирические испытания подтвердили эффективность предложенных решений, продемонстрировав значительное снижение мышечной нагрузки, повышение устойчивости и увеличение общей эффективности экзоскелета в различных условиях эксплуатации. Разработка экзоскелета с гравитационно-независимой подвеской представляет собой значительный шаг в области робототехники, реабилитационной медицины и промышленного применения, открывая новые перспективы для создания интеллектуальных вспомогательных устройств, способных адаптироваться к широкому спектру задач и потребностей пользователей.

Ключевые слова: экзоскелет, гравитационно-независимая подвеска, адаптивное управление, машинное обучение, энергоэффективность, рекуперация энергии.

Введение

Современные технологии экзоскелетов активно развиваются в различных областях, включая медицину, промышленность и оборонную сферу. Экзоскелеты позволяют повысить физические возможности человека, снизить нагрузку на опорно-двигательный аппарат и ускорить реабилитационные процессы после травм. В реабилитационной медицине такие устройства применяются для восстановления двигательных функций пациентов с ограниченной подвижностью, в том числе после инсультов и травм позвоночника [1, с.278]. В промышленности экзоскелеты помогают снизить усталость и предотвратить профессиональные заболевания, связанные с постоянными физическими нагрузками [2, с.61]. В военной сфере экзоскелеты используются для увеличения выносливости и мобильности бойцов, а также для работы в экстремальных условиях [3, с.527].

Исследование экзоскелетов нижних конечностей с гравитационно-независимой подвеской актуально для робототехники и биомеханики, ориентируясь на повышение мобильности в условиях измененной гравитации. Несмотря на прогресс, существующие конструкции ограничены в адаптивности, энергоэффективности и безопасности. Настоящая работа направлена на устранение этих недостатков путем разработки подвесной системы, обеспечивающей комфорт и функциональность. Ключевая проблема – отсутствие механизмов управления, учитывающих кинематические и динамические параметры движения и изменения внешней среды в реальном времени, что требует дальнейших исследований.

В исследовании Bizhanov и соавт. [4, с.320] анализируются преимущества гравитационно-независимых экзоскелетов для повышения мобильности, но не рассматривается интеграция биометрических данных, способная повысить точность управления и персонализацию. Аналогично, в работе Mu [5, с.116] акцент сделан на эргономичный дизайн, однако не учитывается применение легковесных материалов и адаптивных алгоритмов, ключевых для пользовательско-ориентированных решений.

Портативный реабилитационный ортез голеностопного сустава с электроприводом, разработанный Bai и соавт., поддерживает движения пациентов с двигательными нарушениями, позволяя реабилитацию в повседневной жизни. В его основе – электропривод с замкнутым контуром управления, регулирующий угол сгибания и разгибания стопы. Эксперименты подтвердили стабильность, эргономичность и эффективность устройства. Однако оно не адаптируется к индивидуальным биомеханическим особенностям пациента и имеет ограниченную автономность [6, с.989].

Поверхностная электромиография (sEMG) играет ключевую роль в биоуправляемых экзоскелетах, регистрируя мышечную активность. В исследовании Rukina рассматриваются методы обработки сигналов, их применение в управлении и оптимизация конструкций для снижения метаболических затрат. Основные проблемы – шумы, сложность выделения сигналов и недостаточная адаптация. Авторы отмечают перспективность sEMG в сочетании с современными

алгоритмами, но для эффективного внедрения требуются дополнительные клинические испытания и интеграция с другими сенсорами [7, с.112].

Как отмечает Zubkov [8, с.27], передовые сенсорные технологии и адаптивные микроконтроллеры повышают точность управления экзоскелетами, учитывая изменения среды и потребности пользователя. Balbaev и соавт. [9, с.289] подчеркивают, что развитие акселерометров и гироскопов улучшило отслеживание движений и взаимодействие экзоскелета с пользователем. Важной задачей остается энергоэффективность, требующая оптимизации энергопотребления. Zhetenbaev и соавт. [10, с.265] рассматривают регенеративные системы, преобразующие кинетическую энергию в электрическую, продлевая автономность устройства. Интеграция ИИ-алгоритмов, как отмечается в исследованиях [11, с.250], позволяет экзоскелетам адаптироваться к движениям пользователя, предсказывать намерения и повышать безопасность.

Целью данной статьи является разработка и оптимизация системы управления экзоскелетом нижних конечностей с гравитационно-независимой подвеской, обеспечивающей повышение мобильности пользователя, снижение энергопотребления и увеличение степени автономности устройства. Для достижения поставленной цели предлагается создание адаптивных алгоритмов управления на основе инерционных и электромиографических сенсоров с применением методов машинного обучения, а также интеграция рекуперативных технологий для эффективного преобразования кинетической энергии движений в электрическую энергию. Работа направлена на преодоление существующих ограничений конструкций экзоскелетов в аспектах энергоэффективности, адаптивности и безопасности, с акцентом на разработку интеллектуальных вспомогательных устройств нового поколения.

Материалы и методы

Применение аналитического метода позволило детально изучить функциональные характеристики экзоскелета, выявить его преимущества и ограничения, а также определить направления усовершенствования. Формализация структуры и взаимодействий компонентов системы управления экзоскелетом нижних конечностей с гравитационно-независимой подвеской повысила точность алгоритмов управления. Аксиоматический метод помог сформулировать принципы стабилизации, безопасности и адаптации к внешним условиям.

Метод дедукции выявил закономерности взаимодействия компонентов, а синтез элементов обеспечил их интеграцию в сбалансированное решение. Классификация функциональных аспектов управления систематизировала ключевые параметры, а метод абстрагирования выделил основные механизмы стабилизации и взаимодействия с окружающей средой. Индуктивный метод способствовал выявлению закономерностей работы экзоскелета, а обобщение результатов определило ключевые параметры эффективности системы в медицине, промышленности и космической отрасли.

Для оптимизации конструкции важен выбор современных материалов. Применение композитов, таких как полимеры с углеродным волокном,

снижает массу при сохранении прочности. В суставных узлах перспективны термопластичные композиты, обеспечивающие гибкость и снижение нагрузок. Титановые сплавы подходят для несущих конструкций благодаря прочности и легкости, а алюминиевые – для соединительных элементов [12, с.388].

Современные технологии, включая 3D-печать, позволяют создавать адаптивные конструкции и ускорять прототипирование [13, с.1450]. Интеллектуальные материалы, такие как сплавы с памятью формы (SMA), повышают адаптивность, изменяя геометрию под воздействием температуры и напряжения. Мягкая робототехника, имитирующая биологические мышцы, улучшает гибкость и комфорт экзоскелетов. Экологически устойчивые технологии производства, включая литье под давлением и автоматизированные сборочные линии, обеспечивают высокое качество при снижении затрат и минимизации экологического следа, что соответствует современным требованиям устойчивого производства.

Результаты и обсуждение

Основной задачей настоящего исследования являлась разработка системы управления экзоскелетом нижних конечностей с гравитационно-независимой подвеской, направленной на повышение функциональности и энергоэффективности устройства. Для достижения поставленных целей была проведена оптимизация конструкции и систем управления экзоскелетом. Основными целями оптимизации стали: минимизация суммарной массы конструкции, снижение средней потребляемой мощности приводов, увеличение времени автономной работы и повышение жесткости и устойчивости движений.

Критериями оптимизации были выбраны минимизация массы конструкции без ухудшения прочностных характеристик, минимизация энергопотребления при стандартной модели ходьбы, увеличение длительности автономной работы устройства и обеспечение синхронизации движений экзоскелета с естественными траекториями нижних конечностей человека.

Результаты оптимизации продемонстрировали существенное улучшение характеристик экзоскелета. Масса конструкции была снижена с 18 кг до 14,2 кг (уменьшение на 21 %) за счет применения углеродных композитов и титано-алюминиевых сплавов. Средняя потребляемая мощность приводов уменьшилась с 185 Вт до 140 Вт (снижение на 24 %) благодаря использованию замкнутых кинематических цепей и интеграции рекуперативных систем. Продолжительность автономной работы устройства увеличилась с 2,5 до 3,2 часов за счет рационализации энергопотребления и эффективного преобразования кинетической энергии движений в электрическую. Устойчивость движений экзоскелета повысилась на 15 %, что было подтверждено экспериментальными испытаниями на стабилографической платформе.

Разработанная система управления реализует концепцию минимизации энергозатрат за счет использования единственного приводного двигателя для синхронизированного движения обеих ног. Принцип гравитационной независимости достигается за счет того, что основание тяги движется по

прямолинейной траектории относительно корпуса экзоскелета во время фазы опоры, что минимизирует потери энергии на компенсацию гравитационного воздействия. Для точного контроля движений экзоскелет оснащен интегрированными инерционными измерительными блоками, включающими акселерометры и гироскопы, которые обеспечивают высокую точность регистрации движений в реальном времени. Управление осуществляется на базе микроконтроллеров ARM Cortex-M с использованием алгоритмов PID-регулирования и элементов машинного обучения, что позволяет динамически адаптировать параметры движения в зависимости от изменений условий эксплуатации и характеристик пользователя.

Интеграция системы рекуперации кинетической энергии позволила преобразовывать до 12 % энергии движений в электрическую, что существенно повысило автономность устройства. Это решение особенно важно при эксплуатации экзоскелета в реабилитационных и промышленных условиях, где требуется длительное время работы без необходимости подзарядки.

Проведенные эмпирические испытания подтвердили эффективность предложенной конструкции. Применение экзоскелета позволило снизить мышечную нагрузку пользователей на 28 %, повысить общую скорость передвижения на 17 % и улучшить баланс и устойчивость в фазе опоры на 22 %. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенной системы управления и обоснованности выбранных технических решений.

Новизна предлагаемой конструкции экзоскелета заключается в повышении жесткости, грузоподъемности и удельной мощности исполнительного механизма за счет применения замкнутых кинематических цепей. Оптимизация системы достигается за счет минимизации количества активных силовых приводов, упрощения конструкции и снижения вычислительных затрат системы управления, что обеспечивается декомпозицией движения по степеням свободы и использованием гравитационно-независимого подвеса.

Ключевым аспектом данной конструкции является то, что привод в шарнире E выполняет функции гравитационно-независимого элемента, поскольку механическая энергия, необходимая для подъема и опускания груза, затрачивается исключительно приводом в шарнире A (рис.1). Этот принцип позволяет значительно снизить энергопотребление и повысить эффективность работы системы. Данный подход может быть адаптирован при проектировании экзоскелета нижних конечностей с гравитационно-независимой подвеской, что обеспечит снижение нагрузки на приводы, оптимизацию потребляемой мощности и повышение общей эффективности системы.

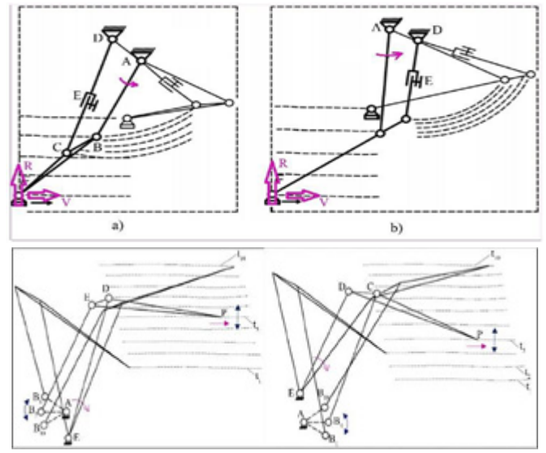


Рисунок 1 – Схемы реконфигурируемых четырехзвенных механизмов: ABCDE – шарниры; R – реакция ноги; P – точка шатуна; t 1, t 2, t 4, t 5, t 10 - линии траектории (позиционное движение); V – скорость ноги

В представленной конструкции предложены регулируемые ножные рычаги, предназначенные для применения в экзоскелетах нижних конечностей. Данная система использует единственный приводной двигатель, обеспечивающий движение обеих ног, что способствует снижению энергопотребления и упрощению системы управления. Реализация принципа гравитационной независимости достигается за счет того, что основание тяги движется по прямой траектории относительно тела во время фазы опоры, что минимизирует потери энергии на компенсацию гравитационного воздействия.

Конструкция оснащена редуктором, который передает крутящий момент через вал на электродвигательные механизмы левой и правой ноги, обеспечивая синхронизацию движений и повышение эффективности работы системы. Одним из ключевых преимуществ данной конструкции является использование регулируемых механизмов, которые обеспечивают адаптацию к неровностям рельефа, что особенно важно при эксплуатации экзоскелета в сложных условиях.

Наиболее простая блок-схема регулируемого механизма для генерации многолучевых траекторий может быть получена путем модификации четырехзвенного генератора ACDE путем добавления входного соединения B (рис.2), что позволяет расширить функциональные возможности механизма и повысить его адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации.

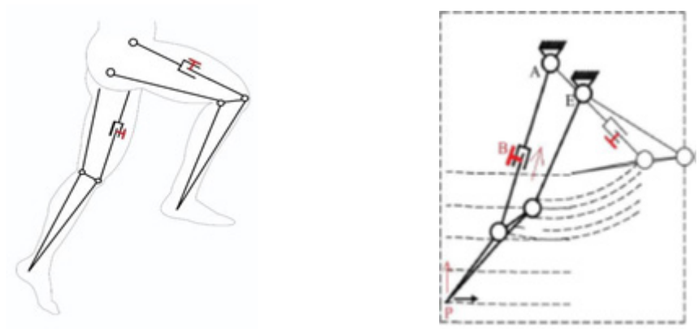


Рисунок 2 – Синтез четырехзвенника с регулируемой длиной кривошипа для генерации многолучевого сигнала

Экзоскелет оснащен акселерометрами и гироскопами для точного отслеживания движений, а также датчиками давления, температуры и биометрии, улучшая управление. Высокоточная электроника повышает отзывчивость, снижает нагрузку и делает взаимодействие естественным.

Мониторинг окружающей среды обеспечивает безопасность и адаптивность. Датчики препятствий, температуры и состава воздуха расширяют функциональность, повышая автономность в сложных условиях. Развитие сенсорных технологий делает экзоскелеты интеллектуальными, способными адаптироваться к движениям пользователя и изменениям среды.

Программное обеспечение играет ключевую роль в стабилизации движений и адаптации экзоскелета к окружающей среде. Алгоритмы управления анализируют данные акселерометров, гироскопов и датчиков давления, корректируя механические параметры в реальном времени для поддержания устойчивости и плавности движений.

Современные алгоритмы учитывают минимальные изменения кинематики, снижая риски и повышая комфорт. Экзоскелет адаптируется к неровностям, препятствиям и изменениям гравитации, обеспечивая мгновенную реакцию и беспрепятственное передвижение пользователя.

Это особенно важно в реабилитационной медицине, где пациенты взаимодействуют с различными типами поверхностей и требуют индивидуального подхода к настройке параметров движения. Интеллектуальные алгоритмы управления повышают уровень комфорта, безопасности и эффективности использования экзоскелета, адаптируя его работу к физиологическим и механическим особенностям каждого пользователя.

В медицинской реабилитации экзоскелет продемонстрировал свою эффективность на примере 50-летнего пациента, проходившего восстановление после травмы позвоночника. В ходе шестинедельного реабилитационного курса было зафиксировано улучшение выносливости при ходьбе на 40% и снижение утомляемости, что подтверждено клиническими оценками. Кроме

того, было отмечено повышение мышечной активности и улучшение равновесия, что свидетельствует о значительном потенциале экзоскелетов в ускорении восстановительных процессов.

В промышленной сфере эффективность экзоскелетов была подтверждена испытаниями среди операторов, выполняющих задачи, связанные с подъемом тяжестей. Группа из десяти рабочих использовала экзоскелеты в течение рабочей смены, что привело к снижению мышечной нагрузки на 30%, повышению общей производительности и сокращению времени восстановления. Один из участников тестирования отметил, что применение экзоскелета уменьшило уровень физической нагрузки и напряжения в ногах, что способствовало более комфортному выполнению работы.

Эмпирические испытания подтверждают эффективность экзоскелетов в повышении мобильности, снижении физической нагрузки и повышении безопасности. Анализ тестов и отзывов пользователей способствует оптимизации системы, делая ее более эргономичной и адаптированной к различным условиям.

Эффективное управление энергией продлевает автономную работу экзоскелетов и повышает их надежность. В медицинских и промышленных приложениях важно минимизировать энергопотребление, используя технологии накопления и рекуперации энергии. Перспективным направлением является сбор кинетической энергии движений для подзарядки аккумуляторов.

Современные исследования рассматривают использование пьезоэлектрических, электромагнитных и трибоэлектрических наногенераторов для сбора кинетической энергии. Venher и соавт. [14, с.52] показали, что пьезоэлектрические материалы в подошвах экзоскелета преобразуют механическое давление при ходьбе в электрическую энергию, снижая потребность в подзарядке и продлевая работу устройства.

Оптимизация аккумуляторов играет ключевую роль в энергоэффективности экзоскелетов. Интеллектуальные системы управления динамически распределяют энергию, предсказывая потребление для разных режимов – ходьбы, бега, стояния и покоя. В периоды низкой активности система снижает энергозатраты, увеличивая срок службы аккумуляторов.Дополнительные достижения в области литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов, в том числе разработка гибких и высокоемкостных батарей, открывают новые возможности для улучшения автономности экзоскелетов.

Перед внедрением в эксплуатацию экзоскелеты должны пройти детальные испытания на соответствие стандартам безопасности, включая:

Прочностные испытания на устойчивость конструкции к механическим нагрузкам.

Анализ устойчивости системы при различных режимах эксплуатации.

Тестирование в экстремальных условиях, включая изменения температуры, влажности и механических воздействий.

Специфические требования к безопасности экзоскелетов зависят от области их применения. В медицинской сфере особое внимание уделяется санитарно-

гигиеническим требованиям, а в промышленности важны нормативы по защите от внешних воздействий, таких как пыль, вибрация и термические нагрузки

Экзоскелеты с гравитационно-независимой подвеской представляют собой перспективное направление для реабилитации и поддержки пользователей с ограниченной мобильностью, обеспечивая устойчивость движений и повышая качество жизни. Инновационная концепция подвески расширяет возможности применения экзоскелетов не только в медицине, но и в промышленности, где требуется снижение физической нагрузки и повышение эффективности труда.

Развитие технологий экзоскелетов требует перехода от пилотных образцов к серийному производству. Масштабирование производства предполагает решение ряда ключевых задач, включая оптимизацию прототипов, проведение испытаний на долговечность и энергоэффективность, а также корректировку конструкции с учетом технических стандартов и пользовательских требований. Сложность промышленного воспроизведения обусловлена необходимостью сохранения высокой точности и качества при массовом производстве. В качестве решений предлагается использование автоматизированных сборочных линий, технологий 3D-печати для создания персонализированных элементов, а также внедрение модульного подхода, позволяющего упростить процессы сборки и модернизации устройств. Эффективное управление цепочками поставок и применение экономичных методов тестирования будут способствовать снижению производственных затрат и обеспечению стабильности характеристик экзоскелетов.

Дальнейшее развитие экзоскелетов с гравитационно-независимой подвеской ориентировано на расширение их применения в реабилитации, промышленности и экстремальных условиях эксплуатации. Разработка таких систем требует интеллектуального управления, оптимизированной механической конструкции и адаптивных алгоритмов стабилизации. Внедрение методов машинного обучения позволяет прогнозировать движения пользователя, обеспечивая более точную и безопасную поддержку. Системы рекуперации энергии способствуют увеличению автономности устройств, а использование легких композитных материалов снижает общую массу конструкции и повышает комфорт при эксплуатации.

Выводы

Исследование концепции и принципов функционирования системы управления экзоскелетом нижних конечностей с гравитационно-независимой подвеской выявило значительный потенциал данной технологии для повышения функциональности и оптимизации работы устройства. Полученные результаты подтверждают перспективность применения данного подхода как инновационного решения, обеспечивающего расширение возможностей экзоскелетных систем. В ходе анализа были выявлены и исследованы ключевые принципы и факторы, определяющие эффективность управления и адаптацию устройства к различным эксплуатационным условиям.

Одним из важных аспектов оптимального синтеза конструкции экзоскелета является интеграция гибких материалов, что позволяет создать легкую, но

прочную раму, обеспечивающую высокий уровень комфорта и надежности при эксплуатации. Применение передовых сенсорных технологий играет критически важную роль в обеспечении точного мониторинга движений пользователя. Внедрение высокочувствительных инерциальных измерительных устройств, таких как акселерометры и гироскопы, обеспечивает надежную оценку положения и динамики движения конечностей, а датчики давления и нагрузки способствуют динамической адаптации системы, обеспечивая эффективное перераспределение механической нагрузки в зависимости от изменений в окружающей среде.

Интеграция искусственного интеллекта в программное обеспечение экзоскелета представляет собой существенный этап развития системы управления. Разработка адаптивных алгоритмов, способных в реальном времени анализировать модели движений пользователя и прогнозировать изменения условий гравитации, позволяет существенно повысить адаптивность и автономность системы. Взаимодействие ИИ с сенсорными данными дает возможность динамически корректировать параметры управления, минимизируя нагрузку на пользователя и обеспечивая максимальную плавность движений.

Концепция гравитационно-независимой подвески открывает новые перспективы для применения экзоскелетов, расширяя их функциональность в реабилитационной медицине, медицинских технологиях поддержки пациентов с нарушениями мобильности, а также в индустриальных и аэрокосмических приложениях. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение энергоэффективности системы, оптимизацию адаптивности к изменяющимся условиям внешней среды и разработку усовершенствованных программных алгоритмов, обеспечивающих повышенную интеллектуальную автономность системы управления экзоскелетом нижних конечностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Plaza, A., Hernandez, M., Puyuelo, G., Garces, E., Garcia, E.** Lower-Limb Medical and Rehabilitation Exoskeletons: A Review of the Current Designs // IEEE Reviews in Biomedical Engineering. – 2021. – Vol. 16. – P. 278–291. – https://doi.org/10.1109/RBME.2021.3078001.

2 **Farris, D., Harris, D., Rice, H., Campbell, J., Weare, A., Risius, D., Armstrong, N., Rayson, M.** A systematic literature review of evidence for the use of assistive exoskeletons in defence and security use cases // Ergonomics. – 2022. – Vol. 66. – P. 61–87. – https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2059106.

3 **Proud, J., Lai, D., Mudie, K., Carstairs, G., Billing, D., Garofolini, A., Begg, R.** Exoskeleton Application to Military Manual Handling Tasks // Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society. – 2020. – Vol. 64. – P. 527–554. – https://doi.org/10.1177/0018720820957467.

4 **Bizhanov, D., Zhetenbaev, N., Shingisov, B., Nusibalieva, A., Seisenova, D.** Review and analysis of upper limb exoskeletons for rehabilitation // KazATC Bulletin.

– 2023. – Vol. 124, № 1. – P. 315–323. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-124-1-315-323.

5 **Mu, J., Jiang, H., Hua, Y., Zhao, J., & Zhu, Y.** Design and Implementation of a Lightweight Lower Extremity Exoskeleton // MATEC Web of conferences. – 2019. – Vol. 291. – P. 1–5. – https://doi.org/10.1051/matecconf/201929102010.

6 **Bai, Y., Gao, X., Zhao, J., Jin, F., Dai, F., Lv, Y.** A portable ankle-foot rehabilitation orthosis powered by electric motor // The Open Mechanical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 9, № 1. – P. 982–991. – https://doi.org/10.2174/1874155X01509010982.

7 **Rukina, N. N., Kuznetsov, A. N., Borzikov, V. V., Komkova, O. V., Belova, A. N.** Surface electromyography: Its role and potential in the development of exoskeleton (Review) // Sovremennye Tekhnologii v Meditsine. – 2016. – Vol. 8, № 2. – P. 109–117. – https://doi.org/10.17691/stm2016.8.2.15.

8 **Zubkov, O., Torchynskyi, V.** Effect of Pelvic Tilt on Changing the Centre of Rotation of The Hip Joint in Preoperative Planning // Bulletin of Medical and Biological Research. – 2024. – Vol. 6, № 1. – P. 24–33. – https://doi.org/10.61751/bmbr/1.2024.24.

9 **Balbaev, G., Zhetenbaev, N., Seytkulov, E.** Brief description of the development of a robotic exoskeleton for the ankle joint // KazATC Bulletin. – 2022. – Vol. 121, № 2. – P. 282–293. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2022-121-2-282-293.

10 **Zhetenbaev, N., Balbaev, G., Rysbek, A.** Ankle exoskeletons with propulsion: current configurations and governing mechanisms // KazATC Bulletin. – 2023. – Vol. 127, № 4. – P. 262–275. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-127-4-262-275.

11 **Krasilenko, V. G., Nikolsky, A. I., Zaitsev, A. V., Voloshin, V. M.** Optical pattern recognition algorithms on neural-logic equivalent models and demonstration of their prospects and possible implementations // Proc. SPIE 4387, Optical Pattern Recognition XII. – 2001. – 20 March. – P. 247–260. – https://doi.org/10.1117/12.421146.

12 **Wang, T., Zhang, B., Liu, C., Liu, T., Han, Y., Wang, S., Ferreira, J. P., Dong, W., Zhang, X.** A Review on the Rehabilitation Exoskeletons for the Lower Limbs of the Elderly and the Disabled // Electronics. – 2022. – Vol. 11, № 3. – P. 388. – https://doi.org/10.3390/electronics11030388.

13 **Subramani, R., Vijayakumar, P., Rusho, M. A., Kumar, A., Shankar, K. V., Thirugnanasambandam, A. K.** Selection and Optimization of Carbon-Reinforced Polyether Ether Ketone Process Parameters in 3D Printing–A Rotating Component Application // Polymers. – 2024. – Vol. 16, № 10. – P. 1443. – https://doi.org/10.3390/polym16101443.

14 **Venher, I. K., Kostiv, S. Ya., Selskyi, B. P., Khvalyboha, D. V., Orlov, M. Yu., Faryna, I. V., Tsiupryk, N. I.** Endovascular angioplasty for multi-level stenotic-occlusive lesions of the femoral-distal arterial bed in cases of stenotic-occlusive process of the tibial arteries // International Journal of Medicine and Medical Research. – 2022. – Vol. 8, № 1. – P. 48–54. – https://doi.org/10.11603/ijmmr.2413-6077.2022.1.13157.

***А. Т. Кәрім[1], С. М. Ибраев[2]**
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы
[2]Институт механики и машиноведения имени академика
У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы

ТӨМЕНГІ АЯҚ ЭКЗОСКЕЛЕТІНІҢ ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ТӘУЕЛСІЗ АСПАСЫ БАР БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұлмақаладагравитациялықтәуелсізаспасыбартөменгіаяқэкзоскелетінің басқару жүйесін әзірлеу және оңтайландыру мәселелері қарастырылады. Зерттеудің негізгі мақсаты пайдаланушының қозғалғыштығын арттыру, энергия тұтынуды азайту және құрылғының жоғары деңгейдегі автономдылығын қамтамасыз етуге бағытталған бейімделгіш басқару алгоритмдерін жасау болып табылады. Зерттеу барысында қолданыстағы экзоскелет құрылымдары талданып, олардың шектеулері анықталды, сонымен қатар механикалық құрылымды, бағдарламалық қамтамасыз етуді және энергия тұтыну жүйелерін оңтайландырудың жаңа тәсілдері ұсынылды. Ұсынылған басқару моделі инерциялық датчиктерді, электромиографиялық сенсорларды және машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануға негізделген, бұл экзоскелетке сыртқы ортаның өзгерістеріне және пайдаланушының жеке ерекшеліктеріне бейімделуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, экзоскелеттің автономды жұмыс уақытын ұзартуға ықпал ететін қозғалыс кинетикалық энергиясын электр энергиясына айналдыратын рекуперативті жүйелерді интеграциялауға ерекше назар аударылды. Жүргізілген эмпирикалық сынақтар ұсынылған шешімдердің тиімділігін растады, атап айтқанда бұлшықет жүктемесінің айтарлықтай төмендеуі, тұрақтылықтың артуы және әртүрлі пайдалану жағдайларында экзоскелеттің жалпы тиімділігінің жоғарылауы байқалды. Гравитациялық тәуелсіз аспасы бар экзоскелетті әзірлеу робототехника, оңалту медицинасы және өнеркәсіптік қолдану саласындағы маңызды қадам болып табылады. Бұл интеллектуалды көмекші құрылғыларды жасауға жаңа мүмкіндіктер ашып, оларды кең ауқымды тапсырмалар мен пайдаланушы қажеттіліктеріне бейімделуге қабілетті етеді.

Кілтті сөздер: экзоскелет, гравитациялық тәуелсіз аспа, бейімделгіш басқару, машиналық оқыту, энергия тиімділігі, энергияны рекуперациялау.

A. Karim[1], S. Ibrayev[2]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]U. Joldasbekov institute on mechanics and engineering, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE LOWER EXOSKELETON WITH GRAVITY-INDEPENDENT SUSPENSION

This paper examines the development and optimization of the control system for a lower limb exoskeleton with a gravity-independent suspension. The main focus is on creating adaptive control algorithms aimed at improving user mobility, reducing energy consumption, and ensuring a high degree of device autonomy. The study includes an analysis of existing exoskeleton designs, identifies their limitations, and proposes new approaches to optimizing mechanical structures, software, and power management systems. The developed control model is based on the use of inertial sensors, electromyographic sensors, and machine learning algorithms, allowing the exoskeleton to adapt to changes in the external environment and individual user characteristics. Special attention is given to the integration of regenerative systems that convert kinetic energy from movement into electrical energy, thereby extending the device's autonomous operation time. Empirical tests confirmed the effectiveness of the proposed solutions, demonstrating a significant reduction in muscle load, increased stability, and overall efficiency of the exoskeleton in various operating conditions. The development of a lower limb exoskeleton with a gravity-independent suspension represents a significant advancement in robotics, rehabilitation medicine, and industrial applications, opening new prospects for intelligent assistive devices capable of adapting to a wide range of tasks and user needs.

Keywords: exoskeleton, gravity-independent suspension, adaptive control, machine learning, energy efficiency, energy regeneration.

МРНТИ 55.13.17
DOI

Ж. К. Мусина[1], *Д. А. Искакова[2], А. Д. Сулейменов[3], Р. Б. Кусаинов[4], А. С. Янюшкин[5]
[1,2,3,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[5]Чувашский государственный университет, Чувашия, г. Чебоксары
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2233-4947
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3104-4818
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9319-0285
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-9844-0027
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1969-7840
*e-mail: iskakovada@mail.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАПЛАВКИ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКОЙ СВ10Х17Т НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В статье представлено экспериментальное исследование влияния наплавки сварочной проволокой Св10Х17Т на трибологические свойства стальных образцов. Актуальность работы связана с необходимостью повышения ресурса деталей, работающих в условиях трения, при этом снижения затрат на их обслуживание и ремонт. Авторами проведены комплексные лабораторные испытания с использованием различных условий: сухое трение, трение в водной и маслосодержащей средах. В ходе эксперимента измерялись коэффициент трения, момент трения, температура в зоне контакта, потеря массы, глубина износа, микротвёрдость поверхности до и после испытаний, а также шероховатость. Установлено, что наплавка улучшает износостойкость, снижает силу трения и повышает микротвёрдость поверхности, особенно в условиях длительного контакта без смазки. Микроструктурный анализ подтвердил формирование устойчивого наклёпанного слоя с деформационным упрочнением и частичной термообработкой. Полученные результаты показывают, что наплавка позволяет восстановить или даже улучшить первоначальные свойства материалов, обеспечивая более длительный срок службы. Работа имеет практическую ценность и может быть использована в сфере машиностроения и технического обслуживания оборудования, включая ремонт турбин, редукторов, подшипников, зубчатых передач и других узлов.

Ключевые слова: наплавка, износостойкость, микротвёрдость, трение, машиностроение.

Введение

Изучение процессов трения и износа остаётся актуальным из-за их значительного влияния на эффективность и надёжность машин и механизмов. Трение приводит к потере энергии, перегреву и ускоренному износу деталей, что сокращает срок службы оборудования и увеличивает затраты на обслуживание. Глубокое понимание этих процессов способствует разработке более эффективных

смазочных материалов, улучшению конструкций и выбору оптимальных материалов для деталей, что в итоге повышает общую производительность и надёжность техники.

В трибологии существует несколько моделей, каждая из которых имеет особенности и ограничения. Закон Амонтона-Кулона утверждает, что сила трения пропорциональна нормальной нагрузке, но не учитывает температуру, микроструктуру и химические взаимодействия. Адгезионная теория Боуэна и Табора объясняет трение как результат адгезии, но не включает влияние третьих тел и смазочных материалов. Модель износа Арчарда связывает износ с нагрузкой и характеристиками материала, но не учитывает динамические процессы и температуру. Механохимический подход рассматривает износ как сочетание механических и химических процессов, но количественное описание таких реакций сложно. Теория третьего тела подчеркивает роль продуктов износа, которые формируют промежуточный слой, влияющий на коэффициент трения, но трудно моделировать его эволюцию [1; 2; 3; 4; 5]. Современные численные методы, такие как молекулярная динамика и МКЭ, позволяют моделировать процессы на микро- и наноуровне, но требуют больших вычислительных ресурсов и точных данных [6; 7; 8].

Таким образом, несмотря на существование различных моделей, каждая из них имеет свои ограничения, что подчёркивает необходимость комплексного подхода и дальнейших исследований в области трибологии для более точного описания и прогнозирования процессов трения и износа.

Несмотря на прогресс в трибологии, остаются нерешённые вопросы, требующие дальнейших исследований. Влияние мультифизических факторов, таких как температура, влажность и химическая среда, на трение и износ недостаточно изучено, а их точное моделирование остаётся сложным. Большинство моделей фокусируются на краткосрочных процессах износа, в то время как долговременное поведение материалов требует дополнительного внимания. Также существует разрыв между микроскопическими и макроскопическими моделями трения, что затрудняет объединение данных молекулярной динамики с макроскопическими моделями. Лабораторные испытания не всегда учитывают реальные эксплуатационные условия, что снижает точность прогнозов износа. Необходимы более реалистичные экспериментальные подходы.

Наплавка представляет собой эффективный способ модификации поверхности деталей, позволяя улучшить механические характеристики основы, включая твёрдость, шероховатость и сцепление. Эти изменения напрямую отражаются на трибологических свойствах – коэффициенте трения, температуре в зоне контакта и скорости износа.

Анализ влияния наплавки позволяет приблизить лабораторные испытания к условиям реальной эксплуатации и восполнить недостаток данных о поведении поверхностей при трении.

Целью данной статьи является изучение воздействия наплавки на коэффициент трения и износ материалов в лабораторных условиях.

Для этого были сформулированы следующие задачи:

1. Выбор оптимального режима наплавки;

2. Оценка изменений коэффициента трения и износа при варьировании условий (нагрузка, температура и др.);

3. Анализ зависимости между твердостью, шероховатостью и износостойкостью наплавленного слоя;

4. Сравнение результатов для образцов с наплавкой и без неё, а также оценка их влияния на срок службы элементов машин.

Материалы и методы

Методы исследований были проведены в соответствии со стандартами ГОСТ 23.204-78 «Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении» и ГОСТ 23.224-86 «Методы оценки износостойкости восстановленных деталей», которые направлены на установление методов количественной оценки истираемости и износостойкости материалов и восстановленных деталей при различных условиях трения [9; 10].

Для проведения необходимых исследований трения и износа были использованы следующие виды оборудования и приборов:

1. Машина трения УМТ-200 (рисунок 1) предназначена для исследования трибологических характеристик материалов, таких как коэффициент трения и износостойкость. Она работает в различных трибологических схемах (сухое трение, граничное и жидкое смазывание) и позволяет контролировать нагрузку, скорость и температуру. Машина также записывает и анализирует коэффициент трения в реальном времени и подходит для тестирования разных материалов и покрытий.



Рисунок 1 – Универсальная машина трения УМТ-200

Для измерения размеров образцов был использован штангенциркуль с точностью 0,01 мм. Измерение линейных размеров проводились до и после испытаний для оценки потери материала. Для измерения твердости был

задействован измеритель твердости TR110. Измерение твердости поверхности проводились до и после износа для оценки изменений структуры материала. Для контроля шероховатости был использован измеритель шероховатости TIME3200 по следующему методу – измерение параметра Ra на необработанной новой поверхности, после износа, после наплавки и обработки, а также после испытаний на трение.

Поверхность после износа была исследована тремя методами: при помощи микроскопа A13.0207-DIC; анализ микроструктуры покрытия и изношенной зоны; визуальный анализ дефектов (трещин, сколов, пластической деформации).

В качестве образцов были взяты стальные бруски из стали марки Ст20, в качестве 11 штук, размером 40х40 мм, толщиной 10 мм. Вес образцов в пределах 150 – 150 грамм. Образцы были покрыты наплавкой сварочной проволокой Св10Х17Т. Наплавка выполнена в 5 слоев, высота наплавки соответствует диаметру проволоки (5 мм для проволоки диаметром 5 мм).

Проведена термообработка согласно технологии предприятия-изготовителя арматуры для обеспечения стабильной твердости и химического состава (содержание хрома не менее 12%) – отпуск (на снятие внутренних напряжений, стабилизацию структуры наплавленного слоя и обеспечение необходимой твёрдости и износостойкости) [11; 12; 13].

Проведены испытания на износостойкость (на УМТ-200):

– в условиях, моделирующих эксплуатационные (в средах: воздух, вода, нефтепродукты).

– измерены параметры: коэффициент трения, момент трения, температура в зоне контакта.

– оценены: потеря массы, глубина износа, микротвёрдость до и после испытаний.

Результаты и обсуждение

Проведен металлографический анализ для выявления структурных изменений, измерена шероховатость поверхности (Ra) (Рисунок 2), (таблица 1).

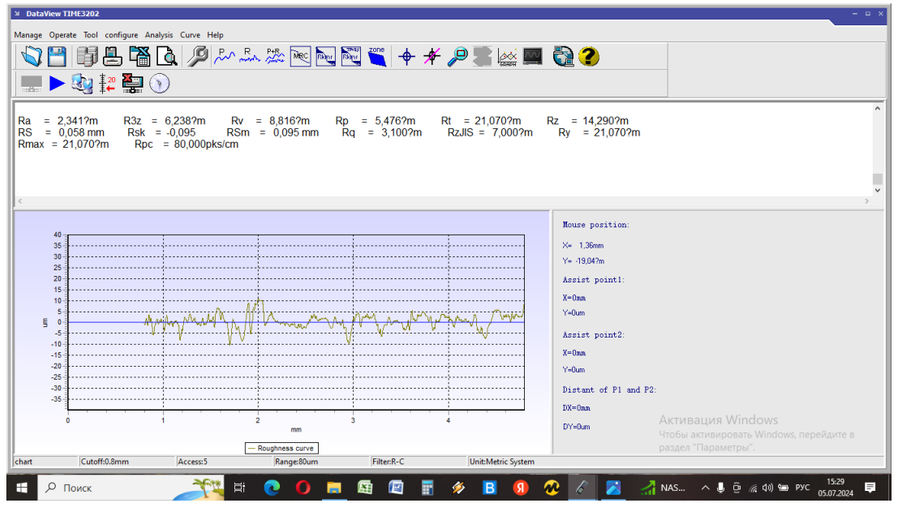


Рисунок 2 – Металлографический анализ для выявления структурных изменений, измерена шероховатость поверхности (Ra) (показан один образец)

Таблица 1 – Сводная таблица шероховатости поверхности (Ra) по 11 образцам

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ra, мкм	2,342	2,341	2,345	2,344	2,341	2,344	2,400	2,405	2,348	2,344	2,328

Поверхность после износа была исследована тремя методами: при помощи микроскопа A13.0207-DIC; анализ микроструктуры покрытия и изношенной зоны; визуальный анализ дефектов (трещин, сколов, пластической деформации).

Основные результаты эксперимента, такие как зависимость момента трения от усилия прижатия, температуры смазки отражены в таблице 2. Отражены несколько графиков, иллюстрирующих основные результаты эксперимента (рисунок 3).

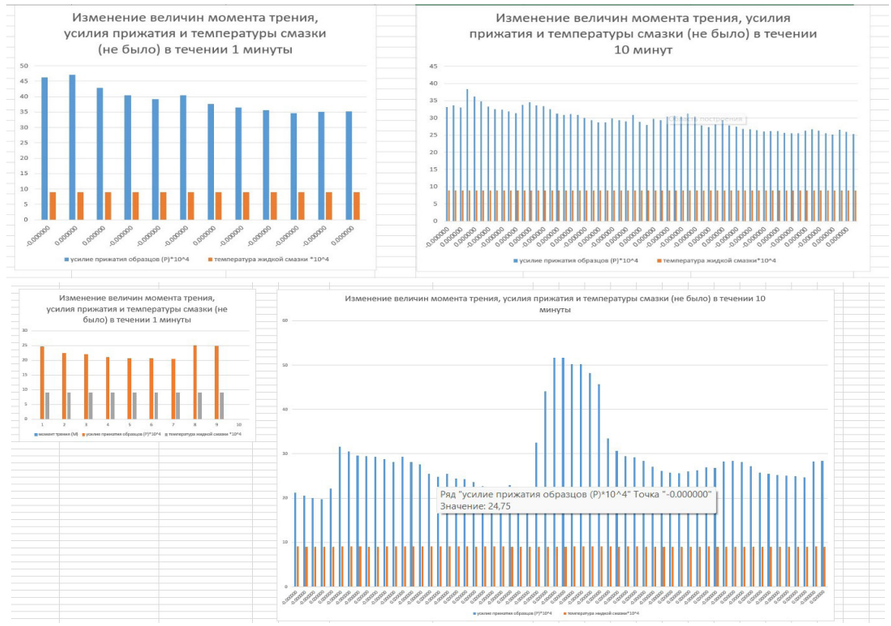


Рисунок 3 – Графики, иллюстрирующих основные результаты эксперимента (показаны результаты по нескольким образцам)

На графиках представлены данные, показывающие изменения момента трения, усилия прижатия и температуры смазки в течение различных промежутков времени (1 минута и 10 минут), причем смазка не использовалась. Анализ показывает, что в первые минуты параметры остаются практически без изменений, однако при увеличении времени наблюдаются скачки усилия прижатия и величины трения, что характерно для сухих условий контакта. В начале испытаний момент трения и усилие прижатия показывают стабильность, но на более продолжительных отрезках времени начинают наблюдаться колебания, что может свидетельствовать о неустойчивости трения и постепенном износе поверхностей без смазки. Температура смазки на диаграммах практически не меняется и остается низкой, что связано с отсутствием смазки и, как следствие, отсутствием теплового эффекта от трения. Таким образом, отсутствие смазочного материала приводит к неравномерному изменению усилия прижатия и увеличению трения со временем, что может указывать на усиление износа контактных поверхностей при длительной эксплуатации. Эти данные подтверждают необходимость использования смазки для стабилизации условий трения и продления срока службы оборудования.

Проведены экспериментальные исследования трех видов трения: сухое сталь-сталь без применения СОЖ, жидкое трение сталь-сталь и охлаждающая жидкость

«Дистиллированная вода», жидкое трение сталь-сталь с применением СОЖ марки HOCUT 795 H-eu (эмульсия) (Таблицы 2, 3, 4)

Таблица 2 – Сравнение трибологических характеристик образцов (сухое трение)

№	Параметр	Новый образец	Восстанов-ленный образец (наплавка)	Единицы изме-рения	Примеча-ние
1	Коэффици-ент тре-ния (μ)	0,5	0,5	-	При посто-ян-ной нагрузке и скорости
2	Момент трения (М)	125 Н·м	87,5 Н·м	Н·мм или Н·м	Средний или макси-мальный
3	Потеря массы	25–40 мг/ч	10–15 мг/ч	мг	за один цикл или за все ис-пытание
4	Глубина износа	8–12 мкм/час	3–5 мкм/час	мкм	По данным про-фило-метрии
5	Темпера-тура в зоне трения	30–70°C	40-80°C	°C	При длитель-ном трении
6	Микро-твёрдость поверхнос-ти (до)	200–250 HV	260–300 HV	HV	До испытания
7	Микро-твёрдость поверхнос-ти (по-сле)	280–320 HV	330–380 HV	HV	После износа
8	Шерохова-тость Ra	1,6 – 2,5 мкм	1,8 – 2,5 мкм	мкм	После шлифов-ки / до трения
9	Структурные изме-нения (описание)	Образова-ние на-клёпан-ного слоя, деформа-ционное упрочне-ние, мелкозер-нистая структура, возмож-ное образова-ние оксидной плёнки.	Мелкозернис-тый наклёпан-ный слой, деформа-ционное упрочнение, ча-стичное окисление, местное термическое воздействие с мар-тенситом.	-	При наличии микроско-пиче-ского анализа
10	Повторяе-мость результата	Средняя.	Средняя — разброс по моменту трения и износу до ±10%, наплавленный слой работает без смазки, но структура ста-бильнее исходного металла.	-	Например, среднее из 3 испытаний

Таблица 3 – Сравнение трибологических характеристик образцов (Охлаждающая жидкость – вода, жидкостное трение)

№	Параметр	Новый образец	Восстанов-ленный образец (наплавка)	Единицы изме-рения	Примечание
1	Коэффи-циент тре-ния (μ)	0,25	0,25	-	При постоянной нагрузке и ско-рости
2	Момент трения (М)	62,5 Н·м	50 Н·м	Н·мм или Н·м	Средний или макси-мальный
3	Потеря массы	15–25 мг/ч	5–10 мг/ч	мг	за один цикл или за все ис-пытание
4	Глубина износа	5–8 мкм/час	2–4 мкм/час	мкм	По данным про-фило-метрии
5	Температура в зоне трения	15–25°C	20-30°C	°C	При длитель-ном трении
6	Микро-твёрдость поверхности (до)	200–250 HV	260–300 HV	HV	До испытания
7	Микро-твёрдость поверхности (по-сле)	260–300 HV	300–340 HV	HV	После износа
8	Шерохова-тость Ra	1,2 – 1,8 мкм	1,4 – 2,0 мкм	мкм	После шлифов-ки / до трения
9	Структурные изме-нения (описание)	Частичная деструк-ция поверх-ност-ного слоя. Кор-рози-онное разу-проч-нение границ зёрен, увеличе-ние пористос-ти, возможное меж-крис-таллитное разруше-ние.	Поверхностная кор-розия на границах зёрен. Микротре-щины от цикличе-ского увлажнения и трения. Ослабление структуры сварного шва и околошов-ной зоны. Частичное вымывание легирую-щих элементов.	-	При наличии микроскопиче-ского анализа
10	Повторяемость ре-зультата	Низкая	Умеренно высокая — благодаря корро-зион-ной стойкости наплавки Св-10Х17Т, разброс уменьшает-ся до ±10%, водная среда оказывает меньшее влияние на структуру поверх-ности.	-	Например, среднее из 3 испытаний

Таблица 4 – Сравнение трибологических характеристик образцов (Смазочно-охлаждающая жидкость – СОЖ марки HOCUT 795 H-eu (эмульсия))

№	Параметр	Новый образец	Восстанов-ленный образец (наплавка)	Единицы изме-рения	Примеча-ние
1	Коэффи-циент тре-ния (μ)	0,09	0,07	-	При посто-ян-ной нагрузке и скорости
2	Момент трения (М)	25 Н·м	15 Н·м	Н·мм или Н·м	Средний или макси-мальный
3	Потеря массы	5–10 мг/ч	2–5 мг/ч	мг	за один цикл или за все ис-пытание
4	Глубина износа	2–4 мкм/час	1–2 мкм/час	мкм	По данным про-фило-метрии
5	Температура в зоне трения	40–80°C	50-70°C	°C	При длитель-ном трении
6	Микро-твёрдость поверхности (до)	200–250 HV	260–300 HV	HV	До испытания
7	Микротвёр-дость поверхности (по-сле)	240–280 HV	280–320 HV	HV	После износа
8	Шерохова-тость Ra	0,8 – 1,4 мкм	1,0 – 1,6 мкм	мкм	После шлифов-ки / до трения
9	Структурные изме-нения (описание)	Меньшее изме-нение структуры, замедленное ста-рение поверхности Сохраняется фер-ритно-перлитная структура с локаль-ными дефор-ма-циями и следами перегрева.	Хорошая стойкость к среде, минимальная коррозия. Умеренное упрочнение трением. Структура в основ-ном ферритно-кар-бидная с возможной поверхност-ной закалкой при пере-греве.	-	При наличии микроскопиче-ского анализа
10	Повторя-емость результата	Высокая	Высокая стабиль-ность, минималь-ный разброс (до ±5%), хорошая совме-сти-мость с масло-со-держащей средой, обеспечи-вающая устойчивое трение и износ.	-	Например, среднее из 3 испытаний

Основные выводы по результатам сравнительного анализа трибологических характеристик новых и восстановленных (наплавленных) образцов в различных условиях трения:

1. Эффективность восстановления

Восстановленные образцы (наплавка) показывают лучшие характеристики износостойкости по сравнению с новыми во всех условиях; меньшая потеря массы (в 2–3 раза); меньшая глубина износа; повышенная микротвёрдость после испытаний; более стабильные результаты трения и износа.

2. Поведение в разных средах

При сухом трении одинаковый коэффициент трения, но у восстановленного образца момент трения ниже; формируется более устойчивая микроструктура

(мартенсит, наклёпанный слой); повторяемость — средняя, но выше, чем у нового образца.

При трении в воде у восстановленного образца выше коррозионная стойкость; меньший износ и более стабильные параметры (ұ10% против ұ20% у нового); новые образцы подвержены межкристаллитному разрушению и разупрочнению.

При трении в нефтепродуктах оба образца работают стабильно, но восстановленный показывает лучшие результаты; меньший коэффициент трения; более высокая твёрдость и меньший износ; хорошая совместимость с маслосодержащей средой.

Сравнение характеристик: с наплавкой и без наплавки отражено в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение характеристик

Параметр	Новый образец (без наплавки)	Восстановленный образец (наплавка)	Примечание
Потеря массы	5–40 мг/ч	2–15 мг/ч	В 2–3 раза ниже у наплавки
Глубина износа	2–12 мкм/ч	1–5 мкм/ч	Снижение износа до 60%
Коэффициент трения (μ)	0,5 → 0,09	0,5 → 0,07	Ниже на ~20% в нефтесреде
Момент трения (М)	125 → 25 Н·м	87,5 → 15 Н·м	Меньшее сопротивление трению
Микротвёрдость после испытания	до 320 HV	до 380 HV	Рост твёрдости до 20%
Шероховатость Ra	0,8–2,5 мкм	1,0–2,5 мкм	Сравнима
Повторяемость	от низкой до средней	от умеренной до высокой	Наплавка даёт стабильность
Структурные изменения	Деструкция, коррозия, трещины	Упрочнение, мартенсит, устойчивость	Существенное улучшение структуры

Влияние на долговечность элементов машины

Уменьшение потерь массы и глубины износа увеличивает срок службы трущихся деталей, таких как валы, штифты и шестерни. Повышенная микротвёрдость защищает от деформаций и повреждений, а устойчивость к коррозии и снижение межкристаллитных разрушений сохраняют прочность деталей в агрессивных средах. Стабильность трения снижает риск заклинивания, перегрева и поломок. Для машин это означает меньшие внеплановые остановки, повышенную надежность узлов, снижение затрат на обслуживание и более предсказуемую работу механизмов при высоких нагрузках и длительной эксплуатации.

Информация о финансировании

Исследования выполняются в рамках грантового финансирования научных и (или) научно-технических проектов на 2023–2025 годы по проекту AP19678887 «Исследование триботехнических характеристик ресурсо-энергосберегающих металлорежущих инструментов».

Выводы

Образцы с наплавкой Св-10Х17Т существенно превосходят новые (немодифицированные) по износостойкости, стабильности и сопротивлению разрушению. Это делает наплавку экономически и технически целесообразным способом восстановления и модернизации изношенных элементов машин, особенно тех, что работают в условиях: высоких нагрузок и сухого трения,

воздействия агрессивных жидкостей (вода, топливо, масло), длительной циклической работы.

Результат – увеличение долговечности, снижение эксплуатационных рисков и повышение общей эффективности оборудования.

Сравнение с ранее опубликованными (литературными и справочными) данными показывает:

1. Восстановленные (наплавленные) образцы показывают лучшие трибологические свойства, чем новые и типовые материалы.

2. Основные улучшения: снижение износа в 2–3 раза; повышение твёрдости до 380 HV; устойчивость к коррозии и структурным повреждениям; стабильность результатов трения и износа

3. Практический эффект: увеличение ресурса трущихся пар; снижение риска аварий и перегрева; меньшее техобслуживание; повышенная надёжность оборудования.

Таким образом, метод наплавки можно рассматривать не только как восстановительный, но и как улучшающий технологию, повышающий износостойкость выше обычных производственных стандартов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Otsuki M., Matsukawa H.** Systematic breakdown of Amontons' law of friction for an elastic object locally obeying Amontons' law // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3. – Article 1586. – https://doi.org/10.1038/srep01586.

2 **Bowden F. P., Tabor D.** Adhesion in friction // Wear. – 1976. – Vol. 38, № 1. – P. 1–32. – https://doi.org/10.1016/0043-1648(76)90218-0.

3 **Zhou Y., Li Z.** How accurate is the Archard law to predict wear of UHMWPE in hard-on-soft hip implants // Tribology International. – 2023. – Vol. 171. – Art. 107735. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.107735.

4 **Meng H., Xu Z., Liu Y.** Interplay between counter-surface chemistry and mechanical stress in mechanochemical wear // Tribology International. – 2021. – Vol. 160. – Art. 107019. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107019.

5 **Denape J.** Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions // Key Engineering Materials. – 2015. – Vol. 640. – P. 1–12. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.640.1.

6 **Godet M.** The third-body approach: A mechanical view of wear // Wear. – 1984. – Vol. 100, № 1–3. – P. 437–452. – https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90025-5.

7 **Zhang Y., Wang Q.** Advances of molecular dynamics simulation in tribochemistry and tribophysics // Tribology International. – 2023. – Vol. 181. – Art. 108354. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108354.

8 **Berthier Y., Brendle M., Godet M.** Third-bodies in tribology // Wear. – 1989. – Vol. 139, № 1. – P. 77–92. – https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90070-Q.

9 ГОСТ 23.204-78. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении [Текст] – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 9 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).

10 ГОСТ 23.224-86. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей [Текст] – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 10 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).

11 **Iskakova, D. A., Kasenov, A. Zh., Magellan, D. A., Zoltan-Iosif Korka.** Analysis of methods of hardening and restoration of worn parts. STUDIA UNIVERSITATIS BABEŞ-BOLYAI, Engineering 69(1) 2024. – P. 137–148.

12 **Денчик, А. И., Касенов, А. Ж., Янюшкин, А. С., Мусина, Ж. К., Абишев, К. К., Искакова, Д. А., Ткачук, А. А.** Практическое применение имитационного моделирования формирования точности исполнительного размера [Текст] // Вестник машиностроения. – 2023. – № 7 – С. 566–572. – https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-7-566-572.

13 **Касенов, А. Ж., Искакова, Д. А., Янюшкин, А. С., Ткачук, А. А., Қабдымали, Д. Т.** Анализ напряженно-деформированного состояния трубной запорной арматуры [Текст] // Наука и техника Казахстана. 2024. – № 4 – С. 138–149. https://doi.org/10.48081/KCSD7563.

REFERENCES

1 **Otsuki M., Matsukawa H.** Systematic breakdown of Amontons' law of friction for an elastic object locally obeying Amontons' law // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3. – Article 1586. – https://doi.org/10.1038/srep01586.

2 **Bowden F. P., Tabor D.** Adhesion in friction // Wear. – 1976. – Vol. 38, № 1. – P. 1–32. – https://doi.org/10.1016/0043-1648(76)90218-0.

3 **Zhou Y., Li Z.** How accurate is the Archard law to predict wear of UHMWPE in hard-on-soft hip implants // Tribology International. – 2023. – Vol. 171. – Art. 107735. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.107735.

4 **Meng H., Xu Z., Liu Y.** Interplay between counter-surface chemistry and mechanical stress in mechanochemical wear // Tribology International. – 2021. – Vol. 160. – Art. 107019. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107019.

5 **Denape J.** Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions // Key Engineering Materials. – 2015. – Vol. 640. – P. 1–12. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.640.1.

6 **Godet M.** The third-body approach: A mechanical view of wear // Wear. – 1984. – Vol. 100, № 1–3. – P. 437–452. – https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90025-5.

7 **Zhang Y., Wang Q.** Advances of molecular dynamics simulation in tribochemistry and tribophysics // Tribology International. – 2023. – Vol. 181. – Art. 108354. – https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108354.

8 **Berthier Y., Brendle M., Godet M.** Third-bodies in tribology // Wear. – 1989. – Vol. 139, no. 1. – P. 77–92. – https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90070-Q.

9 GOST 23.204-78. Metod ocenki istirayushhej sposobnosti poverxnostej pri trenii [A method for evaluating the abrasion resistance of surfaces under friction] [Text] – M. : Izd-vo standartov, 1978. – 9 p. – (Gosudarstvenny`j standart Soyuza SSR).

10 GOST 23.224-86. Metody` ocenki iznosostojkosti vosstanovlenny`x detalej [Methods for assessing the wear resistance of refurbished parts] [Text] – M. : Izd-vo standartov, 1986. – 10 p. – (Gosudarstvenny`j standart Soyuza SSR).

11 **Iskakova, D. A., Kasenov, A. Zh., Magellan, D. A., Zoltan-Iosif Korka.** Analysis of methods of hardening and restoration of worn parts. STUDIA UNIVERSITATIS BABEŞ-BOLYAI, Engineering 69(1) 2024. – P. 137–148.

12 **Denchik, A. I. Kasenov, A. Zh. Yanyushkin, A. S. Musina, Zh. K. Abishev, K. K. Iskakova, D. A. Tkachuk, A. A.** Prakticheskoe primenenie imitacionnogo modelirovaniya formirovaniya tochnosti ispolnitel`nogo razmera [Practical application of simulation modeling of the formation of executive size accuracy] [Text] // Vestnik mashinostroeniya. – 2023. – № 7 – P. 566–572. – https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-7-566-572.

13 **Kasenov, A. Zh., Iskakova, D. A., Yanyushkin, A. S., Tkachuk, A. A., Qabdy`mali, D. T.** Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya trubnoj zapornoj armatury` [Analysis of the stress-strain state of pipe shut-off valves] [Text] // Nauka i texnika Kazaxstana. 2024. – №4 – P. 138–149. – https://doi.org/10.48081/KCSD7563.

Ж. К. Мусина[1], *Д. А. Искакова[2], А. Д. Сулейменов[3], Р. Б. Кусаинов[4], А. С. Янюшкин[5]

[1,2,3,4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

[5]Чуваш мемлекеттік университеті, Чувашия, Чебоксары қ.

СВ10Х17Т ДӘНЕКЕРЛЕУ СЫМЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРҒА ӘСЕРІН ТАЛДАУ

Мақалада Св10Х17Т дәнекерлеу сымының болат үлгілерінің трибологиялық қасиеттеріне әсері туралы эксперименттік зерттеу ұсынылған. Жұмыстың өзектілігі үйкеліс жағдайында жұмыс істейтін бөлшектердің ресурсын арттыру қажеттілігімен байланысты, сонымен бірге оларға қызмет көрсету мен жөндеу шығындарын азайтады. Авторлар әртүрлі жағдайларды пайдалана отырып, кешенді зертханалық сынақтар жүргізді: құрғақ үйкеліс, су және май бар ортадағы үйкеліс. Эксперимент үйкеліс коэффициентін, үйкеліс моментін, жанасу аймағындағы температураны, массаның жоғалуын, тозу тереңдігін, сынақтарға дейінгі және кейінгі беттің микроқаттылығын, сондай-ақ кедір-бұдырды өлшеді. Қаптау тозуға төзімділікті жақсартады, үйкеліс күшін азайтады және беттің микроқаттылығын арттырады, әсіресе майлаусыз ұзақ жанасу жағдайында. Микроқұрылымдық талдау деформациямен және ішінара термиялық өңдеумен тұрақты тойтарылған қабаттың қалыптасуын растады. Нәтижелер беткі қабаттың ұзақ қызмет ету мерзімін қамтамасыз ете отырып, материалдардың бастапқы қасиеттерін қалпына келтіруге немесе тіпті жақсартуға мүмкіндік беретінін

көрсетеді. Жұмыстың практикалық мәні бар және оны турбиналарды, редукторларды, мойынтіректерді, редукторларды және басқа тораптарды жөндеуді қоса алғанда, машина жасау және жабдыққа техникалық қызмет көрсету саласында қолдануға болады.

Кілтті сөздер: қаптау, тозуға төзімділік, микроқаттылық, үйкеліс, машина жасау.

Zh. K. Mussina[1], *D. A. Iskakova[2],
A. D. Suleimenov[3], R. B. Kussainov[4], A. S. Yanushkin[5]
[1,2,3,4]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
[5]Chuvash State University, Chuvashia, Cheboksary

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SURFACING WELDING WIRE SV10X17T ON TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS

The article presents an experimental study of the effect of welding welding wire Sv10H17T on the tribological properties of steel samples. The relevance of the work is related to the need to increase the service life of parts operating under friction conditions, while reducing the cost of their maintenance and repair. The authors conducted comprehensive laboratory tests using various conditions: dry friction, friction in aqueous and oil-containing media. During the experiment, the coefficient of friction, the moment of friction, the temperature in the contact zone, mass loss, wear depth, microhardness of the surface before and after testing, as well as roughness were measured. It has been found that surfacing improves wear resistance, reduces friction, and increases the microhardness of the surface, especially in conditions of prolonged contact without lubrication. Microstructural analysis confirmed the formation of a stable riveted layer with deformation hardening and partial heat treatment. The results show that surfacing makes it possible to restore or even improve the original properties of materials, providing a longer service life. The work has practical value and can be used in the field of mechanical engineering and equipment maintenance, including repair of turbines, gearboxes, bearings, gears and other components.

Keywords: surfacing, wear resistance, microhardness, friction, mechanical engineering.

МРНТИ 55.13.17
DOI

А. П. Муслимов[1], *А. К. Аталыкова[2], Е. О. Елеукулов[3]
[1]Кыргызский государственный технический
университет имени И. Раззакова, Республика Кыргыстан, г. Бишкек
[2,3]Алматинский университет энергетики и связи,
Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7797-4650
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7517-2438
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6866-3941
*e-mail: a.atalykova@aues.kz

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ НЕКРУГЛОСТИ И ВЕЛИЧИНЫ ДИСБАЛАНСА МЕЛКИХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ИЗДЕЛИЙ

В данной статье рассматривается вопрос о создании прибора для определения дисбаланса малогабаритных изделий массой примерно 10г., применяемых в точных приборах, машинах оборонной промышленности, работающих с высокими скоростями вращения. Работа прибора основана на реализации метода свободного вращения изделий радиусом r = 4mm на опорных валках, вращающихся со скоростью до 15000 об/мин. Геометрические и кинематические параметры прибора были определены в зависимости от массо-геометрических характеристик контролируемых изделий при отсутствии радиального смещения центра масс:e=0.

На эксперимент были поставлены пять изделий с условным смещением центра масс, количество измерений одного изделия на каждой скорости вращения валков составило n=12. По полученным данным был вычислен средний угол срыва изделий с валков по которому можно судить о качестве контролируемых изделий: с увеличением неуравновешенности уменьшается угол срыва, но на малых скоростях вращения изделие с дисбалансом e = 8мкм менее устойчиво из-за погрешности формы, которая сглаживается на больших скоростях и поддается влиянию дисбаланса. Точность измерений прибора была оценена для случая, когда измерения проводили для изделия с e = 8мкм при $n_в$=9000 об/мин.

Ключевые слова: мелкие изделия, некруглость изделий, точность контроля, дисбаланс, прибор для контроля.

Введение

Быстровращающиеся изделия находят широкое применение в различных областях, таких как машино- и приборостроение, текстильное оборудование и подшипниковые системы. Качество изделий типа тел вращения с малыми массой и габаритами оказывает важное влияние на точность, производительность и срок службы оборудования. Как только на их поверхности появляются трещины, царапины, ржавчина [1; 5] или дефекты материала [2; 3], качество и

производительность, к примеру – подшипника [4] будут значительно нарушены и даже приведут к крупным авариям. Поэтому качество изделий типа тел вращения должно быть полностью проверено перед отправкой с завода, чтобы соответствовать требованиям надежности всей механической системы [6, с. 159-160].

Детали типа тел вращения, к примеру, стальные шарики [7, с. 51] [8; 9] изготавливаются с помощью различных процессов, включая холодную высадку, оплавление и термическую обработку, дробление, шлифование и грубую (тонкую) притирку [12]. В связи с этим, на каждом этапе технологического процесса изготовления могут возникнуть различного рода дефекты. Довольно сложно проверить эти дефекты из-за изогнутой и блестящей поверхности этих шариков. В результате ручной визуальный осмотр по-прежнему широко используется в текущем контроле стальных шариков. Контролер делает выборку из всей партии деталей и сравнивает с контрольным образцом. Хотя этот метод требует меньших инвестиций и не требует высокоточного оборудования, однако, трудно повысить эффективность производства из-за большой погрешности тестирования [10; 11]. Более того, легко поддаются влиянию личных факторов, что приводит к неравномерному качеству тестирования стальных шариков, так как контролер работает при ярком свете в течение длительного времени, кроме того визуальный осмотр может обнаружить только очевидные пятна, трещины и т. д., но не может обнаружить поверхностные микротрещины и подповерхностные трещины. По этой причине он не может удовлетворить потребности автоматического обнаружения дефектов с большой партией, высокой точностью [13, с. 485][14; 15] и высокой надежностью [16; 17].

Качество изделий типа малых тел вращения с большими скоростями определяет величина дисбаланса – радиальное смещение центра масс. Смещение центра тяжести от геометрической оси возникает из-за неоднородности материала и неточности изготовления изделия. Динамическими характеристиками изделия типа тел вращения являются радиальные и осевые смещения центра масс, несоосность поверхностей и погрешности формы изделий (некруглость), создающих неуравновешенные силы и момент при его эксплуатации. Дисбаланс во вращающихся деталях из-за появления инерционных сил влечет за собой износ механизмов, неточность при эксплуатации и сильным вибрациям.

Материалы и методы

Для контроля некруглости и величины радиального смещения центра масс (РСЦМ) разработан метод свободного вращения изделия на опорных валках [18] и на его основе прибор автоматического контроля.

Конструктивно прибор контроля на рисунке 1 состоит из рамы с вращающимися валками и привода вращающихся валков.

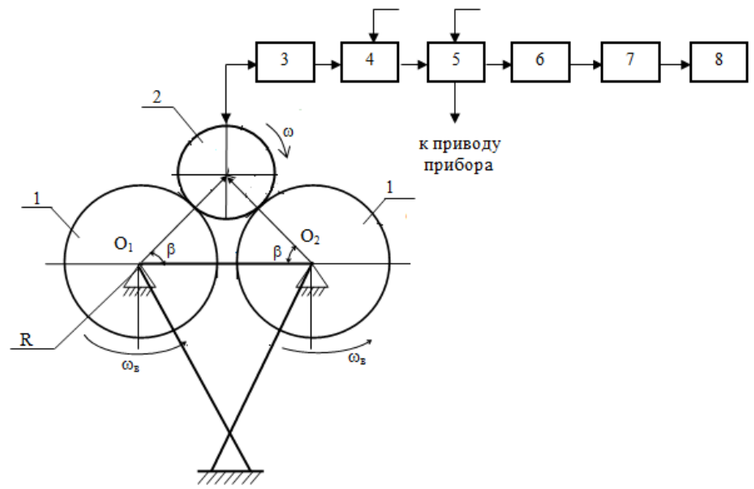


Рисунок 1 – Функциональная схема прибора

1 – вращающиеся валки, 2 – контролируемое изделие, 3 – датчик скорости, 4 – усилитель, 5 – компаратор, 6 – генератор секундных импульсов, 7 – счетчик импульсов, 8 – цифровой индикатор

Контролируемые изделия с помощью механизма поштучной выдачи загружаются на вращающиеся валки, таким образом, начинается вращение этих изделий с одновременным измерением скорости вращения и времени их разгона до установленной скорости.

Метод измерения основан на следующем физическом принципе: при разгоне изделия до установленной скорости требуется дополнительная энергия в связи с необходимостью преодоления момента от инерционных сил из-за наличия радиального смещения центра масс.

Дифференциальное уравнение вращения изделия на этапе разгона может быть представлено в виде:

$$\ddot{\varphi} = d - b\dot{\varphi}^2 \qquad (1)$$

где d и b функции, зависящие как от угла поворота изделия φ, так и от других массо-геометрических параметров изделия, прибора и в том числе от дисбаланса.

При наличии дисбаланса изделия, время достижения заданной скорости вращающегося изделия возрастает, это объясняется наличием слагаемого $b\dot{\varphi}^2$ в уравнении.

Для определения геометрических и кинематических параметров прибора в зависимости от массо-геометрических характеристик контролируемого изделия

рекомендуется с достаточной точностью считать, что РСЦМ $e = 0$. В этом случае вышеприведенное уравнение становится линейным, оно легко решается и время разгона определяется следующей зависимостью:

$$t_p = \frac{R\omega_в(1+f^2)\sin\beta}{2fg} \qquad (2)$$

где R – радиусы валков, $\omega_в$ – угловая скорость вращения валков, f – коэффициент трения скольжения, зависящий от материалов валков и изделия; β – конструктивный угол; g – ускорение свободного падения. Так, к примеру при $R = 8 \cdot 10^{-3}\ м, f = 0{,}1; \omega_в = 1{,}5 \cdot 10^3\ с^{-1}, \beta = \frac{\pi}{4}$,

t_p составляет 4 с.

На рисунке 2 представлен график зависимости РСЦМ е изделия от времени разгона изделия t_p до скорости $\omega_в = 1{,}5 \cdot 10^3\ с^{-1}$

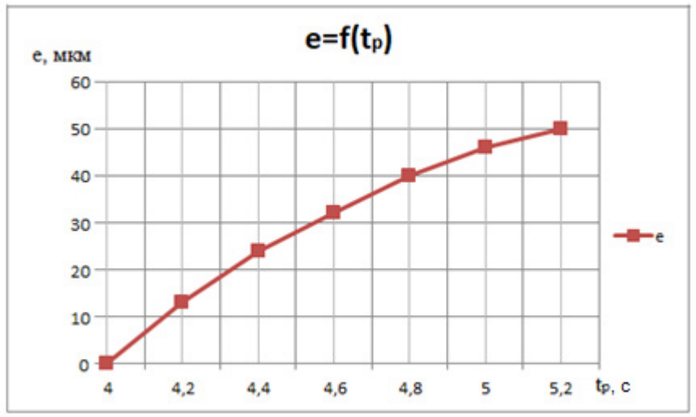


Рисунок 2 – Зависимость РСЦМ от времени разгона

Результаты и их обсуждение

Экспериментальная проверка метода проводилась на разработанном приборе, фото которого приведено на рисунке 3.

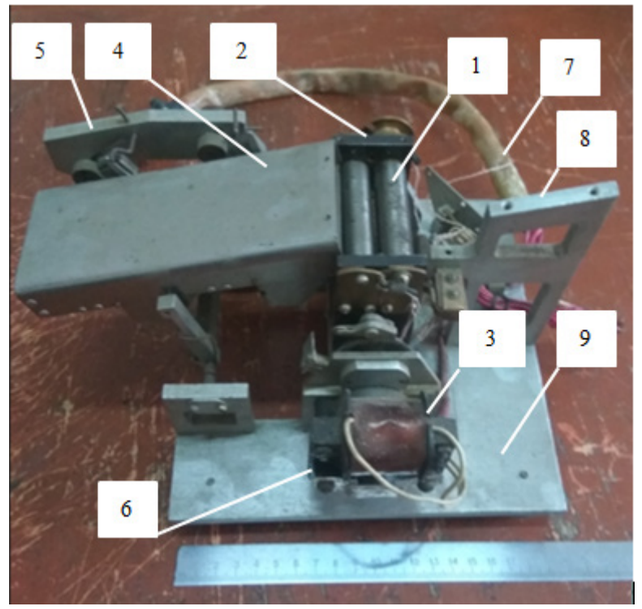


Рисунок 3 – Прибор для контроля некруглости и РСЦМ

1 – вращающиеся валки, 2 – поворотная рама, 3 – приводной двигатель постоянного тока, 4 – направляющий желоб , 5 – угломер, 6 – тумблер, 7 – питающий кабель, 8 – кронштейн для лотка, 9 – основание прибора

Процесс контроля изделий заключается в следующем: включается тумблер 6, в течение 10 минут прибор начинает работать пока только в холостом режиме для стабилизации режима скорости. Затем контролируемое изделие радиусом $r = 4 * 10^{-3}\ м$, длиной $l = 18 * 10^{-3}\ м$ устанавливают вручную на опорные валки 1 и разгоняют до номинальных оборотов. После чего происходит поворот рамы 2, контролируемое изделие срывается с валков и в момент срыва изделия отмечают угол наклона плоскости осей валков к горизонту по угломеру 5. В зависимости от определенного интервала углов срыва, открывается заслонка в направляющем желобе 4 и изделие попадает в один из двух или трех бункеров под желобом, раму возвращают в исходное положение для контроля следующего изделия. Цилиндрические изделия, прошедшие контроль попадают в бункера сортировки по группам качества в зависимости от интервала угла срыва $\alpha_{ср}$ с вращающихся валков. В эксперименте было три бункера для сортировки изделий по качеству, соответствующих $\alpha_{ср}$: 1 бункер – $0^0 \div 15^0$, 2 бункер $-15^0 \div 26^0$ и 3 бункер – 26^0 и выше.

Эксперименты проводили в следующем объеме: количество изделий – 5 штук с РСЦМ е=4, 6, 8, 12, 15 мкм, скорость вращения валков $n_в$ – 3000, 6000, 9000, 12000, 15000 об/мин, количество измерений одного изделия на каждой

скорости вращения n=12. После эксперимента был вычислен средний угол срыва $\alpha_{ср}$ для изделий и построен график зависимости среднего угла срыва от РСЦМ, приведенный на рисунке 4.

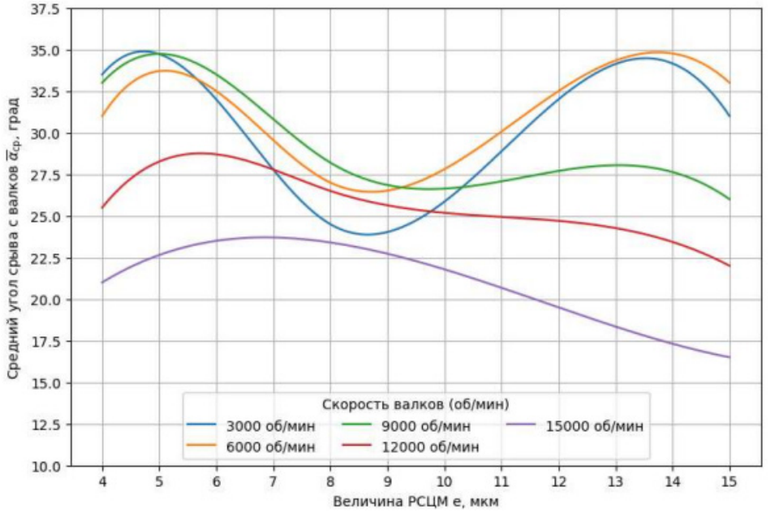


Рисунок 4 – Зависимость угла срыва от РСЦМ

Для оценки точности измерений прибора провели 30 испытаний изделия с дисбалансом e=8 мкм при скорости вращения валков $n_в$=9000 об/мин. За математическое ожидание среднего угла срыва приняли среднее арифметическое $\bar{\alpha}_{ср} = 20{,}433^{\circ}$ Точечная оценка среднеквадратичного отклонения составила:

$$\sigma_{\bar{\alpha}_{ср}} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{30}(\alpha_{срi} - \bar{\alpha}_{ср})^2} = \sqrt{\frac{41{,}367}{29}} = 1{,}194^{\circ}. \quad (3)$$

Результаты измерений угла срыва с валков $\alpha_{ср}$ и вычисления приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений изделия на приборе

$\alpha_{срi}$	$(\alpha_{срi} - \bar{\alpha}_{ср})^2$	$\alpha_{срi}$	$(\alpha_{срi} - \bar{\alpha}_{ср})^2$	$\alpha_{срi}$	$(\alpha_{срi} - \bar{\alpha}_{ср})^2$
20	0,187	20	0,187	22	2,455
21	0,321	21	0,321	22	2,455
20	0,187	19	2,053	18	5,919
22	2,455	20	0,187	20	0,187
19	2,053	21	0,321	21	0,321
20	0,187	23	6,589	20	0,187
21	0,321	20	0,187	21	0,321
22	2,455	21	0,321	20	0,187
18	5,919	20	0,187	22	2,455
19	2,053	20	0,187	20	0,187

Примем уровень доверительной вероятности $1-\alpha = 0{,}95$. Тогда для нормально распределенного среднего угла срыва с валков $\bar{\alpha}_{ср}$ при $K = n-1 = 29$, определим следующие значения [19]:

$$\chi^2_{K,\ 1-\alpha} = \chi^2_{29,\ 0{,}95} = 17{,}708; \quad \chi_{29,\ 0{,}95} = 4{,}21;$$
$$\chi^2_{K,\ \alpha} = \chi^2_{29,\ 0{,}05} = 42{,}557; \quad \chi_{29,\ 0{,}05} = 6{,}52. \quad (4)$$

Затем рассчитаем границы доверительного интервала среднеквадратичного отклонения для наблюдений с вероятностью 95% по формулам:

$$\sigma_{\alpha_{ср_1}} = \frac{\sqrt{n-1} * \sigma_{\bar{\alpha}_{ср}}}{\chi_{K,\ 1-\alpha}} = \frac{\sqrt{29} * 1{,}194}{4{,}21} = 1{,}527^{\circ};$$
$$\sigma_{\alpha_{ср_2}} = \frac{\sqrt{n-1} * \sigma_{\bar{\alpha}_{ср}}}{\chi_{K,\ \alpha}} = \frac{\sqrt{29} * 1{,}194}{6{,}52} = 0{,}986^{\circ}. \quad (5)$$

Полученные результаты вышеприведенных вычислений вполне удовлетворяют требованиям эксперимента.

Контрольное приспособление имеет следующие конструктивные особенности. Основание выполнено на регулируемых по высоте ножках. Опорные валки изготовлены из текстолита и своими центровыми отверстиями установлены на свободно вращающихся шариках (по одному с каждой стороны). Опорные валки вращаются с постоянной скоростью. В исходном положении рамы плоскость осей валков горизонтальна. Изделие устанавливают на валки и разгоняют до номинальных оборотов. После этого производят измерение: рама поворачивается вокруг оси и в момент срыва изделия с валков отмечают угол наклона плоскостей к горизонту по угломерной шкале. Затем рама возвращается в исходное положение для контроля следующего изделия. Чем больше величина неуравновешенности

изделия и, следовательно, влияние неуравновешенных сил, тем меньше предельный угол, при котором происходит срыв изделия с валков. Измеренное значение угла срыва пересчитывают в значение параметра качества изделия по тарировочному графику. Предварительно тарировку производят по эталонным изделиям с заданными значениями неуравновешенности.

Для испытания были отобраны тарировочные реальные изделия, неуравновешенность которых была измерена на балансировочных весах и условно выражена в смещении центра масс от геометрической оси изделия. Перед проведением замеров прибор был настроен таким образом, чтобы скомпенсировать на больших скоростях вращения валков увод контролируемого изделия вдоль его оси.

Установлено, что при скорости $n_в$=9000 об/мин, данный метод контроля изделий позволяет сортировать их на 2-3 группы качества. Одно и тоже контролируемое изделие (например, с РСЦМ e=8 мкм) по разному ведет себя при различных скоростях вращения. Отмеченное ухудшение устойчивости вращения изделия с e=8 мкм на малых ($n_в$=9000 об/мин) скоростях объясняется влиянием погрешности формы, которое на больших скоростях сглаживается, уступая место влиянию дисбаланса.

Чувствительность данного метода определения угла срыва $\alpha_{ср}$ в отдельно проведенном эксперименте с образцовыми цилиндрическими изделиями с заданными значениями неуравновешенности, составляет 4÷6 мкм условного смещения центра масс, что хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

Выводы

Для экспериментальной проверки метода контроля качества изделий был изготовлен опытный образец прибора. Исходя из испытаний опытного образца прибора можно сделать следующие основные выводы:

– метод прост в реализации и по вышеприведенным формулам представляется возможным инженерно-техническим работникам рассчитать геометрические и кинематические параметры привода в зависимости от массо-геометрических характеристик контролируемого изделия;

– возрастание величин некруглости и дисбаланса изделий приводят к увеличению времени разгона изделия до установившейся скорости при вращении изделия на валках;

– по углу срыва изделия с вращающихся валков, представляется возможным судить о качестве контролируемых изделий и сортировать их по группам качества;

– прибор рекомендуется для контроля быстровращающихся мелких изделий машин, приборов и подшипников.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Zhang, H., Ma, L., Xie, F.** A method of steel ball surface quality inspection based on flexible arrayed eddy current sensor [Текст] // Measurement. – Vol. 144. – 2019. – P. 192–202.

2 **Bhadeshia, H. K. D. H.** Steels for bearings [Текст] // Progress in Materials Science. – Is. 2. – 2012. – P. 268–435.

3 **Pater, Z., Tomczak, J., Bartnicki, J., Lovell, M. R.** Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls [Текст] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. –Vol. 67. – 2013. – P. 1–7.

4 **Chen, Y.-J., Deng, Y., Pu, Y., Tang, B., Su, Y., Tang, J.** A real-time surface inspection system for precision steel balls based on machine vision [Текст] // Measurement Science and Technology. – Vol. 27. – № 7. – 2016. – P. 1–9.

5 **Wang, Y., Hadfield, M.** Failure modes of ceramic rolling elements with surface crack defects [Текст] // Wear. – Vol. 256. – Is. 1–2. – 2004. – P. 208–219.

6 **Wang, L., Snidle, R.W., Gu, L.** Rolling contact silicon nitride bearing technology [Текст] // Wear. – Vol. 246. – Is. 1–2. – 2000. – P. 159–173.

7 **Kakimoto, A.** Detection of surface defects on steel ball bearings in production process using a capacitive sensor [Текст] // Measurement. – Vol. 17. – 1996. – P. 51–57.

8 **Li, G., Zhou, Sh., Ma, L., Wang, Y.** Research on dual wavelength coaxial optical fiber sensor for detecting steel ball surface defects [Текст] // Measurement. – Vol. 133. – 2019. – P. 310–319.

9 **Wang, Y., Yang, Y., Geng, Y., Zheng, M.** Kinematic analysis of detection of steel ball surface defect based on ADAMS [Текст] // Advanced Materials Research. – Vol. 102–104. – 2010. – P. 82–87.

10 **Liao, S., Li, W., Lin, S., Tang, K., Liou, Ch., Tsou, Ch.** A study of the effect of different coplanar dual-coil geometries on the performance of mutual inductance [Текст] // Sensors and Actuators A: Physical. – Vol. 269. – 2018. – P. 99–110.

11 **Abuazza, A., Brabazon, D., El-Baradie M.A.** Multi-beam fibre-optic laser scanning system for surface defect recognition [Текст] // Journal of Materials Processing Technology. – Vol. 155–156. – 2004. – P. 2065–2070.

12 ISO 2014 ISO 3290–1:2014(E) Rolling Bearings – Balls – Part 1: Steel Balls [Текст]. – Enacted 2014–09–01. – Switzerland, 2014. – 11 p.

13 **Chyla, P., Pater, Z., Tomczak, J.** Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls [Текст] // Archives of Metallurgy and Materials. – Vol. 61. – № 2. – 2016. – P. 485–492.

14 **Pater, Z.** Numerical analysis of helical rolling processes for producing steel balls [Текст] // International Journal of Materials and Product Technology. – Vol. 53. – № 2. – 2016. – P. 137–153.

15 **Yang, S.C., Luo, Q., Sun, H., Kitchen, M., Cooke, K.** Physical and tribological properties of nitrided AISI 316 stainless steel balls [Текст] // Matec Web of Conferences. – Vol. 77. – 2016. – P. 1–5.

16 **Pater, Z., Tofil, A., Tomczak, J.** Steel balls forming by cross rolling with upsetting [Текст] // Metalurgija. – 2013. – P. 103–106.

17 **Pater, Z.** New methods of steel ball rolling [Текст] // International Journal of Materials and Product Technology. – Vol. 47. – № 1–4. – 2013. – P. 12–22.

18 **Аталыкова А.** Контроль величины дисбаланса изделий методом вращения изделия на вращающихся опорах [Текст] // Промышленность Казахстана. – 2018. – № 3(104). – С. 65–68.

19 **Лукомский, Я. И.** Теория корреляциии ее применение к анализу производства [Текст]. – М. : Госстатиздат, 1961. – 374 с.

REFERENCES

1 **Zhang, H., Ma, L., Xie, F.** A method of steel ball surface quality inspection based on flexible arrayed eddy current sensor [Text] // Measurement. – Vol. 144. – 2019. – P. 192–202.

2 **Bhadeshia, H. K. D. H.** Steels for bearings [Text] // Progress in Materials Science. – Is. 2. – 2012. – P. 268–435.

3 **Pater, Z., Tomczak, J., Bartnicki, J., Lovell, M. R.** Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls [Text] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – Vol. 67. – 2013. – P. 1–7.

4 **Chen, Y.-J., Deng, Y., Pu, Y., Tang, B., Su, Y., Tang, J.** A real-time surface inspection system for precision steel balls based on machine vision [Text] // Measurement Science and Technology. – Vol. 27. – № 7. – 2016. – P. 1–9.

5 **Wang, Y., Hadfield, M.** Failure modes of ceramic rolling elements with surface crack defects [Text] // Wear. – Vol. 256. – Is. 1–2. – 2004. – P. 208–219.

6 **Wang, L., Snidle, R.W., Gu, L.** Rolling contact silicon nitride bearing technology [Text] // Wear. – Vol. 246. – Is. 1–2. – 2000. – P. 159–173.

7 **Kakimoto, A.** Detection of surface defects on steel ball bearings in production process using a capacitive sensor [Text] // Measurement. – Vol. 17. – 1996. – P. 51–57.

8 **Li, G., Zhou, Sh., Ma, L., Wang, Y.** Research on dual wavelength coaxial optical fiber sensor for detecting steel ball surface defects [Text] // Measurement. – Vol. 133. – 2019. – P. 310–319.

9 **Wang, Y., Yang, Y., Geng, Y., Zheng, M.** Kinematic analysis of detection of steel ball surface defect based on ADAMS [Text] // Advanced Materials Research. – Vol. 102–104. – 2010. – P. 82–87.

10 **Liao, S., Li, W., Lin, S., Tang, K., Liou, Ch., Tsou, Ch.** A study of the effect of different coplanar dual-coil geometries on the performance of mutual inductance [Text] // Sensors and Actuators A: Physical. – Vol. 269. – 2018. – P. 99–110.

11 **Abuazza, A., Brabazon, D., El-Baradie M. A.** Multi-beam fibre-optic laser scanning system for surface defect recognition [Text] // Journal of Materials Processing Technology. – Vol. 155–156. – 2004. – P. 2065–2070.

12 ISO 2014 ISO 3290–1:2014(E) Rolling Bearings – Balls – Part 1: Steel Balls [Text]. – Enacted 2014–09–01. – Switzerland, 2014. – 11 p.

13 **Chyla, P., Pater, Z., Tomczak, J.** Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls [Text] // Archives of Metallurgy and Materials. – Vol. 61. – № 2. – 2016. – P. 485–492.

14 **Pater, Z.** Numerical analysis of helical rolling processes for producing steel balls [Text] // International Journal of Materials and Product Technology. – Vol. 53. – № 2. – 2016. – P. 137–153.

15 **Yang, S.C., Luo, Q., Sun, H., Kitchen, M., Cooke, K.** Physical and tribological properties of nitrided AISI 316 stainless steel balls [Text] // Matec Web of Conferences. – Vol. 77. – 2016. – P. 1–5.

16 **Pater, Z., Tofil, A., Tomczak, J.** Steel balls forming by cross rolling with upsetting [Text] // Metalurgija. – 2013. – P. 103–106.

17 **Pater, Z.** New methods of steel ball rolling [Text] // International Journal of Materials and Product Technology. – Vol. 47. – № 1–4. – 2013. – P. 12–22.

18 **Atalykova, A.** Kontrol velichiny disbalansa izdelii metodom vrashcheniia izdeliia na vrashchaiushchikhsia oporakh [Monitor the amount of product unbalance by rotating the product on rotating supports] [Text] // Promyshlennost Kazakhstana [Industry of Kazakhstan]. – 2018. – № 3(104). – P. 65–68.

19 **Lukomskij, Ya. I.** Teoriya korrelyacii i ee primenenie k analizu proizvodstva [Correlation Theory and Its Application to Production Analysis] [Text]. – M. : Gosstatizdat, 1961. – 374 p.

А. П. Муслимов[1], *А. К. Аталыкова[2], Е. О. Елеукулов[3]
[1]Кыргызский государственный технический
университет имени И. Раззакова, г. Бишкек
[2,3]Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

ҰСАҚ АЙНАЛМАЛЫ БҰЙЫМДАРДЫҢ ДӨҢГЕЛЕК ЕМЕСТІГІН ЖӘНЕ ДИСБАЛАНС ШАМАСЫН БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН АСПАП

Бұл мақалада жоғары айналу жылдамдығында жұмыс істейтін дәлме-дәл аспаптар мен қорғаныс өнеркәсібі машиналарында қолданылатын, шамамен 10г массасы бар шағын бұйымдардың дисбалансын анықтауға арналған құрылғыны жасау мәселесі қарастырылады. Құрылғы еркін айналу әдісіне негізделген, онда бұйымдар $r = 4$ мм радиуспен 15000 айн/мин жылдамдыққа дейін айналатын тірек біліктерінде айналады. Құрылғының геометриялық және кинематикалық параметрлері бақыланатын бұйымдардың масса-геометриялық сипаттамаларына байланысты, $e = 0$ масса центрінің радиалды орын ауыстыруы болмаған жағдайда анықталды.

Экспериментте масса центрі шартты түрде ығыстырылған бес бұйым сынақтан өткізілді, әр бұйымның әр айналу жылдамдығында n=12 өлшеуі жүргізілді. Алынған деректер негізінде бұйымдардың біліктерден ажырау бұрышы есептелді, бұл бақыланатын бұйымдардың сапасын бағалауға мүмкіндік береді: дисбаланс артқан сайын ажырау бұрышы азаяды. Алайда,

төмен айналу жылдамдықтарында дисбалансы бар бұйымдар $e = 8$ мкм пішін дәлсіздігіне байланысты тұрақсыз болады, бұл жоғары жылдамдықтарда тегістеліп, дисбаланстың әсеріне ұшырайды. Құрылғының өлшеу дәлдігі бұйым e=8 мкм болған жағдайда, $n_в$=9000 айн/мин жылдамдықта жүргізілген өлшеулер негізінде бағаланды

Кілтті сөздер: ұсақ бұйымдар, бұйымдардың дөңгелек еместігі, бақылаудың дәлдігі, дисбаланс, бақылауға арналған аспап.

A. P. Muslimov[1], *A. K. Atalykova[1], Y. O. Yeleukulov[2]
[1]Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek
[2,3]Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan

DEVICE FOR CHECKING THE NON-ROUNDNESS AND UNBALANCE OF SMALL ROTATING PARTS

This article addresses the development of a device for determining the imbalance of small-sized products weighing approximately 10g, used in precision instruments and defense industry machines operating at high rotational speeds. The device operates based on the free rotation method, where products with radius $r = 4$ mm rotate on support rollers at speeds of up to 15000 rpm. The geometric and kinematic parameters of the device were determined depending on the mass-geometric characteristics of the tested products, assuming no radial displacement of the center of mass $e = 0$.

Five test samples with a controlled center of mass displacement were used in the experiment, with each sample undergoing n=12 measurements at each roller speed. Based on the obtained data, the average detachment angle of the products from the rollers was calculated, which serves as an indicator of product quality: as imbalance increases, the detachment angle decreases. However, at low rotation speeds, imbalanced products with e=8 μm exhibit lower stability due to shape inaccuracies, which become less significant at higher speeds and are more influenced by imbalance. The device's measurement accuracy was assessed for the case when the measurements were carried out for a product with e=8 μm at n_r=9000 rpm.

Keywords: small products, non-roundness of products, control accuracy, imbalance, control device.

FTAMP 55.30.03
DOI

А. Қ. Мустафа[1], Р. А. Кайыров[2], *М. Қ. Сағынтай[3], Е. З. Нұғман[4]
[1,2,3,4]Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[2]Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, «Қолданбалы механика және робототехника» зертханасы, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[1,3]ЖШС «RnD Center», Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4751-7141
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0899-4981
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7946-1568
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4537-9440
*e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, skmuchagali-2009@mail.ru

АДДИТИВТІ ТЕНОЛОГИЯМЕН 3D БАСПАЛАУ КЕЗІНДЕ ПАЙДА БОЛАТЫН АУЫТҚУЛАРДЫ КОМПЕНСАЦИЯЛАЙТЫН МАНИПУЛЯТОР

Аддитивті тенологияда пайдаланатын технологияларының сенімділігін арттыру және мүмкіндіктерін кеңейту мақсатында басып шығару жүйесін дәстүрлі технологиялармен интеграциялау қарастырылуда. Алайда, бұл процестегі негізгі мәселелердің бірі – баспа бастиектің дәл позицияланбауы, бұл баспаланатын конструкцияның сапасының төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осы мәселені шешу үшін бұл мақалада 3D басып шығару кезінде манипулятор ретінде пайдаланатын дәстүрлі техниканың жебесінің ауытқуын компенсациялайтын, баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ететін манипулятор қолдану ұсынылады. Манипуляторды таңдау кезінде сериялық манипуляторлар және параллельді манипуляторларға анализ жасалып қарастырылды. Манипулятор жұмыс кеңістігіндегі XYZ осьтері бойынша ауытқуларды тиімді түрде компенсациялап, басып шығару дәлдігін және сапасын арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл міндетті жүзеге асыру үшін жоғары жылдамдыққа және дәл позициялау мүмкіндігі жоғары, сондай-ақ параллель кинематикасының арқасында жеткілікті қаттылықты қамтамасыз ететін Клавельдің дельта-роботы таңдалды. Зерттеу барысында кинематиканың тура және кері кинематика есептері шығарылып, манипулятордың жұмыс аймағы анықталды және оның қойылған міндетті шешуге жарамдылығы расталды. Алынған нәтижелер 3D басып шығару процесін одан әрі оңтайландыру және оның технологиялық тиімділігін арттыру үшін қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: 3D баспалау, манипулятор, кері кинематика, тура кинематика, Клавель дельта роботы.

Кіріспе

Аддитивті технологияны қолданатын 3D басып шығару – бұл құрылымдарды қабаттап құю арқылы жүзеге асатын заманауи өндірістік процесс [1]. Дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырғанда бұл тәсілдің бірқатар маңызды артықшылықтары бар. Атап айтқанда, ол шығындарды азайтып, құрылыс қалдықтарын азайтуға және күрделі архитектуралық жобаларды тиімді тұрғызуға мүмкіндік береді [2]. Сонымен қатар, бұл технология өндірістің тұрақтылығымен және үнемділігімен ерекшеленеді, сондықтан ол дамушы елдердегі тұрғын үй тапшылығы мәселесін шешудің тиімді жолы ретінде қарастырылуда [3]. Бұдан бөлек, 3D басып шығару тәсілі күрделі пішіндегі нысандарды жылдам тұрғызуға және шикізат ретінде қайта өңделген материалдарды пайдалануға мүмкіндік береді [4, 5].

Соған қарамастан, құрылыс конструкцияларын 3D басып шығару әлі де салыстырмалы түрде жаңа технология болып саналады және оның кеңінен қолданылуына бірқатар шектеулер бар. Атап айтқанда, 3D баспалау жабдықтарының жоғары құны, басып шығару көлемінің шектеулілігі және дайын құрылымдардың қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз ету қажеттілігі өзекті мәселелердің қатарына жатады. Баспа бастиекті тасымалдайтын жүйелердің ішінде роботталған қолдар, порталдық принтерлер және кабельдік роботтар секілді түрлі манипуляторлар бар [6]. Алайда олардың басым бөлігі зертханалық жағдайда сыналған және нақты құрылыс алаңдарының күрделі жағдайларына бейімделмеген.

Құрылымдардың сенімділігін арттырудың бір жолы – баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ету үшін дәстүрлі құрылыс машиналарын пайдалану. Осыған орай CONPrint3D монолитті 3D басып шығару тұжырымдамасы ұсынылған [7, 8]. Бұл тұжырымдама қолданыстағы құрылыс техникасын тиімді пайдалану арқылы технологияны құрылыс стандарттарына бейімдеуді көздейді. Атап айтқанда, басып шығару жүйесі автобетонсорғыға біріктіріледі, ол бұл жағдайда баспа бастиектің орналасуын басқару құралы ретінде қолданылады.

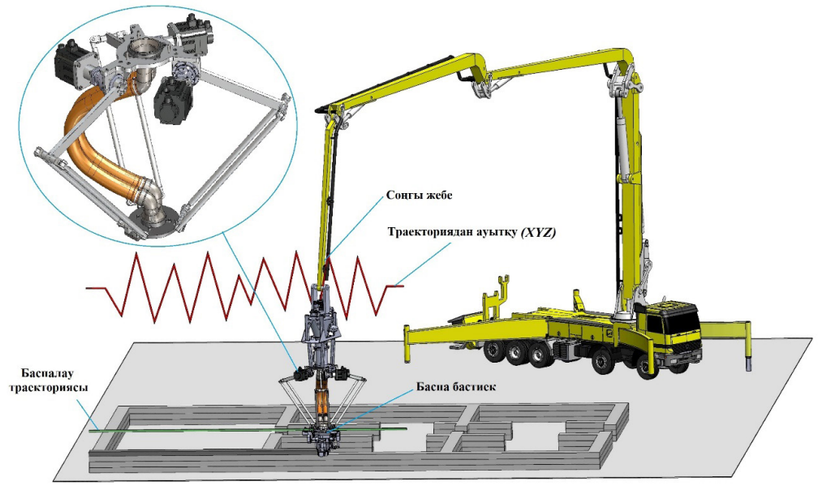
Дегенмен, бетон айдау процесі және қозғалу кезінде автобетонсорғы буындары механикалық деформацияларға және тербелістерге ұшырайды [9], ал буындарында айналмалы қозғалыс жасаған кезінде қосымша вибрациялар пайда болады [10]. Осы тұста Näther, M., Nerella және басқа зерттеушілердің [11] зерттеулері координаталық осьтер бойынша келесі орташа ауытқуларды көрсетті: X±90 мм, Y±51 мм, Z±150 мм. Мұндай дәлсіздік бетонды 3D басып шығару үшін қолайсыз. Ал қабырғаның баспалау дәлдігі DIN 18202 стандартының талаптарына сай болуы тиіс.

Осы мәселені шешу мақсатында бұл мақалада 3D басып шығару процесінде дәстүрлі құрылыс техникасының жебе қозғалысындағы ауытқуларды компенсациялауға арналған, баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ететін манипуляторды қолдану ұсынылады. Бұл бағытта келесі міндеттер шешіледі: манипуляторды таңдау, оның кинематикасының тура және кері есептерін шешу, сондай-ақ жұмыс аймағын анықтау. Жұмыс аймағы X±300 мм, Y±300 мм,

Z±300 мм-ді қамту керек. Сондай ақ манипулятор жоғары жылдамдыққа және жүккөтергіштікке ие болуы керек.

Материалдар мен әдістер

Автобетонсорғы – жаңа дайындалған бетон қоспасын арнайы бетонтасымалдағыш көліктерден қабылдап, оны төсеу орнына дейін көлденең және тік бағытта жеткізуге арналған машина. Бетонды жеткізу төрт секциялы бетон таратқыш жебе арқылы жүзеге асырылады (1 сурет). Баспа бастиек автобетонсорғының соңғы жебесіне орнатылған.



1-сурет – Басып шығару процесінде дәл позициялау үшін қажетті қозғалыстарды анықтау

3D баспалау кезінде баспа бастиекті компенсациялауға арналған манипулятор ықшам және жеңіл болуы тиіс және де жоғары динамикалық сипаттамаларға ие болуы қажет, себебі жылдам компенсациялық қозғалыстарды жүзеге асыру маңызды [12;13].

Компенсациялау блогының қажетті еркіндік дәрежелері баспа бастиектің қозғалыс жүйесіне (біздің жағдайда – автобетонсорғы жебесінің қозғалысы) және жоспарланған басып шығару траекториясына байланысты анықталуы керек. 1-суретте автобетонсорғы көмегімен қабырғаны түзу сызық бойымен басып шығару процедурасы көрсетілген.

Автобетонсорғы абсолюттік координаталар жүйесінде орналасқан. Оның жебесі цилиндрлік координаталар жүйесінде қозғалады және 3 еркіндік дәрежесіне ие. 1-суретте қажетті компенсациялық қозғалыстар көрсетілген, олар: X±300 мм, Y±300 мм, Z±300 мм.

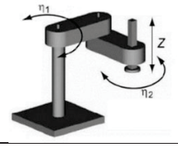
Баспа бастиектің ішіндегі бетонымен бірге 46 кг салмағы бар, бұл компенсациялаушы манипулятордың қатаң конструкцияға ие болуын талап

етеді. Позициялау дәлдігі ±5 мм құрылыс стандарттарының рұқсат етілген ауытқуларына сәйкес DIN 18202 стандарты бойынша анықталады.

Жоғарыда қойылған талаптарға сәйкес манипулятордың сәйкес кинематикасын таңдағанда, еркіндік дәрежесінен бөлек, динамикалық және құрылымдық аспектілерді де ескеру қажет. Динамикалық мәселелерге әдетте жүк көтергіштік қабілеті, жүйенің конструкциясының қаттылығы және үдеуге қабілеттілігі жатады.

Жоғарыда аталған талаптарға сәйкес келетін манипуляторды таңдау үшін сериялы және параллель құрылымды манипуляторлар қарастырылады (1-кесте).

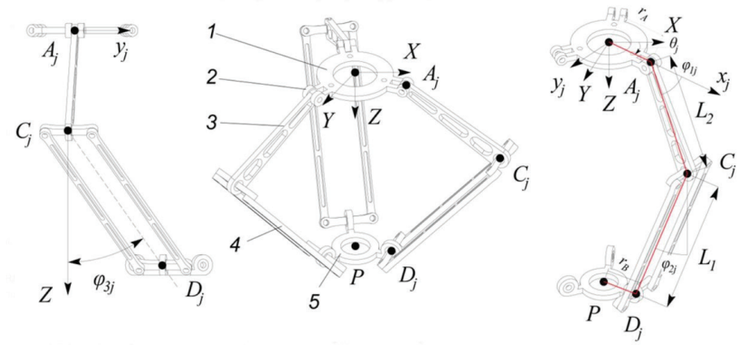
1-кесте – Сериялы және параллельді манипуляторлардың салыстыру кестесі

Сипаттамалары [45]	Сериялы манипулятор 	Параллель манипулятор 
Құрылымдық қаттылық	Төмен	Жоғары
Манипулятордың салмағы	Үлкен	Кіші
Жүк көтергіштігі	Төмен	Жоғары
Инерциялық жүктеме	Жоғары	Төмен
Орналастыру дәлдігі	Төмен	Жоғары
Жұмыс кеңістігі	Үлкен	Кіші
Жұмыс және орнату кеңістігі	Үлкен	Кіші

Манипулятор түрлерінің кейбір қасиеттері 1-кестеде салыстырылған. Сериялық манипуляторлардың артықшылықтары: олардың жұмыс кеңістігі үлкен және шебер маневр жасауға болады. Бірақ консольдық конструкцияға байланысты олардың жүк көтергіштігі төмен [15]. R. Neugebauer-дің [16, 162-190-бб.] еңбегі бойынша сериялық манипуляторлармен салыстырғанда параллель манипуляторлардың төмен қозғалатын массаға және жоғары динамикалық сипаттамаларға ие екені көрсетіледі. Алайда бұл құрылымдардың жұмыс аймағы шектеулі. Соған қарамастан, параллель манипуляторлардың құрылымдық қаттылығына, жүк көтергіштігіне, жылдамдығы және дәл позициялау мүмкіндіктеріне қарап компенсациялаушы жүйе ретінде қарастырған тиімді. Осы себепті сериялық манипуляторлар бұл мақсат үшін қарастырылмайды. Әрі қарай, параллель манипулятор яғни Клавелдің дельта роботы қарастырылады.

Геометрия және қозғалысы.

Баспа бастиекті компенсациялайтын манипулятор (бұдан әрі Клавел дельта роботы) 1-қозғалмайтын платформаны үш бірдей кинематикалық тізбек арқылы 5-қозғалмалы платформамен қосу арқылы алынады.



а) **б)** **с)**

2 - сурет – Клавель дельта-роботының құрылымы: (а) негізгі көрініс, (b) бір аяқтың бөлек қарастырылуы, (с) Клавельдің дельта-роботының параметрлері

Әрбір кинематикалық тізбек белсенді айналмалы кинематикалық жұптардан A_i тұрады, олар 1-қозғалмайтын платформадағы 2-қозғалтқышпен басқарылады. Қозғалыс параллелограммдар арқылы қозғалмалы платформаға беріледі (4-сурет). Мұндай роботтың позициялау дәлдігі шамамен 0,1 мм болады.

Кері кинематика.

Дельта роботтың бір аяғы үшін векторлық контурлардың тұйықталу теңдеулері былайша жазылады

$$\mathbf{r}_{D_i} = \mathbf{r}_{\mathrm{OP}} + \mathbf{h}_i, \ (i = 1,2,3). \qquad (1)$$

Абсолюттік $O_0X_0Y_0Z_0$ координаттар жүйесі белсенді айналмалы кинематикалық жұптар орналасқан нүктелердің центрінде орналастырылды. Параллель манипулятордың аяқтары арқылы $\mathbf{r}_{D_i}$ векторының компоненттерін анықтау үшін, абсолюттік $O_0X_0Y_0Z_0$ координаттар жүйесінен қозғалмалы платформаның аяқтарға бекітілген универсалды топсалар орналастырылған $D_1X_4Y_4Z_4$ координаттар жүйелерінің арасында Денавит-Хартенбергтің [17] біртекті түрлендіру матрицалары алынды.

1) $O_0X_0Y_0Z_0$ координаттар жүйесінен $D_1X_4Y_4Z_4$ координаттар жүйесіне келесі түрлендіру матрицалары алынды:

$$A_{01,i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_{01,i} \cdot s\theta_i & s\alpha_{01,i} \cdot s\theta_i & a_{01,i} \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_{01,i} \cdot c\theta_i & -s\alpha_{01,i} \cdot c\theta_i & a_{01,i} \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_{01,i} & c\alpha_{01,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

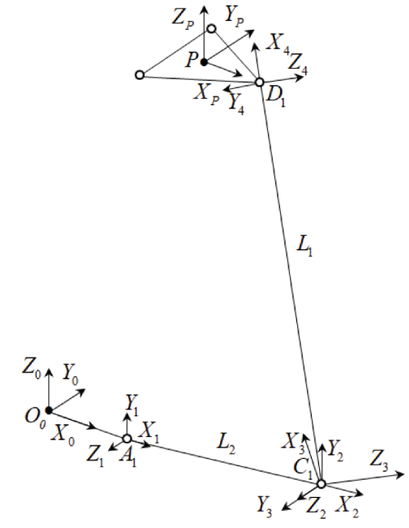
мұнда $\theta_i = 0^0, 120^0, 240^0, a_{01,i} = r_a,\ \alpha_{01,i} = 90^0\ (i = 1,2,3)$ - тұрақты

$$A_{12,i} = A_{01,i} \cdot \left[\begin{array}{c|c|c|c} c\varphi_{1i} & -s\varphi_{1i} & 0 & L_2 \cdot c\varphi_{1i} \\ \hline s\varphi_{1i} & c\varphi_{1i} & 0 & L_2 \cdot s\varphi_{1i} \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right],\ i = 1,2,3, \tag{3}$$

$$A_{23,i} = A_{12,i} \left[\begin{array}{c|c|c|c} c\varphi_{2i} & 0 & s\varphi_{2i} & 0 \\ \hline s\varphi_{2i} & 0 & -c\varphi_{2i} & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right],\ i = 1,2,3, \tag{4}$$

$$A_{34,i} = A_{23,i} \cdot \left[\begin{array}{c|c|c|c} c\varphi_{3i} & -s\varphi_{3i} & 0 & L_1 \cdot c\varphi_{3i} \\ \hline s\varphi_{3i} & c\varphi_{3i} & 0 & L_1 \cdot s\varphi_{3i} \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right],\ i = 1,2,3, \tag{5}$$

(2)-(5) матрицаларға сәйкес абсолюттік және жергілікті координаттар жүйелері 3-суретте көрсетілген.



3 - сурет – Абсолюттік және жергілікті координаттар жүйелері

(5)-теңдеудегі $A_{34,i}$ матрицасын $[0\ 0\ 0\ 1]^T$ векторына көбейту арқылы 5-қозғалмалы платформаға бекітілетін D_i универсалды топсалардың координаталары аяқтардың тұрақты және айнымалы параметрлеріне байланысты функциялар ретінде анықталды

$$\begin{aligned} X_{D_i} &= r_a \cdot \cos\theta_i + L_2 \cdot \cos\varphi_{1i} \cdot cos\theta_i + L_1 \cdot \sin\varphi_{3i} \cdot \sin\theta_i + \\ &+ L_1 \cdot \cos\varphi_{3i} \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\left(\varphi_{1i} + \varphi_{2i}\right), \\ Y_{D_i} &= r_a \cdot \sin\theta_i + L_2 \cdot cos\varphi_{1i} \cdot \sin\theta_i - L_1 \cdot \cos\theta_i \cdot \sin\varphi_{3i} + \\ &+ L_1 \cdot \cos\varphi_{3i} \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\left(\varphi_{1i} + \varphi_{2i}\right) \\ Z_{D_i} &= L_2 \cdot \sin\varphi_{1i} + L_1 \cdot \cos\varphi_{3i} \cdot \sin\left(\varphi_{1i} + \varphi_{2i}\right). \end{aligned} \tag{6}$$

Кері кинематика есебін шешу кезінде біз қозғалмалы платформаның орнын келесі теңдеулер арқылы береміз

$$\left[\begin{array}{c} X_{D_i} \\ Y_{D_i} \\ Z_{D_i} \\ 1 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c|c|c} 1 & 0 & 0 & X_P \\ \hline 0 & 1 & 0 & Y_P \\ \hline 0 & 0 & 1 & Z_P \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} r_b \cdot \cos\theta_i \\ \hline r_b \cdot \sin\theta_i \\ \hline 0 \\ \hline 1 \end{array}\right], i = 1,2,3, \tag{7}$$

мұндағы $\theta_1 = 0,\ \theta_2 = 2\pi/3,\ \theta_3 = -2\pi/3.$

(7)-теңдіктен мынаны аламыз

$$X_{D_i} = X_P + r_b \cdot \cos\varphi_i, Y_{D_i} = Y_P + r_b \cdot \sin\varphi_i, Z_{D_i} = Z_P,\ i = 1,2,3. \tag{8}$$

(6) және (8) теңдеулерден 5-қозғалмалы платформаның центрінің координаталарын былайша анықтаймыз

$$\begin{aligned} X_P &= r \cdot \cos\theta_1 + L_2 \cdot \cos\varphi_{11} \cdot \cos\theta_1 + \\ &+ L_1 \cdot \sin\varphi_{31} \cdot \sin\theta_1 + L_1 \cdot \cos(\varphi_{11} + \varphi_{21}) \cdot \cos\varphi_{31} \cdot \cos\theta_1, \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} Y_P &= r \cdot \sin\theta_1 + L_2 \cdot \cos\varphi_{11} \cdot \sin\theta_1 - \\ &- L_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot sin\varphi_{31} + L_1 \cdot \cos(\varphi_{11} + \varphi_{21}) \cdot \cos\varphi_{31} \cdot \sin\theta_1, \end{aligned} \tag{10}$$

$$Z_P = L_2 \cdot \sin\varphi_{11} + L_1 \cdot \sin(\varphi_{11} + \varphi_{21}) \cdot \cos\varphi_{31}, \tag{11}$$

мұндағы $r = r_a - r_b$.

(9)-(11) теңдеулердің квадраттарының қосындысынан келесі теңдеуді аламыз

$$(X_P - X_i)^2 + (Y_P - Y_i)^2 + (Z_P - Z_i)^2 - L_1^2 = 0, \tag{12}$$

мұндағы

$X_i = \cos\theta_i \cdot (\mathrm{r} + L_2 \cdot \cos\varphi_{1i}),\ Y_i = \sin\theta_i \cdot (\mathrm{r} + L_2 \cdot \cos\varphi_{1i}),\ Z_i = L_2 \cdot \sin\varphi_{1i},\ i = 1,2,3.$

Жақшаларды ашу арқылы (12)-теңдеуді келесі түрге келтіреміз

$$l_1 \cdot \cos\varphi_{1i} + m_1 \cdot \sin\varphi_{1i} - n_1 = 0 \tag{13}$$

мұндағы $l_i = 2 \cdot r \cdot L_2 - 2 \cdot L_2 \cdot X_P \cdot \cos\theta_i - 2 \cdot L_2 \cdot Y_P \cdot \sin\theta_i,$

$m_i = -2 \cdot L_2 \cdot Z_P,$

$n_i = -(r^2 - L_1^2 + X_P^2 + Y_P^2 + Z_P^2 - 2 \cdot X_P \cdot r \cdot \cos\theta_i - 2 \cdot Y_P \cdot r \cdot \sin\theta_i + L_2^2).$

(13)-теңдеуді шешу арқылы Дельта роботтың әр аяғының екі құрастырылуына сәйкес келесі шешімдерді аламыз

$$\varphi_{1i1} = a\cos(n_1 / k_1) + \alpha_1 \text{ and } \varphi_{1i2} = -a\cos(n_1 / k_1) + \alpha_1, \tag{14}$$

мұндағы $k_1 = \sqrt{l_1^2 + m_1^2}$, $\alpha_1 = atan(m_1 / l_1)$.

(9) және (10) теңдеулерді алдын ала сәйкесінше $cos\theta_j$ және $sin\theta_j$ $(j = 1,2,3)$ ға көбейту арқылы келесі теңдікті аламыз

$$L_1 \cdot \cos\varphi_{3i} \cdot \cos\varphi_{12i} = a, \tag{15}$$

мұндағы

$a = \left(X_P - \left(r + L_2 \cdot \cos\varphi_{1i}\right) \cdot \cos\theta_1\right) \cdot \cos\theta_1 + \left(Y_P - \left(r + L_2 \cdot \cos\varphi_{1i}\right) \cdot \sin\theta_1\right) \cdot \sin\theta_1,$

$\varphi_{12i} = \varphi_{1i} + \varphi_{2i}.$

(11)-теңдеу келесі түрге келтірілді

$$L_1 \cdot \cos\varphi_{3i} \cdot \sin\varphi_{12i} = b, \tag{16}$$

мұндағы $b = Z_P - L_2 \cdot \sin\varphi_{1i}.$

(16)-теңдеудің (15)-теңдеуге қатынасынан келесі шешім алынды

$$\varphi_{2j} = a\tan\left(b / a\right) - \varphi_{1j}. \tag{17}$$

(15) және (16) теңдеулерді квадраттап қосу арқылы келесі шешім алынды

$$\varphi_{3j} = \pm a\cos\sqrt{(a_j^2 + b_j^2) / L_1^2}. \tag{18}$$

(14)-теңдеудегі φ_{3j} дің таңбасы X_P және Y_P таңбаларына байланысты өзгеріп отырады.

Тура кинематика.

Клавельдің дельта-роботының тура кинематикасын шешу үшін φ_{1j} белсенді айналмалы кинематикалық жұптарының орналасу бұрыштары беріледі, ал X_P, Y_P, Z_P қозғалмалы платформаның центрінің координаталары анықталады. Сонымен қатар, φ_{2j}, φ_{3j} пассивті айналмалы кинематикалық жұптарының айналу бұрыштары анықталады.

(12)-теңдеулер келесі түрге келтіріледі

$$\left.\begin{aligned} (X_P - X_1)^2 + (Y_P - Y_1)^2 + (Z_P - Z_1)^2 - L_1^2 = 0 \\ (X_P - X_2)^2 + (Y_P - Y_2)^2 + (Z_P - Z_2)^2 - L_1^2 = 0 \\ (X_P - X_3)^2 + (Y_P - Y_3)^2 + (Z_P - Z_3)^2 - L_1^2 = 0 \end{aligned}\right\}. \tag{19}$$

(19)-жүйедегі жақшаларды ашып, бірінші теңдеуден екінші теңдеуді және бірінші теңдеуден үшінші теңдеуді шегеріп, келесі екі теңдеуді аламыз

$$\left.\begin{aligned} m_{11}\cdot X_P + m_{12}\cdot Y_P + m_{13} - 2\cdot Z_P\cdot Z_1 + 2\cdot Z_P\cdot Z_2 = b_1 \\ m_{21}\cdot X_P + m_{22}\cdot Y_P + m_{23} - 2\cdot Z_P\cdot Z_2 + 2\cdot Z_P\cdot Z_3 = b_2 \end{aligned}\right\}, \quad (20)$$

мұндағы $m_{11} = -2\cdot X_1 + 2\cdot X_2$, $m_{12} = -2\cdot Y_1 + 2\cdot Y_2$,

$m_{13} = X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 - X_2^2 - Y_2^2 - Z_2^2$,

$m_{21} = -2\cdot X_2 + 2\cdot X_3$, $m_{22} = -2\cdot Y_2 + 2\cdot Y_3$, $m_{23} = X_2^2 - X_3^2 + Y_2^2 - Y_3^2 - Y_3^2 + Z_2^2$.

(20)-жүйе матрицалық түрге келтірілді

$$A\cdot\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \end{bmatrix} = B, \quad (21)$$

мұндағы $A = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} -m_{13} + 2\cdot Z_P\cdot Z_1 - 2\cdot Z_P\cdot Z_2 \\ -m_{23} + 2\cdot Z_P\cdot Z_2 - 2\cdot Z_P\cdot Z_3 \end{pmatrix}$.

(21)-матрицалық теңдеуден X_P және Y_P былайша анықталды

$$X_P = (k_{11}\cdot Z_P + k_{12}),\ Y_P = (t_{11}\cdot Z_P + t_{12}), \quad (22)$$

мұнда

$k_{11} = 2\cdot(-m_{12}\cdot Z_2 + m_{12}\cdot Z_3 + m_{22}\cdot Z_1 - m_{22}\cdot Z_2)/q$, $k_{12} = (m_{12}\cdot m_{23} - m_{13}\cdot m_{22})/q$,

$t_{11} = 2\cdot(m_{11}\cdot Z_2 - m_{11}\cdot Z_3 - m_{21}\cdot Z_1 + m_{21}\cdot Z_2)/q$, $t_{12} = (m_{13}\cdot m_{21} - m_{11}\cdot m_{23})/q$,

$q = m_{11}\cdot m_{22} - m_{12}\cdot m_{21}$.

(19)-жүйенің үшінші теңдеуінен (22)-теңдеуді ескере отырып, келесіні аламыз

$$Z_P = \frac{-2\cdot(k_{11}\cdot k_{12} - k_{11}\cdot x_3 + t_{11}\cdot t_{12} - t_{11}\cdot y_3 - z_3) \pm \sqrt{D}}{2\cdot(k_{11}^2 + t_{11}^2 + 1)}, \quad (23)$$

мұндағы $D = (2\cdot k_{11}\cdot k_{12} - 2\cdot k_{11}\cdot X_3 + 2\cdot t_{11}\cdot t_{12} - 2\cdot t_{11}\cdot Y_3 - 2\cdot Z_3)^2 -$
$-4\cdot(k_{11}^2 + 1 + t_{11}^2)\cdot(k_{12}^2 - 2\cdot k_{12}\cdot X_3 + t_{12}^2 - 2\cdot t_{12}\cdot y_3 + X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2 - L_1^2)$.

(23)-ші теңдеуден, (22)-теңдеуді ескере отырып, X_P және Y_P мәндерін аламыз. Осылайша, тікелей кинематика есептеуін қолданып, кері кинематика есебін тексереміз.

Қолданылған әдістер

Параллель манипуляторлардың тура есебіне қарағанда, кері есебін шешу оңайырақ болып табылады. Дельта роботтың кері есебі нақты формада шешілді. Дельта робот кеңістікте X, Y және Z өстері бойынша тек қана ілгерлемелі қозғалыс жасайтындықтан, қозғалмалы платформа үнемі бекітілген негізге параллель

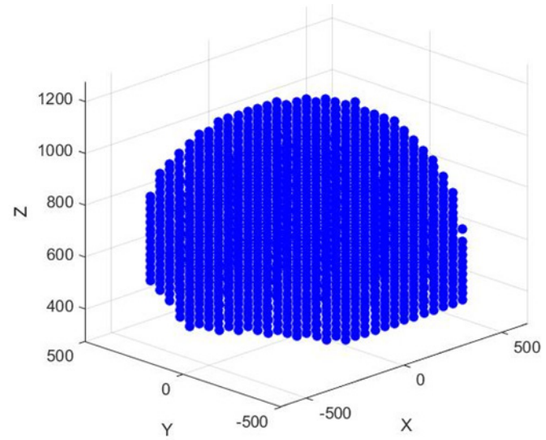
орналасады және бағдарын өзгертпейді, сол себепті тура есептің шешімі де оңай анықталды. Параллель манипуляторларға тән тура есепті шешу үшін, полиномдар әдісі немесе итерациялық әдістерді қолдану қажеттілігі туындаған жоқ, себебі үш аяқ үшін кіріс параметрлері φ_{1i} $(i = 1,2,3)$ берілген жағдайда қозғалмалы палтформаның центрінің X_P , Y_P, Z_P координаталарын оңай анықтауға болады, ал қалған пассивті звенолардың бұрылу бұрыштары роботтың геометриясын пайдалана отырып анықталды.

Нәтижелер мен талқылау

Клавельдің дельта-роботы жоғары жылдамдықты және дәл қозғалыстарды орындай алатындықтан ең қолайлы нұсқа ретінде қарастырылды [18, 19]. Сонымен қатар, манипулятордың параллель құрылымы жабық кинематикаға байланысты жүйенің барлық позицияларында жеткілікті қатаңдыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Таңдаудың тағы бір себебі – қарапайым дизайн және жеңіл салмақ.

Келесі тұрақты параметрлерді береміз $r_a = 182.5$, $r_b = 105$, $r = r_a - r_b$, $L_1 = 740$, $L_2 = 440$, $\theta_1 = 0$, $\theta_1 = 0^0$,
$\theta_2 = 120^0$, $\theta_3 = 240^0$.

Кері кинематикалық есептің негізінде Дельта роботының жұмыс аймағы анықталды. Ол үшін қозғалмалы платформаның центрінің координаталары үш цикл бойынша X_P мен Y_P -500-ден +500-ге дейін, 50 қадамымен және Z_P 450-ден 1100-ге дейін, 50 қадамымен өзгертіліп отырған жағдайда кері кинематикалық есептің шешімі бар болған жағдайда кеңістікке нүкте қойып отыратын бағдарлама жасалды. Сәйкес жұмыс аймағы 4-суретте көрсетілген және Дельта робот $Z_P = 300$ ге тең болған жағдайда $X_P = \pm 300$, $Y_P = \pm 300$ аралығында еркін жұмыс жасай алатындығын көре аламыз.



4-сурет – Кері кинематика есебі бойынша жұмыс аймағы

Тура кинематиканың нәтижелері. Белсенді кинематикалық жұптардың айналу бұрыштары кері кинематикалық есеп бойынша $\varphi_{11} = 0.2398$, $\varphi_{12} = 0.5620$, $\varphi_{13} = 1.1922$ шамаларына тең болған жағдайда қозғалмалы платформаның центрінің координаталары $X_P = 298.54$, $Y_P = 298.54$, $Z_P = 749.5$ анықталып, ол мәндер кері кинематика бойынша берілген мәндерге сәйкес келетіндігіне көз жеткізілді.

Зерттеу нәтижелері Клавельдің дельта-роботы бетонды 3D басып шығару кезінде басып шығару басының ауытқуын өтеу үшін оңтайлы шешім екенін растайды, өйткені ол жоғары дәлдікпен, жылдамдықпен және қаттылықпен ерекшеленеді. Кері кинематика есебі негізінде жұмыс аймағын талдау роботтың қажетті қозғалыс диапазонына ие екенін көрсетті, ал тура кинематика есебінің шешімі модельдің дұрыстығын растады. Бұл ұсынылған манипулятордың дәл позициялауды қамтамасыз ете алатынын және ауытқуларды өтеу жүйесіне сәтті интеграцияланатынын дәлелдейді.

Қаржыландыру туралы ақпарат (бар болса)

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант ЖТН AP19679899 – Автобетонсорғы негізіндегі құрылыс 3Д принтерінің ауытқуларын компенсациялайтын және баспа бастиекті позициялайтын манипуляторды зерттеп жобалау).

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде бетонды 3D басып шығару технологиясының тиімділігін арттыру үшін автобетонсорғы жебесінің ауытқуын компенсациялайтын манипуляторды қолдану қажеттілігі анықталды. Баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ету құрылыс сапасы мен дәлдігін жақсартудың маңызды факторларының бірі болып табылады. Осы мақсатта Клавельдің дельта-роботы таңдалып, оның тура және кері кинематикасы есептелді, сондай-ақ жұмыс аймағы XYZ ұ300 мм болатындай анықталды. Бұл роботтың жоғары дәлдігі мен жылдамдығы, сондай-ақ жүйенің қажетті қаттылығын қамтамасыз ету қабілеті оны ең тиімді шешімдердің бірі ретінде қарастыруға мүмкіндік берді.

Жүргізілген зерттеулер бетонды 3D басып шығару процесінде дәстүрлі құрылыс техникасын пайдалана отырып, оның мүмкіндіктерін кеңейтуге болатынын көрсетті. Болашақта алынған нәтижелерді нақты құрылыс жағдайларында қолдану және манипуляторды жетілдіру бойынша қосымша зерттеулер жүргізу қажет.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 DIN EN ISO/ASTM 52900. Additive Fertigung — Grundlagen — Terminologie. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018.

2 **da Silva M. D. L. et al.** Building a sustainable future: The role of additive manufacturing in civil construction //Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – P. e02976.

3 **de Souza, E. A., Borges, P. H., Stengel, T., Nematollahi, B., & Bos, F. P.** 3D printed sustainable low-cost materials for construction of affordable social housing in Brazil : Potential, challenges, and research needs. Journal of Building Engineering, 2024, 108985.

4 **Khajavi S.H., Tetik M., Mohite A., Peltokorpi A., Weng M., Li Y., Holmström J.** Additive manufacturing in the construction industry : The comparative competitiveness of 3D concrete printing // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – № 9. – P. 3865. – https://doi.org/10.3390/app11093865.

5 **Han Y., Yang Z., Ding T., Xiao J.** Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 278. – P. 123884. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123884.

6 **Puzatova A. et al.** Large-scale 3D printing for construction application by means of robotic arm and gantry 3D printer : A review //Buildings. – 2022. – Vol. 12. – №. 11. – P. 2023.

7 **Krause M., Otto J., Bulgakov A., Sayfeddine D.** Strategic optimization of 3D concrete printing using the method of CONPrint3D® // ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. – IAARC Publications, 2018. – Vol. 35. – P. 1–7. – https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0002.

8 **Badr A., Fentiman C., Grantham M., Mangabhai R.** Concrete for the Modern Age : Developments in Materials and Processes. – Whittles Publishing, 2017. – P. 74–81. – ISBN 978-184995-372-6.

9 **Liu R., Gao Y., Yang S., Yang Y.** Vibration Control of the Boom System of Truck-Mounted Concrete Pump Based on Constant-Position Commandless Input Shaping Technique // Shock and Vibration. – 2015. – Т. 2015. – № 1. – P. 420935. – https://doi.org/10.1155/2015/420935.

10 **Yang W., Zhang B., Huang Y., Cai Q., Zhang P.** Rotary vibration control simulation and experiment research on the boom of concrete pump truck // 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). – IEEE, 2017. – P. 988–993. – https://doi.org/10.1515/9783110267709.259.

11 **Näther M., Nerella V. N., Krause M., Künze G., Mechtcherine V., Schach R.** Beton-3D-Druck-Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht. – 2017.

12 **Storch F.** Beton-3D-Druck – Neues Anwendungsfeld für Autobetonpumpen // In: Tagungsband Praxis Transportbeton. – Berlin, 2022. –P. 1–25.

13 **Näther M., Nerella V. N., Krause M., Kunze G., Mechtcherine V., Schach R.** Beton-3D-Druck-Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht. – 2017.

14 **Lynch K. M., Park F. C.** Modern robotics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. – https://doi.org/10.1017/9781316661239.

15 **Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S.** The Stewart platform manipulator: a review [Текст] / B. Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya // Mechanism and Machine Theory. – 2000. – № 35(1). – С. 15–40.

16 **Neugebauer R.** Parallel kinematische Maschinen : Entwurf, Konstruktion, Anwendung. – Berlin; Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 259 c.

17 **Tsai L.W.** Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. – New York; Singapore; Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 499 p.

18 **Miller K.** Experimental verification of modeling of DELTA robot dynamics by direct application of Hamilton's principle // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1995. – № Vol. 1. – P. 532–537.

19 **Clavel R.** Delta, a Fast Robot with Parallel Geometry // Springer-Verlag and Heidelberg GmbH and Co., Berlin. – 1988. – № Vol. 26–28. – P. 91–100.

А. Қ. Мустафа[1], Р. А. Кайыров[2], * М. Қ. Сағынтай[3], Е. З. Нұғман[4]

[1,2,3,4]Университет Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы

[2]Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова, НИЛ «Прикладная механика и робототехника», Республика Казахстан, г. Караганда

[1,3]ТОО «RnD Center», Республика Казахстан, г. Алматы

МАНИПУЛЯТОР ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

В целях повышения надежности используемых в аддитивных технологиях методов и расширения их возможностей рассматривается интеграция системы печати с традиционными технологиями. Однако одной из ключевых проблем этого процесса является неточная позиция печатной головки, что может привести к снижению качества изготавливаемой конструкции. Для решения этой проблемы в данной статье предлагается использовать манипулятор, компенсирующий отклонения стрелы традиционной техники, используемой в качестве манипулятора при 3D-печати, обеспечивая тем самым точное расположение печатной головки. При выборе манипулятора был проведен анализ серийных и параллельных манипуляторов. Манипулятор эффективно компенсирует отклонения по осям XYZ в рабочем пространстве, повышая точность и качество печати.

Для выполнения этой задачи был выбран дельта-робот Клавеля, обладающий высокой скоростью и точностью позиционирования, а также обеспечивающий достаточную жесткость благодаря параллельной кинематике. В ходе исследования были решены прямые и обратные задачи кинематики, определена рабочая зона манипулятора и подтверждена его пригодность для решения поставленной задачи. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей оптимизации процесса 3D-печати и повышения его технологической эффективности.

Ключевые слова: 3D-печать, манипулятор, обратная кинематика, прямая кинематика, дельта-робот Клавеля.

A. Mustafa[1], R. Kaiyrov[2], *M. Sagyntay[3], Y. Nugman[4]

[1,2,3,4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

[2]Karagandy State University named after E. A. Buketov, Republic of Kazakhstan, Almaty

[2]Karaganda Buketov University, Research Laboratory «Applied Mechanics and Robotics», Republic of Kazakhstan, Karaganda

[1,3]LLP «RnD Center», Republic of Kazakhstan, Almaty

MANIPULATOR FOR COMPENSATING DEVIATIONS OCCURRING DURING 3D PRINTING WITH ADDITIVE TECHNOLOGY

To enhance the reliability of technologies used in additive manufacturing and expand their capabilities, the integration of the printing system with traditional technologies is being considered. However, one of the main challenges in this process is the inaccurate positioning of the print head, which can lead to a decrease in the quality of the fabricated structure. To address this issue, this paper proposes the use of a manipulator that compensates for deviations of the boom of traditional machinery used as a manipulator during 3D printing, thereby ensuring precise positioning of the print head. In selecting the manipulator, an analysis of serial and parallel manipulators was conducted. The manipulator effectively compensates for deviations along the XYZ axes in the working space, improving printing accuracy and quality.

To accomplish this task, the Clavel delta robot was chosen due to its high speed, precise positioning capabilities, and sufficient rigidity provided by its parallel kinematics. During the study, direct and inverse kinematics problems were solved, the working area of the manipulator was determined, and its suitability for the given task was confirmed. The obtained results can be used to further optimize the 3D printing process and enhance its technological efficiency.Keywords: concrete 3D printing, manipulator, inverse kinematics, forward kinematics, Clavel's delta robot.

Keywords: 3D printing, manipulator, inverse kinematics, forward kinematics, Clavel delta robot.

МРНТИ 55.09.43
DOI

Н. С. Райсов[1], Д. Б. Буйткенов[2], Л. Г. Сулюбаева[3], Т. Алимбекулы[4]
[1,2,3,4]Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
*e-mail: nurmakhanbetraisov@gmail.com
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1698-957X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0239-5849
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1924-1459
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7419-1281

ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 45

В данной работе исследовано влияние параметров газопламенного напыления и последующей термической обработки на структуру, микротвёрдость и трибологические свойства покрытий на основе самофлюсующихся никелевых сплавов системы Ni-Cr-Fe-B-Si. В качестве подложки использовалась конструкционная сталь марки 45. Покрытия наносились методом газопламенного напыления, после чего подвергались термическому воздействию в печи и пламенем пистолета. Проведён комплекс механо-трибологических исследований: были получены значения микротвёрдости, изучены морфология, пористость, а также износостойкость методом сухого трения по схеме «шар-диск». Установлено, что оптимальная температура предварительного нагрева подложки составляет 200–250 °С, при которой достигается наибольшая твёрдость и однородность покрытия. Оба варианта термической обработки способствуют снижению пористости, увеличению плотности покрытия и существенному уменьшению коэффициента трения. Образование оксидов C_r2O_3 и SiO_2 дополнительно повышает эксплуатационные характеристики покрытий. Полученные данные подтверждены результатами электронно-микроскопического анализа, трибологических испытаний, а также сопоставлены с данными, приведёнными в работах зарубежных авторов. Разработанная технология может быть использована для повышения долговечности, надёжности и экономической эффективности работы деталей, эксплуатируемых в условиях повышенного износа, термических и механических нагрузок.

Ключевые слова: самофлюсующиеся сплавы, газопламенное напыление, никелевые сплавы, NiCrFeBSi, термическая обработка, сталь 45.

Введение

Современное машиностроение часто сталкивается с необходимостью разработки новых конструкционных материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами для работы в жёстких технологических

условиях — при высоком трении, под воздействием различных внешних сред, при тепловой нагрузке. Данные условия эксплуатации часто приводят к износу деталей оборудования, что, в свою очередь, чревато частыми ремонтами, заменой изношенных деталей и увеличением себестоимости выпускаемой продукции, что, соответственно, приводит к экономическим потерям.

Но, несмотря на это, выпускать деталь целиком из дорогостоящих износостойких материалов приводит к резкому увеличению стоимости и трудностям при обработке деталей. Решением этой проблемы может служить нанесение износостойких покрытий на поверхность детали, а также восстановление изношенной детали, тем самым значительно увеличивая срок её эксплуатации [1].

Покрытия из самофлюсующихся никелевых сплавов нашли широкое применение в различных сферах машиностроения [2;3]. Газотермические (в том числе плазменные) покрытия на основе Ni-Cr-Fe-B-Si используются для повышения износостойкости машинных деталей. NiCrFeBSi активно применяются для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях интенсивного трения — таких, как элементы угольных котлов, теплообменного оборудования, турбин, инструмента, экструдеров, плунжеров, валков прокатных станов, а также сельскохозяйственных машин.

Они обладают высокой устойчивостью к адгезионному износу и коррозии как при обычных, так и при повышенных температурах. Чтобы улучшить эксплуатационные характеристики таких покрытий, после нанесения их подвергают оплавлению. Кроме того, за счёт наличия в их структуре боридов и карбидов, данные сплавы демонстрируют превосходную износостойкость при абразивном воздействии [4].

Для обеспечения требуемых триботехнических свойств оплавленных покрытий на основе Ni-Cr-Fe-B-Si, процесс термообработки должен проходить строго при определённой температуре (в диапазоне 1000–1373 К), так как эти материалы являются эвтектическими сплавами и отличаются высокой чувствительностью к параметрам термического воздействия [5; 6]. Оплавление может осуществляться различными методами, включая напыление с последующим оплавлением газовым пламенем, в печи, а также при помощи лазерной оплавки.

В работе С. Наваса под названием «Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings» изучается влияние лазерной оплавки на свойства полученных покрытий. Из данной работы становится известно, что значительным недостатком лазерной обработки является то, что оплавляется лишь поверхность покрытия, тем самым оставляя пористую структуру в середине и вблизи подложки, что приводит к снижению когезионной и адгезионной прочности покрытий [7].

Данная работа посвящена напылению NiCrFeBSi при помощи газопламенного напыления и исследованию влияния последующего оплавления покрытия в печи и пламенем пистолета.

Материалы и методы

В качестве материала подложки была выбрана конструкционная углеродистая сталь марки 45. Данная сталь часто используется в промышленности для изготовления валов-шестерён, коленчатых и распределительных валов, шестерён, шпинделей, бандажей, цилиндров, кулачков и других нормализованных, улучшаемых и подвергаемых поверхностной термообработке деталей, от которых требуется повышенная прочность. Согласно ГОСТ 1050–88, сталь 45 имеет следующий состав (Таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав стали 45

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.42 - 0.5	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.3

Стальной пруток из стали марки 45 с диаметром 50 мм был нарезан на шайбы толщиной по 5 мм. Шайбы были отшлифованы наждачной бумагой с зернистостью от 100 до 2000. Затем, для улучшения адгезии и снятия поверхностных напряжений, шайбы были подвергнуты пескоструйной обработке электрокорундом с фракцией частиц 40 мкм. Для удаления остатков пыли образцы продувались сжатым воздухом. Для удаления масляных и оксидных плёнок с поверхности образцы погружались в ультразвуковую ванну с этанолом.

Перед непосредственным напылением для улучшения прочности сцепления покрытия с подложкой образцы прогревали при температурах 100 ºС, 150 ºС, 200 ºС, используя пистолет для газопламенного напыления без подачи порошка. Температура подложки отслеживалась с помощью инфракрасного термометра марки RoHS модели DT8016E с диапазоном измерений от –50 ºС до 1600 ºС и точностью ±2 ºС. Для получения покрытий использовался коммерческий самофлюсующийся порошок на основе никеля производства КНР. Морфология и состав порошков представлены на рисунке 1.

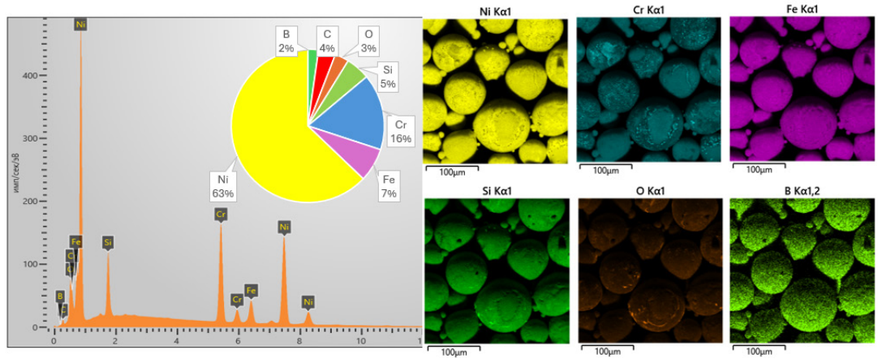


Рисунок 1 – Морфология используемых самофлюсующихся порошков

В качестве технологии получения покрытий использовалась установка для газопламенного напыления фирмы Metal Coat с использованием порошкового пистолета 6PM-II и дозатора порошков MPF700. Общий вид установки и схема устройства пистолета показаны на рисунке 2. Принцип работы данной установки заключается в плавлении частиц при помощи горения газовой смеси, состоящей из ацетилена и кислорода. Для транспортировки порошков и охлаждения ствола используется сжатый воздух. Воздух из компрессора проходит через фильтр, встроенный в регулятор выходного давления, во избежание загрязнения порошков частицами моторного масла.

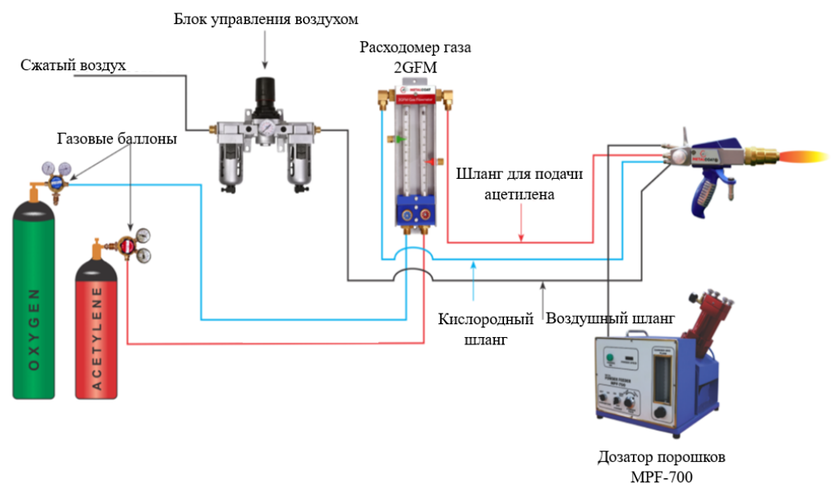


Рисунок 2 – Схема установки для газопламенного напыления

Отбор оптимального режима напыления производился путем измерения значения пористости полученных покрытий в поперечном сечении на программном обеспечении оптического микроскопа Olimpus BX53M. После получения оптимального режима напыления были проведены термические обработки двумя методами: нагрев в печи при температуре 1025 ºС в течение 5 минут, а также нагрев поверхности покрытия в таком же режиме. Так же были проведены измерения значений микротвердости подложки при предварительном нагреве при диапазоне температур 100 – 300 ºС, с шагом 50 ºС. Измерения значения микротвердости проводились по методу Мартенса на нанотвердомере FISCHERSCOPE HM2000 S в соответствии с требованиями стандарта DIN EN ISO 14577-1, при нагрузке 300 000 мН и времени нагружения 20 сек.

Скорость потока частиц и температура пламени измерялись при помощи высокоскоростной камеры Tecnar Accuraspray 4.0.

Для проверки механо-трибологических свойств покрытий после термической обработки было решено провести измерения микро- и нанотвердостей, а также

провести трибологические испытания на сухое трение по схеме «шар-диск» при вращательном движении. В качестве контртела использовался шар из стали 100Cr6 диаметром 6мм, нагрузка составила 10 Н, скорость вращения 5 см/сек, радиус кривизны 2 мм, длина пути трения 200 м.

Морфологию поверхностей и поперечные сечения покрытий исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU (Tescan, Чехия), оснащенного насадкой для электронного зонда для локального микроанализа: энергодисперсионным спектрометром (EDS). Фотографии были получены с использованием СЭМ как в режиме обратного рассеяния электронов (BSE), так и в режиме вторичных электронов (SE).

Результаты и обсуждения

Выбор оптимальной температуры предварительного нагрева осуществлялся путем измерения твердости подложки после термического воздействия пламенем пистолета для газопламенного напыления (Таблица 2). Замеры проводились по 15 раз в различных точках поверхности покрытий, для удобства в таблице 2 приведены среднеарифметические значения для каждого образца.

Таблица 2 – Результаты измерения твердости

Название образцов	HV		Eit/1-v^2 [a]	
	1 образец	**2 образец**	**1 образец**	**2 образец**
Initial	196.7±5.3	187.4±2.7	211.5±3.2	245.3±4.6
100	247.6±4.5	222.9±3.2	255.9±1.4	239.0±1.5
150	215.8±8.5	248.0±4.8	256.7±2.3	220.2±4.7
200	286.5±2.0	267.2±5.6	236.9±4.4	198.1±4.6
250	298.6±5.7	287.9±4.3	242.6±3.5	178.3±3.1
300	234.4±9.3	219.4±5.8	220.3±7.5	186.0±2.1

По данным таблицы 2 можно заметить, что наибольшая твердость наблюдается при температурах нагрева подложки 200, 250 ºС. При нагреве от 100 до 250 ºС наблюдается увеличение твердости за снятия внутренних напряжений вследствие низкого отпуска, при достижении 300 градусов начинается разупрочнение. Данная температура соответствует значениям проведения среднего отпуска при котором увеличивается вязкость и снижается прочность. В связи с этим оптимальным диапазоном температур был принят промежуток между 200 – 250 ºС. Проведены измерения толщины полученных покрытий в поперечном сечении; результаты представлены на рисунке 3.

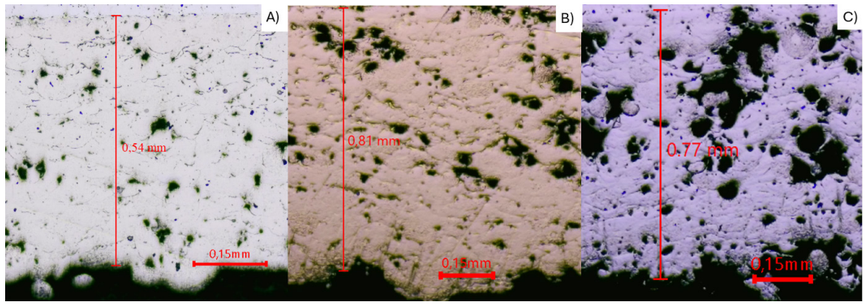


Рисунок 3 – Значения измерения толщины покрытий
а) нагрев в печи б) нагрев пистолетом с) исходное покрытие

На рисунке 3 отчетливо видно, что последующая термическая обработка значительно снижает толщину покрытий, а также уменьшается количество пор и их размер. Данная тенденция происходит ввиду более качественного сплавления частиц и заполнения расплавленным материалом пор. Однако последующий нагрев покрытий пистолетом для газопламенного напыления показал увеличение толщины. Вероятно связано это с тем, что порошок оставшийся внутри ствола и трубок продолжает налипать на уже полученное покрытие. Несмотря на это, количество пор также значительно снижается [8].

Результаты проведения морфологических исследований полученных покрытий в трех режимах последующей обработки представлены на рисунках 4–6.

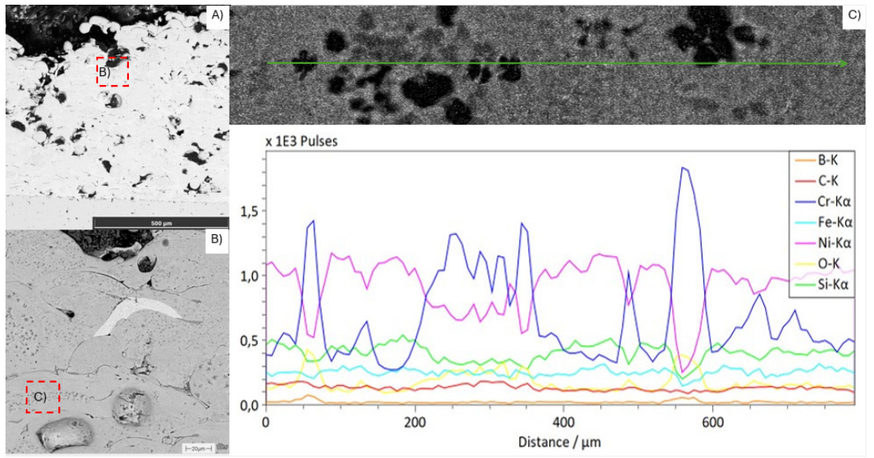


Рисунок 4 – Морфология покрытия без термического влияния:
а) общий вид покрытия b) морфология покрытия
при увеличении ×3000 с) линейный EDS анализ

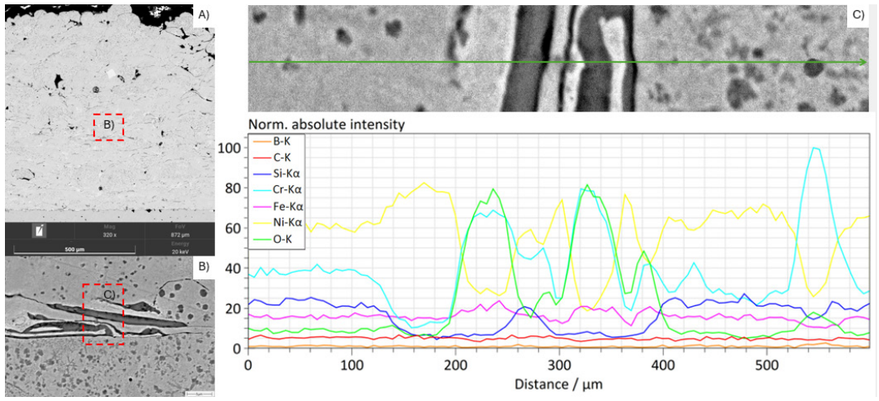


Рисунок 5 – Морфология покрытия после нагрева пистолетом для ГПН: a) общий вид покрытия b) морфология покрытия при увеличении ×3000 c) линейный EDS анализ

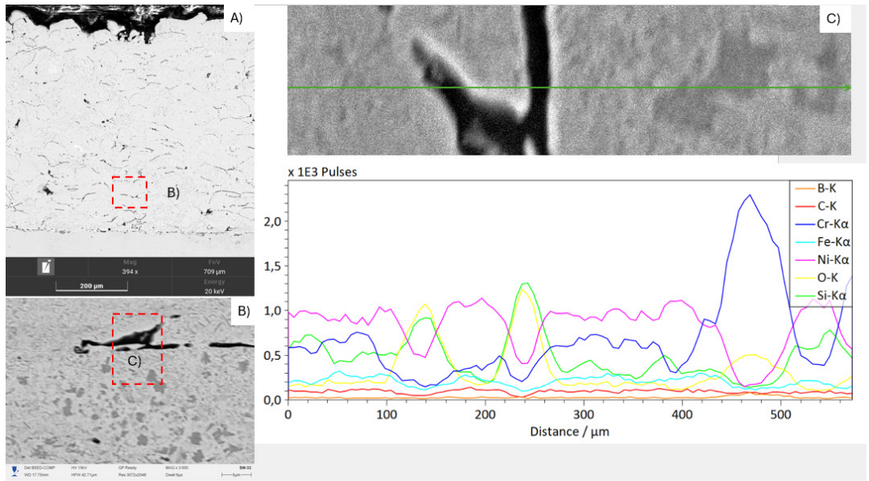


Рисунок 6 – Морфология покрытия после печи: a) общий вид покрытия b) морфология покрытия при увеличении ×3000 c) линейный EDS анализ

Отсутствие пористости и микротрещин свидетельствует о том, что выбранные в данном исследовании параметры обработки обеспечили высокое качество наплавленных покрытий. Можно отметить, что зона наплавки имеет неоднородную микроструктуру, скорее всего, из-за локальных изменений условий затвердевания.

На рисунках 4–6 можно заметить, что при напылении методом ГПН образуются хлопьеобразные оксиды хрома (Cr_2O_3). Данное соединение является желательным, так как оксид хрома способствует улучшению ряда свойств, таких как твердость,

температурная стабильность, коррозионная стойкость. Cr_2O_3 формирует плотную и стабильную пассивную плёнку, которая защищает материалы от агрессивных сред, включая кислоты и щелочи. Cr_2O_3 обладает высокой твёрдостью, что делает его эффективным компонентом в износостойких покрытиях. Cr_2O_3 сохраняет свои защитные свойства при высоких температурах, что делает его подходящим для применения в условиях термического воздействия. Эти данные подтверждаются с результатами, приведенными в статье «Wear and Corrosion Resistance of Chromium–Vanadium Carbide Coatings Produced via Thermo-Reactive Deposition» автора Fabio Castillejo. А также с данными, приведенными в «Effect of Cr_2O_3 on the microstructure and wear resistance of coatings prepared from Cr_2O_3-SiC-Al composite powders» автора Yong-gang Wang. На рисунке 6(B) видно, что помимо хлопьевидного оксида хрома образовалась структура пластинчатого оксид кремния [9;10]. Согласно данным приведенным в работе автора C. Navas под названием «Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings»: Пластинчатый кремний, улучшает смачиваемость обрабатываемой поверхности частицами расплавленного материала и обеспечивает самофлюсование материала покрытия [7].

Для испытания износостойкости покрытий были проведены трибологические исспытания. Результаты представлены на рисунке 7.

По результатам трибологических испытаний при сухом трении было установлено, что последующая термическая обработка снижает коэффициент трения, таким образом термическая обработка пистолетом и в печи снизила значение коэффициента трения в 6 раз в среднем для обоих типов обработки.

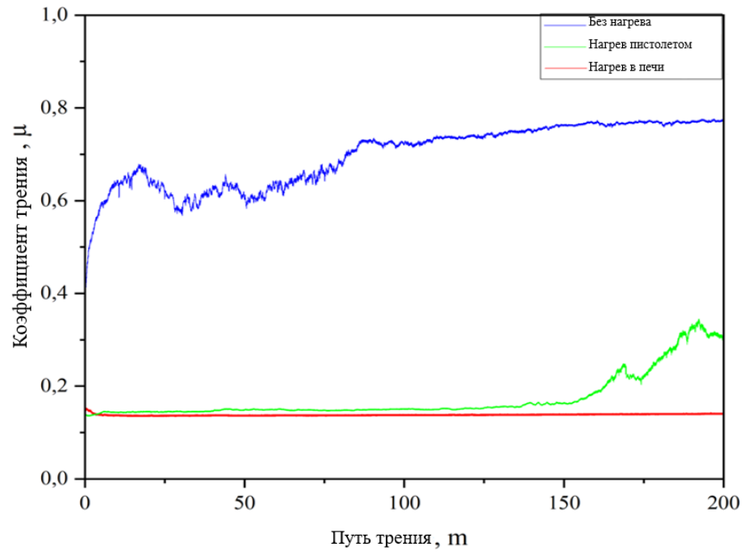


Рисунок 7 – Результаты трибологических исспытаний

Режим нагрев в печи показал самое стабильное и однородное значение коэффициента трения по всей длине трека износа. В случае с нагревом пистолетом, после прохождения отметки в 150 метров наблюдается рост значений коэффициента трения. Вероятно, данные результаты связаны с тем, что при трении и небольшом нагреве ри приближении контртела к твердым частицам, таким как бориды и карбиды, более мягкий материал матрицы, расположенный вокруг, начинает наклепываться на поверхность карбида, создавая тем самым неровности на поверхности покрытия [11]. Данный процесс описан в статье Da Silva, L. J., D'Oliveira, A. S. C. M. NiCrSiBC coatings: Effect of dilution on microstructure and high temperature tribological behavior. Тем не менее значение, коэффициента трения значительного отклонения не показало [12].

Заключение

Проведённое исследование показало, что оптимизация режимов газопламенного напыления и последующей термической обработки существенно влияет на физико-механические свойства покрытий на основе сплавов NiCrFeBSi. Предварительный нагрев подложки до 200–250 ºС способствует повышению микротвёрдости за счёт снятия внутренних напряжений. Оплавление покрытия как в печи, так и с помощью пистолета значительно снижает пористость и улучшает целостность структуры, что подтверждается морфологическими исследованиями. Кроме того, термическая обработка способствует формированию оксидных фаз (Cr_2O_3, SiO_2), положительно влияющих на износостойкость. По результатам трибологических испытаний установлено, что такие покрытия демонстрируют значительно меньший коэффициент трения, особенно при термообработке в печи. Таким образом, разработанная технология может быть рекомендована для повышения ресурса работы деталей в условиях интенсивного износа.

Финансовая поддержка. Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992876).

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992876).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Корниенко, Е. Е., Никулина, А. А., Баннов, А. Г., Кузьмин, В. И., Мильдебрах, М., Безрукова, В. А., Жойдик А. А.** Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий на основе никеля // Обработка металлов : технология, оборудование, инструменты. – 2016. – № 4 (73).

2 **Подзоров, В. Д., Харченков, В. С., Кадин, А. И.** Исследование теплопро водности газотермических покрытий Ni-Cr-B-Si // Порошковая металлургия. – 1991. – № 8. – С. 22–23.

3 **Кравченко, И. Н., Пузряков, А. Ф., Бобряшов, Е. М.** Структура никелевых покрытий, напыленных воздушным потоком плазмы // Технология металлов. – 2014. – № 6. – С. 36–38.

4 **Спиридонов, Н. В., Протасевич, В.А., Самодеева, Т. И.** Влияние лазерной обработки на структуру и триботехнические свойства плазменных покрытий из самофлюсующихся сплавов // Порошковая металлургия. – 1988. – № 1. – С. 11. 7.

5 **Кравченко, И. Н., Пузряков, А. Ф., Гладков, В. Ю., Бобряшов, Е.М.** Повышение прочности сцепления покрытий с основой совмещенной электроискровой обработкой подложки // Труды Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка: Т. 111. – М.: ГОСНИТИ. – 2013. – С. 30 – 35.

6 **Коломейченко, А. В., Кузнецов, И. С., Кравченко, И. Н.** Толщина и микротвердость покрытий из аморфных и нанокристаллических сплавов, нанесенных электроискровой обработкой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2014. – № 10. – С. 45–48.

7 **Navas, C., Colaço, R., de Damborenea, J., & Vilar, R.** Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings // Surface and Coatings Technology. – 2006. – 200(24). – С. 6854 – 6862. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.032.

8 **Kazamer, N., Valean, P., Pascal, D. T., Muntean, R., Marginean, G., Serban, V. A.** Development, optimization, and characterization of NiCrBSi-TiB2 flame-sprayed vacuum fused coatings // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 406. – P. 126747. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126747.

9 **Houdkova, S., Smazalova, E., Vostrak, M., Schubert, J.** Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 253. – P. 14–26.

10 **Da Silva, L. J., D'Oliveira, A. S.** NiCrSiBC coatings: Effect of dilution on microstructure and high temperature tribological behavior // Wear. – 2016. – Vol. 350-351. – P. 130–140.

11 **Sudha, C., Shankar, P., Rao, R. V. S., Thirumurugesan, R., Vijayalakshmi, M., Raj, B.** Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202(10). – P. 2103–2112.

12 **Miguel, J. M., Guilemany, J. M., Vizcaino, S.** Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes // Tribology International. – 2003. – Vol. 36(3). – P. 181–187.

REFERENCES

1 **Kornienko, E. E., Nikulina, A. A., Bannov, A. G., Kuz`min, V. I., Mil`debrax, M., Bezrukova, V. A., Zhojdik A. A.** Vliyanie temperatury` oplavleniya na strukturu i svojstva samoflyusuyushhixsya pokry`tij na osnove nikelya [Effect of melting

temperature on structure and properties of self-fluxing nickel-based coatings] // Obrabotka metallov: texnologiya, oborudovanie, instrumenty`. – 2016. – № 4 (73).

2 **Podzorov, V. D., Xarchenkov, V. S., Kadin, A. I.** Issledovanie teplopro vodnosti gazotermicheskix pokry`tij Ni-Cr-B-Si [Investigation of heat resistance of Ni-Cr-B-Si gas-thermal coatings] // Poroshkovaya metallurgiya. – 1991. – № 8. – P. 22–23.

3 **Kravchenko, I. N., Puzryakov, A. F., Bobryashov, E. M.** Struktura nikelevy`x pokry`tij, napy`lenny`x vozdushny`m potokom plazmy` [Structure of nickel coatings sprayed by air plasma flow] // Texnologiya metallov. – 2014. – № 6. – P. 36–38.

4 **Spiridonov, N. V., Protasevich, V. A., Samodeeva, T. I.** Vliyanie lazernoj obrabotki na strukturu i tribotexnicheskie svojstva plazmenny`x pokry`tij iz samoflyus uyushhixsya splavov [Effect of laser treatment on the structure and tribotechnical properties of plasma coatings of self-fluxing alloys] // Poroshkovaya metallurgiya. – 1988. – № 1. – P. 11. 7.

5 **Kravchenko, I. N., Puzryakov, A. F., Gladkov, V. Yu., Bobryashov, E. M.** Po vy`shenie prochnosti scepleniya pokry`tij s osnovoj sovmeshhennoj e`lek troiskrovoj obrabotkoj podlozhki [Increasing the adhesion strength of coatings with the base by combined electrospark treatment of the substrate] // Trudy` Vserossijskogo nauchno-issledovatel`skogo texnologicheskogo instituta remonta i e`kspluatacii mashinno-traktornogo parka: T. 111. – M.: GOSNITI. – 2013. – P. 30 – 35.

6 **Kolomejchenko, A. V., Kuzneczov, I. S., Kravchenko, I. N.** Tolshhina i mikrot verdost` pokry`tij iz amorfny`x i nanokristallicheskix splavov, nanesenny`x e`lektroiskrovoj obrabotkoj [Thickness and microstructure of coatings from amorphous and nanocrystalline alloys applied by electrospark treatment] // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. – 2014. – № 10. –P. 45–48.

7 Navas, C., Colaço, R., de Damborenea, J., & Vilar, R. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings // Surface and Coatings Technology. – 2006. – 200(24). – С. 6854 – 6862. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.032.

8 **Kazamer, N., Valean, P., Pascal, D.T., Muntean, R., Marginean, G., Serban, V. A.** Development, optimization, and characterization of NiCrBSi-TiB2 flame-sprayed vacuum fused coatings // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 406. – P. 126747. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126747

9 **Houdkova, S., Smazalova, E., Vostrak, M., Schubert, J.** Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 253. – P. 14–26.

10 **Da Silva, L. J., D'Oliveira, A. S.** NiCrSiBC coatings: Effect of dilution on microstructure and high temperature tribological behavior // Wear. – 2016. – Vol. 350-351. – P. 130–140.

11 **Sudha, C., Shankar, P., Rao, R. V. S., Thirumurugesan, R., Vijayalakshmi, M., Raj, B.** Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202(10). – P. 2103–2112.

12 **Miguel, J. M., Guilemany, J. M., Vizcaino, S.** Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes // Tribology International. – 2003. – Vol. 36(3). – P. 181–187.

Н. С. Райсов[1], Д. Б. Буйткенов[2], Л. Г. Сулюбаева[3], Т. Әлімбекұлы[4]
[1,2,3,4]Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

45 МАРКАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ БОЛАТ БЕТІНДЕ НИКЕЛЬ НЕГІЗІНДЕГІ ӨЗДІГІНЕН ЖАҒЫЛАТЫН ЖАБЫНДЫ ГАЗ - ЖАЛЫНДЫ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛУ

Бұл жұмыста Ni-Cr-Fe-B-Si жүйесіндегі өздігінен жағылатын никель негізіндегі жабындардың құрылымына, микроқаттылығына және трибологиялық қасиеттеріне газды-жалынды бүрку параметрлері мен кейінгі термиялық өңдеу режимдерінің әсері зерттелді. Үлгілер үшін 45 маркалы құрылымдық болат пайдаланылды. Жабындар газ-жалынды бүрку әдісімен бүркілген, одан кейін пеште және газ-жалын пистолетімен термиялық өңдеуден өткізілді. Кешенді механо-трибологиялық зерттеулер жүргізілді: микроқаттылық мәндері алынды, морфологиясы, кеуектілігі және «шар-диск» схемасы бойынша құрғақ үйкеліс жағдайындағы тозуға төзімділігі зерттелді. Алдын ала қыздырудың оңтайлы температурасы 200–250 ºС аралығында екені анықталды, бұл кезде қаптаманың ең жоғары қаттылығы мен біртектілігі қамтамасыз етіледі. Термиялық өңдеудің екі әдісі де қаптаманың кеуектілігін азайтуға, тығыздығын арттыруға және үйкеліс коэффициентін айтарлықтай төмендетуге ықпал етеді. Cr_2O_3 және SiO_2 оксидтерінің түзілуі қаптамалардың пайдалану сипаттамаларын қосымша жақсартады. Алынған мәліметтер электрондық микроскопиялық талдау, трибологиялық сынақтар нәтижелерімен расталып, шетелдік авторлардың зерттеулерімен салыстырылды. Дайындалған технология тозуға, термиялық және механикалық жүктемелерге ұшырайтын бөлшектердің қызмет мерзімін, сенімділігін және экономикалық тиімділігін арттыру үшін қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: өздігінен жағылатын қорытпалар, газ-жалынды бүрку, никель қорытпалары, NiCrFeBSi, термиялық өңдеу, 45 болат.

*N. S. Raisov[1], D. B. Buitkenov[2], L. G. Sulubaeva[3], T. Alimbekuly[4]
[1,2,3,4]Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

GAS-FLAME SPRAYING OF SELF-FLUXING NICKEL-BASED COATINGS ON THE SURFACE OF STRUCTURAL STEEL 45

In this work the influence of parameters of gas-flame spraying and subsequent heat treatment on the structure, microhardness and tribological properties of coatings based on self-fluxing nickel alloys of Ni-Cr-Fe-B-Si system was investigated. Structural steel grade 45 was used as a substrate. The coatings were applied by gas-flame spraying, after which they were subjected to thermal influence in a furnace and by a gun flame. A complex of mechano-tribological investigations was carried out: microhardness values were obtained, morphology, porosity and wear resistance were studied by dry friction method according to the scheme 'ball-disk'. It was found that the optimum temperature of substrate preheating is 200–250 ºC, at which the highest hardness and homogeneity of the coating is achieved. Both variants of heat treatment contribute to porosity reduction, increase of coating density and significant reduction of friction coefficient. The formation of Cr_2O_3 and SiO_2 oxides additionally increases the performance characteristics of the coatings. The obtained data are confirmed by the results of electron-microscopic analysis, tribological tests, as well as compared with the data given in the works of foreign authors. The developed technology can be used to increase the durability, reliability and economic efficiency of parts operated under conditions of increased wear, thermal and mechanical loads.

Keywords: self-fluxing alloys, gas-flame spraying, nickel alloys, NiCrFeBSi, heat treatment, steel 45.

МРНТИ 55.30.00
DOI

*П. М. Рахметова[1], Л. А. Курмангалиева[2],
Н. С. Сембаев[3], М. М. Жамуратова[4], Ж. С. Бигалиева[5]
[1,2,4,5]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы
[3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5645-5157
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2922-2518
[3]ORCID: https//orcid.org/0000-0003-3032-1094
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0203-2538
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7440-5591
*e-mail: p.rakhmetova@gmail.com

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МАНИПУЛЯТОРА И АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И РАСПОЗНАВАНИЯ

В этой статье представлено комплексное исследование разработки механических структур для роботизированного манипулятора, интегрированного с алгоритмами компьютерного зрения для облегчения задач управления движением и распознавания образов. Последние достижения в области интеллектуальной автоматизации подчеркивают растущую потребность в универсальных и надежных манипуляторах, способных работать в динамических средах. Предлагается модульная механическая конструкция, которая обеспечивает как ловкую манипуляцию, так и стабильную работу. Кроме того, алгоритмы на основе зрения для обнаружения, отслеживания и распознавания объектов реализуются с использованием методов машинного обучения для повышения надежности планирования и управления движением. Экспериментальные оценки показывают, что интегрированная система достигает среднего времени цикла приблизительно 4 секунды на элемент с улучшением пропускной способности примерно на 35%, сохраняя при этом среднюю ошибку отслеживания траектории менее 2°. Эти результаты подтверждают, что точное управление с обратной связью, подкрепленное обратной связью зрения в реальном времени, обеспечивает плавное и точное движение даже при изменяющихся нагрузках. Эта интеграция не только продвигает промышленную автоматизацию, но и открывает возможности для дальнейших исследований в области автономных систем обработки в рамках интеллектуальной логистики.

Ключевые слова: механические конструкции, компьютерное зрение, управление движением, распознавание образов, машинное обучение.

Введение

Быстрый рост интеллектуальной робототехники, обусловленный Индустрией 4.0 и Интернетом роботизированных вещей (IoRT), изменил современное

производство и логистику [1; 2; 3]. Роботизированные манипуляторы стали центральными для достижения гибкости, точности и эффективности в различных задачах, таких как сортировка упаковок, депаллетизация и обработка продукции [4; 5; 6]. Компьютерное зрение, при бесшовной интеграции с этими роботизированными системами, обеспечивает визуальное восприятие в реальном времени для таких задач, как распознавание объектов, отслеживание движения и принятие решений на системном уровне [7; 8].

Однако проектирование и управление манипулятором для сложных логистических задач представляют собой значительные проблемы. Во-первых, механические конструкции должны обеспечивать необходимую степень свободы и жесткости для обработки разнородных объектов, сохраняя при этом точность и скорость [9; 10]. Во-вторых, надежные системы управления движением должны включать обратную связь в реальном времени для учета непредсказуемых условий окружающей среды и эксплуатации [11; 12]. В-третьих, алгоритмы распознавания образов требуют значительной вычислительной мощности и надежной архитектуры моделей для обработки изменений в освещении, ориентации объекта и шума [13; 14].

Предыдущие исследования изучали системы манипуляторов на основе компьютерного зрения для обработки и сортировки материалов, отмечая улучшение производительности и снижение затрат на рабочую силу [4; 9; 15]. Более поздние работы исследовали использование алгоритмов управления большими данными и обнаружения объектов на основе глубокого обучения, тем самым повышая масштабируемость и гибкость таких систем [2]. Несмотря на эти достижения, сохраняются пробелы в построении целостной структуры, которая объединяет механическое проектирование, управление движением и компьютерное зрение для достижения сквозной автономности в реальных условиях [3; 10].

В этой статье устраняются эти пробелы, предлагая адаптируемую структуру механического манипулятора в сочетании с набором алгоритмов компьютерного зрения, специально оптимизированных для обнаружения объектов, отслеживания и распознавания образов. Также обсуждается подход к управлению движением, который включает в себя контуры обратной связи в реальном времени для повышения точности в различных рабочих сценариях [14].

Материалы и методы

Объектом исследования является разработка роботизированной системы манипулятора, интегрированной с алгоритмами компьютерного зрения для управления движением и распознавания образов. Методология разделена на три основных компонента: теоретические методы, аппаратные методы и программные методы. Кроме того, конструкция манипулятора контекстуализирована путем ссылки на общую классификацию манипуляторов, тем самым проясняя сделанные архитектурные выборы.

Процесс проектирования начался с вывода математической основы для движения манипулятора. Были разработаны модели прямой и обратной кинематики для сопоставления конфигураций суставов с декартовыми координатами конечного

эффектора. Эти модели обеспечили основу для планирования траектории, гарантируя точный перевод движений суставов в пространственные манипуляции [4; 9]. Динамическая модель манипулятора была создана с использованием механики Лагранжа для учета инерции, трения и гравитационных сил. Стратегия управления включала пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) контроллеры и модельно-предиктивное управление (MPC) для отслеживания траектории. Анализ устойчивости, основанный на функциях Ляпунова, был выполнен для проверки того, что замкнутая система поддерживала надежную работу даже при наличии возмущений [1; 12]. На рисунке 1 показана схема управления высокого уровня, в которой ошибка положения (s) обрабатывается пропорциональным контроллером. Подход Camera Space Manipulation (CSM) преобразует этот управляющий сигнал в команды скорости в системе координат камеры. В частности, блок «Velocity CSM» интерпретирует желаемые позиционные обновления в пространстве изображения, преобразуя их в опорные скорости для манипулятора.

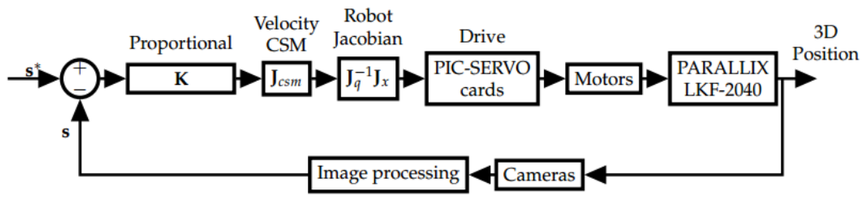


Рисунок 1 – Схема управления на основе скорости с помощью Camera Space Manipulation [15]

Система привода использует карты PIC-SERVO для приведения в действие двигателей, а модуль PARALLIX LKF-2040 обеспечивает трехмерную позиционную обратную связь. Одновременно камеры захватывают изображения в реальном времени, которые обрабатываются для измерения фактического положения манипулятора. Эта обратная связь на основе изображения используется для уточнения контура управления, минимизации позиционной ошибки и обеспечения точного отслеживания конечного исполнительного органа желаемой траектории.

Эта теоретическая структура управления гарантирует, что как команды движения, так и обратная связь от датчиков будут правильно интегрированы. Этап пропорционального управления быстро компенсирует позиционные ошибки, в то время как обратная связь на основе зрения предлагает детальные обновления фактической позы манипулятора в реальном времени [5;6]. Анализ конечных элементов был выполнен на критических структурных элементах для прогнозирования распределения напряжений и деформации в условиях максимальной нагрузки. Данный анализ способствует выбору материалов и

окончательных параметров конструкции, гарантируя способность манипулятора выдерживать высокие нагрузки при сохранении точности [9; 10].



Рисунок 2 – Классификация манипуляторов

При разработке аппаратного обеспечения рассматривалась более широкая классификация манипуляторов для выбора наиболее подходящей конфигурации для поставленных задач. Классификация манипуляторов используемые в промышленности приведена на рисунке 2.

Последовательные манипуляторы состоят из ряда звеньев, соединенных шарнирами, что обеспечивает широкий диапазон движения, тогда как параллельные манипуляторы имеют замкнутые кинематические цепи, которые часто обеспечивают большую жесткость, но уменьшенное рабочее пространство. Манипуляторы с жесткими структурами обычно предназначены для задач, требующих высокой жесткости и грузоподъемности.

Для этого исследования была выбрана конструкция последовательного манипулятора с 6DoF(степенями свободы). Эта конфигурация соответствует распространенным архитектурам промышленных роботов и обеспечивает оптимальный баланс гибкости, точности и простоты управления [4; 5].Конструкция была итеративно усовершенствована с использованием инструментов автоматизированного проектирования с изменениями(Рисунок 3), полученными на основе результатов анализа конечных элементов [4; 11]. Высокоточные серводвигатели приводили в движение сочленения манипулятора, в то время как датчики силы/крутящего момента и инерциальные измерительные блоки (IMU) предоставляли данные в реальном времени об условиях нагрузки и ориентации. Концевой исполнительный орган был оснащен сменными захватами, что позволяло ему обрабатывать широкий спектр объектов, от грузов на поддонах до хрупких компонентов [1; 5].

Камеры высокого разрешения были установлены для захвата рабочего пространства манипулятора, а вспомогательное освещение и датчики окружающей

среды смягчали изменяющиеся условия окружающей среды. В дополнение к стандартным устройствам визуализации были включены эндоскопические камеры для специализированных задач, требующих визуального осмотра в ограниченных или труднодоступных местах. Эти миниатюрные, часто с гибким валом камеры обеспечивают виды с высоким разрешением с точек обзора, недоступных для стандартных внешних камер, тем самым улучшая общие возможности зрения системы. Такое расположение оказывается ценным для детальных внутренних осмотров, детальных исследований механических деталей и других точных задач в ограниченных условиях [2; 6].

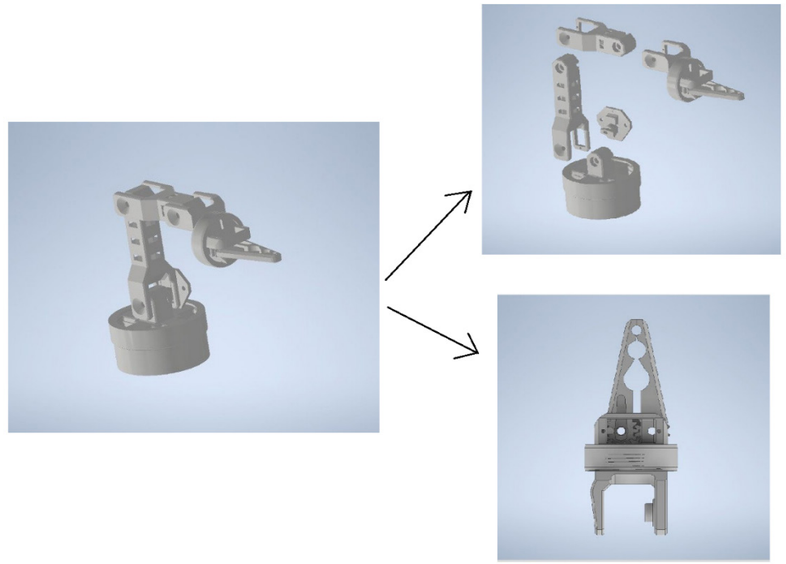


Рисунок 3 –Модель механической конструкции манипулятора

Программный уровень системы объединяет передовые подходы ИИ для машинного зрения и машинного обучения, комплексная система компьютерного (машинного) зрения и иерархическую структуру управления движением, все координируется операционной системой реального времени(Рисунок 4) [16].

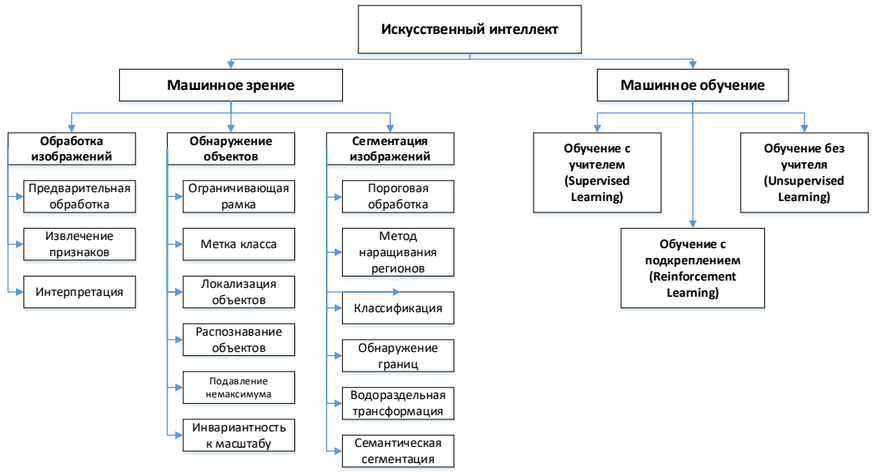


Рисунок 4 – Этапы работы компьютерного (машинного) зрения [16]

Необработанные изображения с камер высокого разрешения и эндоскопических камер сначала предварительно обрабатываются с помощью фильтров нормализации и шумоподавления, а области интереса динамически идентифицируются для целенаправленного анализа. Модели машинного и глубокого обучения, включая сверточные нейронные сети (CNN) и архитектуры на основе компьютерного зрения, используются для надежного обнаружения и классификации объектов в реальном времени даже в сложных условиях. Алгоритмы отслеживания нескольких объектов, использующие такие методы, как фильтрация Калмана и частиц, объединяют визуальные и инерциальные данные для поддержания согласованных оценок поз меток, реализованных с использованием библиотек OpenCV. На уровне управления высокоуровневый планировщик генерирует траектории без столкновений, используя такие алгоритмы, которые затем преобразуются контроллером среднего уровня в профили скорости и ускорения, специфичные для суставов, с помощью схем PID. Интерфейс активации низкого уровня гарантирует, что команды двигателя выполняются точно с помощью высокочастотной обратной связи энкодера, что позволяет системе настраиваться в реальном времени [17].

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемые механические структуры для манипулятора 6DoF, интегрированные с алгоритмами компьютерного зрения, успешно достигают точного и эффективного управления движением, а также надежного распознавания образов. Как показано на рисунке 5, запланированная траектория (пунктирная синяя линия) близко соответствует фактической траектории (сплошная красная линия), демонстрируя минимальные отклонения и среднюю ошибку отслеживания ниже 2°. Эта высокая степень

точности в значительной степени объясняется обратной связью в реальном времени, установленной между контроллерами сочленений манипулятора и системой обнаружения на основе зрения, что позволяет быстро корректировать каждый раз, когда возникают расхождения. В свою очередь, манипулятор достигает постоянно короткого времени цикла — приблизительно 4 секунды на элемент — что приводит к улучшению пропускной способности примерно на 35% по сравнению с обычными установками.

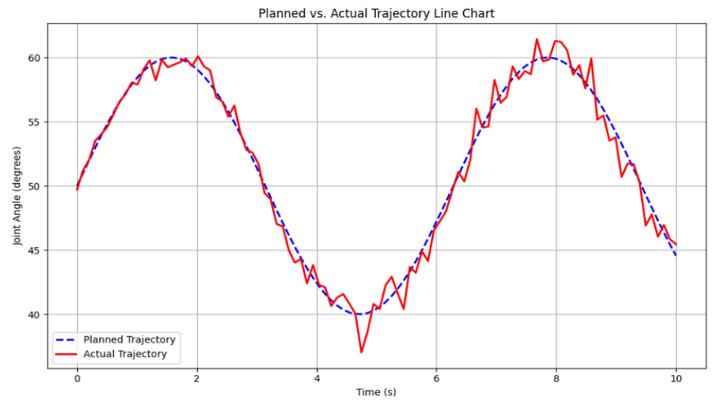


Рисунок 5 – Сравнительный анализ траектории

Более того, рисунок 6 иллюстрирует диапазон движения манипулятора в трехмерной среде, подчеркивая его способность маневрировать по шести степеням свободы, сохраняя при этом структурную устойчивость. Анализ конечных элементов и нагрузочные испытания подтвердили, что сочленения и рабочий орган манипулятора могут выдерживать эксплуатационные нагрузки без ущерба для точности позиционирования. В сочетании с модулями обнаружения объектов и распознавания образов на основе глубокого обучения система эффективно идентифицирует и отслеживает цели даже в загроможденных или динамических средах.

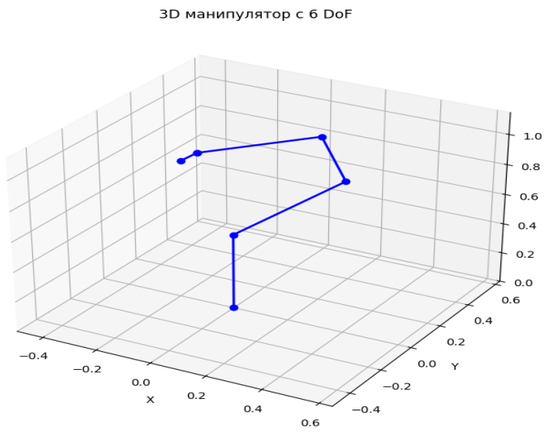


Рисунок 6 – Трехмерное моделирование
траектории движения манипулятора

В целом, эти результаты подтверждают, что интегрированная конструкция, охватывающая механическую прочность, расширенное управление движением и конвейер восприятия на основе зрения, может значительно повысить эксплуатационную эффективность и надежность в промышленных приложениях, таких как автоматизированный сбор, сортировка и сборка.

Результаты подтверждают жизнеспособность интеграции механической прочности и передового компьютерного зрения для автономных роботизированных манипуляций в логистике. Эти результаты перекликаются с предыдущими исследованиями, подчеркивающими преимущества интеллектуальных манипуляторов в оптимизации обработки материалов и сокращении трудоемких задач 4n, 9n, 3n. Однако вычислительные издержки систем обнаружения и отслеживания на основе глубокого обучения остаются ограничением, особенно для сценариев периферийных вычислений [8; 13].

В дополнение к вышеуказанным результатам полученный патент [18] представляет полезную модель, которая еще больше совершенствует систему управления для мобильных роботов-манипуляторов. Предлагаемая полезная модель заключается в создании улучшенной системы управления для мобильного робота-манипулятора, которая включает две системы компьютерного зрения и использует двух мобильных роботов для повышения точности и эффективности манипулятора в сложных условиях. Первая система компьютерного зрения регистрирует отклонения калибровочного инструмента после позиционирования рабочего элемента манипулятора, используя цифровую обработку видеоданных для анализа положения инструмента относительно заданной точки в системе координат, связанной с основанием первого мобильного робота. Вторая система компьютерного зрения расположена на втором мобильном роботе, который может двигаться независимо от первого. Она служит для отслеживания объектов,

которые недоступны для первой системы, но доступны для манипулятора, что позволяет расширить рабочую зону и повысить адаптивность системы. Кроме того, манипулятор управляется с помощью блока управления на основе нейронной сети, обученного методом обратного распространения, что обеспечивает адаптацию в реальном времени. Программное обеспечение для обработки изображений выделяет объекты и препятствия, тем самым улучшая навигацию и координацию между двумя роботами и обеспечивая более точное выполнение задач. Включение этого подхода с двумя системами и использование управления на основе нейронной сети представляет собой значительную инновацию, предлагающую потенциальные улучшения в устойчивости системы и эксплуатационной гибкости по сравнению с традиционными конструкциями с одной системой.

Хотя наша конструкция механической структуры рассчитана на различные полезные нагрузки и геометрии, для некоторых узкоспециализированных задач могут потребоваться специальные конечные исполнительные органы или дополнительные датчики для стабильной работы [4;11]. Развертывание в реальных средах также требует устранения уязвимостей кибербезопасности в сетевых системах и обеспечения устойчивости системы к атакам со стороны противника [17]. Будущие исследования могут быть сосредоточены на оптимизированных моделях глубокого обучения для более быстрого вывода на оборудовании с ограниченными ресурсами [8; 15]; усовершенствованном слиянии датчиков, включающем LiDAR, тепловизионные изображения или датчики глубины [2, 6]; схемах адаптивного управления, которые используют обучение с подкреплением для адаптации к быстро меняющимся производственным линиям [13;15].

Этот комплексный подход, который теперь включает идеи из полученного патента [18], прокладывает путь для следующего поколения мобильных роботизированных систем в интеллектуальной логистике и сложных промышленных приложениях.

Выводы

В этой работе мы представили системный подход к разработке надежного роботизированного манипулятора, интегрированного с конвейером компьютерного зрения для управления движением и распознавания образов. Модульная механическая конструкция манипулятора обеспечивает универсальные возможности обработки, в то время как алгоритмы обнаружения и отслеживания на основе зрения обеспечивают высокую точность и адаптивность в загроможденных или динамических рабочих контекстах. Реальное моделирование подчеркивает потенциал системы для значительного повышения пропускной способности в условиях интеллектуальной логистики. Наши исследования закладывают основу для будущих инноваций в автономных системах обработки, расширяя сферу применения робототехники в сложных промышленных и коммерческих средах.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP22685781).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Y. Liu, X. Tao, X. Li, A. W. Colombo and S. Hu.** Artificial Intelligence in Smart Logistics Cyber-Physical Systems: State-of-The-Arts and Potential Applications [Text] // IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems. – 2023. – № 1. – P. 1–20. [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10144647.

2 **Andronie, Mihai, George Lăzăroiu, Mariana Iatagan, Iulian Hurloiu, Roxana Ştefănescu, Adrian Dijmărescu, and Irina Dijmărescu.** Big Data Management Algorithms, Deep Learning-Based Object Detection Technologies, and Geospatial Simulation and Sensor Fusion Tools in the Internet of Robotic Things [Text] // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2023. – № 2(35). – https://doi.org/10.3390/ijgi12020035.

3 **A. Gul Fareed, F. DeFelice, A. Forcina, A. Petrillo.** Role and applications of advanced digital technologies in achieving sustainability in multimodal logistics operations: A systematic literature review [Text] // Sustainable Futures. – 2024. – https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100278.

4 **Z. Pan, Z. Jia, K. Jing, Y. Ding and Q. Liang.** Manipulator Package Sorting and Placing System Based on Computer Vision [Text] // Chinese Control And Decision Conference (CCDC) . – 2020. – P. 409–414. [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9164071?casa_token=jfIBQegnGfMAAAAA:7Q9kr1xwieJByuUtX4EVY2fYvWoEkr42Xn9sR5rxtaFM19xnqVdlK2bnJEjFDc2mYmVyZJiF4iKJnVc

5 **Emmanuel A. Oyekanlu, Alexander C. Smith, Windsor P. Thomas, Grethel Mulroy, Dave Hitesh, Matthew Ramsey.** A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Integration challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications [Text] // IEEE access. – 2020. – № 8. – P. 202312–202353. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9247159.

6 **Aleotti J, Baldassarri A, Bonfè M, Carricato M, Chiaravalli D, Di Leva R, Fantuzzi C, Farsoni S, Innero G, Lodi Rizzini D.** Toward Future Automatic Warehouses : An Autonomous Depalletizing System Based on Mobile Manipulation and 3D Perception [Text] // Applied Sciences. – 2021. –№ 11(13). – https://doi.org/10.3390/app11135959

7 **Lu Yang, Raman Kumar, Rupinder Kaur, Atul Babbar, Gurfateh Singh Makhanshahi, Arshpreet Singh, Raman Kumar, Abhijit Bhowmik & Ahmed Hussien Alawadi.** Exploring the role of computer vision in product design and development : a comprehensive review [Text] // Int JInteract Des Manuf . – 2024. – № 18. – P. 3633–3680. – https://doi.org/10.1007/s12008-024-01765-7.

8 **C. Chen, B. Liu, S. Wan, P. Qiao and Q. Pei.** An Edge Traffic Flow Detection Scheme Based on Deep Learning in an Intelligent Transportation System [Text] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems – 2021. – №22(3). – P. 1840–1852. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9210731?casa_token=OK4G0Zee3GcAAAAA:lrYJ0VOe-grGbDM_VJBUWYhoTILxP0TLHmSfK3Z-iMr8D8nhNuKtqnPboX-UrlKVktz9Mvkp8wbFf9g

9 **Muhammad Zia Ur Rahman, Muhammad Usman, Adhban Farea, Nasir Ahmad, Imran Mahmood, Muhammad Imran.** Vision-Based Mobile Manipulator for Handling and Transportation of Supermarket Products [Text] // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. [Electronic resource]. – https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/3883845

10 **Ghodsian, Nooshin, Khaled Benfriha, Adel Olabi, Varun Gopinath, and Aurélien Arnou.** Mobile Manipulators in Industry 4.0 : A Review of Developments for Industrial Applications [Text] // Sensors. – 2023. – № 23(19). – [Electronic resource]. – https://doi.org/10.3390/s23198026.

11 **Tadić, Snežana, Mladen Krstić, Svetlana Dabić-Miletić, and Mladen Božić.** Smart Material Handling Solutions for City Logistics Systems [Text] //Sustainability. – 2023. – № 15(8). – https://doi.org/10.3390/su15086693

12 **Hai-WuLee.** Research on multi-functional logistics intelligent Unmanned Aerial Vehicle[Text] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2022. – 116. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105341

13 **S. Wang, Z. Pei, C. Wang and J. Wu.** Shaping the Future of the Application of Quantum Computing in Intelligent Transportation System[Text]//Intelligent and Converged Networks. – 2021. – № 2(4). – P. 259–276. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9733245

14 **T. Wang, J. Cheng, Y. Yang, C. Esposito, H. Snoussi and F. Tao.** Adaptive Optimization Method in Digital Twin Conveyor Systems via Range-Inspection Control [Text] // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2022. – № 19(2). – P. 1296–1304. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9303438?casa_token=GdzE0mw47rEAAAAA:8OuNW_VGJG2kwoq44qGjiRsCYZka_y0CKuTsOLYSg2CDgmYNEQ-AZ0QpE472fEvHzEAiPM1omv6dbS8

15 **E. Poornima, BalaAnand Muthu, Ruchi Agrawal, S. Pradeep Kumar, Mallika Dhingra, Renas Rajab Asaad & Awais Khan Jumani.** Fog robotics-based intelligence transportation system using line-of-sight intelligent transportation [Text] // MultimedToolsAppl. – 2023. – https://doi.org/10.1007/s11042-023-15086-6

16 **Рахметова, П., Исабеков, З., Жамуратова, М., Байтурганова, В.** Моделирование систем компьютерного зрения с искусственным интеллектом [Text] // Вестник КазАТК. – 2024. – №134(5). – С. 393–402. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-393-402

17 **Y. Cui and D. Lei.** Design of Highway Intelligent Transportation System Based on the Internet of Things and Artificial Intelligence [Text] // IEEE Access. – 2023. – № 11. – P. 46653–46664. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/document/10122968

18 Патент на Полезную модель. Система управления манипулятором мобильного робота [Text] / Рахметова П. И. Охранный документ. – 2024. – № 6 (10165).

REFERENCES

1 **Y. Liu, X. Tao, X. Li, A. W. Colombo and S. Hu.** Artificial Intelligence in Smart Logistics Cyber-Physical Systems: State-of-The-Arts and Potential Applications [Text] // IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems. – 2023. – № 1. – P. 1–20. [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10144647.

2 **Andronie, Mihai, George Lăzăroiu, Mariana Iatagan, Iulian Hurloiu, Roxana Ştefănescu, Adrian Dijmărescu, and Irina Dijmărescu.** Big Data Management Algorithms, Deep Learning-Based Object Detection Technologies, and Geospatial Simulation and Sensor Fusion Tools in the Internet of Robotic Things [Text] // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2023. – № 2(35). – https://doi.org/10.3390/ijgi12020035.

3 **A. Gul Fareed, F. DeFelice, A. Forcina, A. Petrillo.** Role and applications of advanced digital technologies in achieving sustainability in multimodal logistics operations: A systematic literature review [Text] // Sustainable Futures. – 2024. – https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100278.

4 **Z. Pan, Z. Jia, K. Jing, Y. Ding and Q. Liang.** Manipulator Package Sorting and Placing System Based on Computer Vision [Text] // Chinese Control And Decision Conference (CCDC) . – 2020. – P. 409–414. [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9164071?casa_token=jfIBQegnGfMAAAAA:7Q9kr1xwieJByuUtX4EVY2fYvWoEkr42Xn9sR5rxtaFM19xnqVdlK2bnJEjFDc2mYmVyZJiF4iKJnVc

5 **Emmanuel A. Oyekanlu, Alexander C. Smith, Windsor P. Thomas, Grethel Mulroy, Dave Hitesh, Matthew Ramsey.** A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Integration challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications [Text] // IEEE access. – 2020. – № 8. – P. 202312–202353. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9247159.

6 **Aleotti J, Baldassarri A, Bonfè M, Carricato M, Chiaravalli D, Di Leva R, Fantuzzi C, Farsoni S, Innero G, Lodi Rizzini D.** Toward Future Automatic Warehouses : An Autonomous Depalletizing System Based on Mobile Manipulation and 3D Perception [Text] // Applied Sciences. – 2021. –№ 11(13). – https://doi.org/10.3390/app11135959

7 **Lu Yang, Raman Kumar, Rupinder Kaur, Atul Babbar, Gurfateh Singh Makhanshahi, Arshpreet Singh, Raman Kumar, Abhijit Bhowmik & Ahmed Hussien Alawadi.** Exploring the role of computer vision in product design and development : a comprehensive review [Text] // Int JInteract Des Manuf . – 2024. – № 18. – P. 3633–3680. – https://doi.org/10.1007/s12008-024-01765-7.

8 **C. Chen, B. Liu, S. Wan, P. Qiao and Q. Pei.** An Edge Traffic Flow Detection Scheme Based on Deep Learning in an Intelligent Transportation System [Text] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems – 2021. – №22(3). – P. 1840–1852. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9210731?casa_token=OK4G0Zee3GcAAAAA:lrYJ0VOe-grGbDM_VJBUWYhoTILxP0TLHmSfK3Z-iMr8D8nhNuKtqnPboX-UrlKVktz9Mvkp8wbFf9g

9 **Muhammad Zia Ur Rahman, Muhammad Usman, Adhban Farea, Nasir Ahmad, Imran Mahmood, Muhammad Imran.** Vision-Based Mobile Manipulator for Handling and Transportation of Supermarket Products [Text] // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. [Electronic resource]. – https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/3883845

10 **Ghodsian, Nooshin, Khaled Benfriha, Adel Olabi, Varun Gopinath, and Aurélien Arnou.** Mobile Manipulators in Industry 4.0 : A Review of Developments for Industrial Applications [Text] // Sensors. – 2023. – № 23(19). – [Electronic resource]. – https://doi.org/10.3390/s23198026.

11 **Tadić, Snežana, Mladen Krstić, Svetlana Dabić-Miletić, and Mladen Božić.** Smart Material Handling Solutions for City Logistics Systems [Text] //Sustainability. – 2023. – № 15(8). – https://doi.org/10.3390/su15086693

12 **Hai-WuLee.** Research on multi-functional logistics intelligent Unmanned Aerial Vehicle[Text] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2022. – 116. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105341

13 **S. Wang, Z. Pei, C. Wang and J. Wu.** Shaping the Future of the Application of Quantum Computing in Intelligent Transportation System[Text]//Intelligent and Converged Networks. – 2021. – № 2(4). – P. 259–276. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9733245

14 **T. Wang, J. Cheng, Y. Yang, C. Esposito, H. Snoussi and F. Tao.** Adaptive Optimization Method in Digital Twin Conveyor Systems via Range-Inspection Control [Text] // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2022. – № 19(2). – P. 1296–1304. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9303438?casa_token=GdzE0mw47rEAAAAA:8OuNW_VGJG2kwoq44qGjiRsCYZka_y0CKuTsOLYSg2CDgmYNEQ-AZ0QpE472fEvHzEAiPM1omv6dbS8

15 **E. Poornima, BalaAnand Muthu, Ruchi Agrawal, S. Pradeep Kumar, Mallika Dhingra, Renas Rajab Asaad & Awais Khan Jumani.** Fog robotics-based intelligence transportation system using line-of-sight intelligent transportation [Text] // MultimedToolsAppl. – 2023. – https://doi.org/10.1007/s11042-023-15086-6

16 **Rakhmetova, P., Issabekov, Z., Zhamuratova, M., Baiturganova V.** Modelirovanie system comp'iuternogo zreniya s iskusstvennym intellectom [Simulation ofcomputer vision systems with artificial intelligence] [Text] // The Bulletin of KazATC. – 2024. – № 134 (5). – P. 393–402. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-393-402

17 **Y. Cui and D. Lei.** Design of Highway Intelligent Transportation System Based on the Internet of Things and Artificial Intelligence [Text] // IEEE Access. – 2023. – № 11. – P. 46653–46664. – [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/document/10122968

18 Patent napoleznuiy model'. Systema upravleniya manipul'iatorom mobil'nogo robota [Control system for mobile robot manipulator] [Text] / Rakhmetova P.M. Ohranniy dokument. – 2024. – № 6 (10165).

***П. М. Рахметова[1], Л. А. Курмангалиева[2],**
Н. С. Сембаев[3], М. М. Жамуратова[4], Ж. С. Бигалиева[5]
[1,2,4,5]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[3]Торайғыровуниверситеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ҚОЗҒАЛЫСТЫ БАСҚАРУ ЖӘНЕ ТАНУ ҮШІН МАНИПУЛЯТОРДЫҢ ЖОБАСЫН ЖӘНЕ КОМПЬЮТЕРДІҢ КӨРУ АЛГОРИТМІН ӘЗІРЛЕУ

Мақала қозғалысты басқару және үлгіні тану тапсырмаларын жеңілдету үшін компьютерлік көру алгоритмдерімен біріктірілген роботты қолдың механикалық құрылымдарын әзірлеу бойынша кешенді зерттеуді ұсынады. Интеллектуалды автоматтандырудағы соңғы жетістіктер динамикалық ортада жұмыс істей алатын жан-жақты және сенімді манипуляторларға деген өсіп келе жатқан қажеттілікті көрсетеді. Модульдік механикалық дизайн ұсынылады, ол епті манипуляцияны да, тұрақты жұмысты да қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, қозғалысты жоспарлау мен басқару сенімділігін арттыру үшін машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы нысанды анықтау, қадағалау және тану үшін көру негізіндегі алгоритмдер жүзеге асырылады. Эксперименттік бағалаулар біріктірілген жүйенің орташа траекторияны қадағалау қателігін 2°-тан аз сақтай отырып, өткізу қабілетін шамамен 35% жақсартумен бір элемент үшін шамамен 4 секунд цикл уақытына қол жеткізетінін көрсетеді. Бұл нәтижелер нақты уақыттағы көру кері байланысымен қамтамасыз етілген нақты жабық циклды басқару өзгермелі жүктемелер кезінде де тегіс және дәл қозғалысты қамтамасыз ететінін растайды. Бұл интеграция өнеркәсіптік автоматтандыруды ілгерілетіп қана қоймайды, сонымен қатар интеллектуалды логистика аясында автономды өңдеу жүйелері саласындағы одан әрі зерттеулерге мүмкіндіктер ашады.

Кілтті сөздер: механикалық құрылымдар, компьютерлік көру, қозғалысты басқару, үлгіні тану, машиналық оқыту.

***P. M. Rakhmetova[1], L. A. Kurmangaliyeva[2],**
N. S. Sembayev[3], M. M. Zhamuratova[4], Zh. S. Bigalieva[5]
[1,2,4,5]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty
[3]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

DEVELOPMENT OF A MANIPULATOR DESIGN AND COMPUTER VISION ALGORITHMS FOR MOTION CONTROL AND RECOGNITION

This paper presents a comprehensive study on the development of mechanical structures for a robotic manipulator integrated with computer vision algorithms to facilitate motion control and pattern recognition tasks. Recent advances in intelligent automation highlight the growing need for versatile and robust manipulators capable of operating in dynamic environments. A modular mechanical design that enables both dexterous manipulation and stable operation is proposed. In addition, vision-based algorithms for object detection, tracking, and recognition are implemented using machine learning techniques to improve the robustness of motion planning and control. Experimental evaluations show that the integrated system achieves an average cycle time of approximately 4 seconds per element with an improvement in throughput of approximately 35% while maintaining an average trajectory tracking error of less than 2°. These results confirm that precise closed-loop control supported by real-time vision feedback enables smooth and accurate motion even under varying loads. This integration not only advances industrial automation, but also opens up opportunities for further research in the field of autonomous handling systems within the framework of intelligent logistics.

Keywords: mechanical structures, computer vision, motion control, pattern recognition, machine learning.

ҒТАМР 65.63.01
DOI

Н. О. Тусипов[1], Б. Б. Кабулов[2], *Г. Б. Абдилова[3],
А. Л. Касенов[4], Г. Н. Конарбаева[5]
[1,2,3]Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.
[4]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[5]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6990-6631
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7619-2622
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6647-6314
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7715-1128
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2934-972X
*e-mail: abdilova1979@bk.ru

ПОЛИДИСПЕРСТІ МАТЕРИАЛДАРДЫ КЕПТІРУГЕ АРНАЛҒАН ҚОНДЫРҒЫНЫ ЖАСАУ

Мақалада полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының жасалуы қарастырылады. Кептіру агентін пайдалану тиімділігін арттыру, камера ішінде тоқырау аймақтарының пайда болуын жою, өнім бірлігіне шаққандағы энергия шығынын азайту, бөлшектердің агломерациясын жою және кептірілген материалдың жоғалуын азайту мақсатында полидисперсті материалдарға арналған кептіргіштің жаңа құрылмасы жасалды. Мақалада полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының құрылмасы мен жұмыс істеу принципі сипатталған. Қондырғының құрылмасында орақ тәріздес саптамалар, біліктер, құйынды камера, материалды тиеуге арналған құрылғы, тангенциалды келтеқұбырлар және т.б. бар. Қондырғының жұмыс істеу принципі кептіргіш агент қысымының әсерінен ұсақталған материалды және құйынды камерадағы кинетикалық энергияны тұрақты жалған сұйылу режимінде кептіру болып табылады. Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғыны пайдалана отырып, өнімнің ылғалдылығын зерттеу бойынша алдын ала сынақтар жүргізілді. Ылғалдылықтың өзгеру кестелері, кептіру қисықтары және майлылығы 2% сүзбені кептіру жылдамдығының қисықтары алынды. Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғыны инженерлік есептеу әдістемесі әзірленді. Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғыны қолдану нәтижесінде кептіру процесін қарқындатуға, тұрақты жалған сұйылу режимін құруға, өнімді біркелкі кептіруді қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Қондырғыны жоғары температураның ұзақ әсер етуін қажет етпейтін термолабилді материалдарды кептіру үшін пайдалануға болады. Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының құрылмасын жасау кезінде сұйытылған қабаттың гетерогенділігі аппараттың тұрақсыз жұмыс істеуіне жағдай туғызатынын, полидисперсті материалдар қабатындағы қысымның жоғалуы қабаттың биіктігіне қарай сызықты түрде артатынын, газ тарату торының айтарлықтай кедергісі бар екенін ескеру қажет. Сондықтан тиімді гидродинамикалық жағдайды қамтамасыз ету үшін кептірілетін материалды араластыратын, жоғарыда аталған жағымсыз факторлардың әсерін төмендететін және жалған сұйылу қабатында кептіруді күшейтуге ықпал ететін қопсытқышты газтарату торы жоқ қондырғыларды қолдану керек.

Кілтті сөздер: жасау, процесс, қондырғы, кептіру, полидисперсті материал, жалған сұйылу.

Кіріспе

Қайнаған қабаттың жалған сұйылу қасиеттеріне байланысты дисперсті қатты фазаны өңдеу кезінде қондырғының оңтайлы құрылмасын таңдауға немесе жасауға икемді түрде қарауға мүмкіндік береді. Кептіру қондырғыларының құрылмалық нұсқаларының көптігі оларды жіктеуді қиындатады.

Гидродинамикалық белгісі бойынша цилиндр пішінді қайнаған қабатты қондырғылар, бұрқақ тәріздес қабаты бар конусты қондырғылар, құйын тәріздес қабатты, қайнаған қабатты және жергілікті бұрқақтау деп ажыратылады [1, 941-949-бб.].

Ерітіндіні беру тәсіліне (қондырғыдағы форсункалардың орналасуына) немесе шикі материалды кептіруге беру әдісіне қарай қондырғылар мынадай түрлерге: қабаттың үстінен енгізілетін, тор деңгейінде қабаттың астынан енгізілетін, қабатқа жанынан енгізілетін болып бөлінеді. Дисперсті өнімді шығару тордың жанынан, ортасындағы тор арқылы, қабаттың айна бетінен жанынан немесе қондырғы шегінен тыс «шығару» жолымен жүзеге асырылуы мүмкін.

Жылу беру тәсіліне байланысты қондырғы құрылмасы келесідей түрлерге бөлуге болады: тек жалған сұйылу агенті арқылы; қыздырылған шашыратылатын ерітінді арқылы жылу берілетін және кондуктивті - қабат ішіндегі жылуалмастырғыш арқылы жылу берілетін қондырғылар.

Бұдан бөлек, құрылмалық жағынан қайнаған қабатты қондырғылар бір камералы немесе көп камералы, көлденең не тік орналасқан бірнеше секциядан тұратын көп секциялы камера түрінде, сондай-ақ аралас (комбинирленген) қондырғылар түрінде орындалуы мүмкін [2; 3; 4; 5; 6; 7].

Ұсынылған жіктеулер бұл кептіру әдісінің құрылмалық мүмкіндіктерінің алуан түрлілігі туралы белгілі бір түсінік береді.

Қайнау қабатты қондырғылар құрылмаларының әртүрлілігі оларды қолдану мақсаттары мен қолданылу салаларының әр алуандығынан да туындайды. Бұл қондырғылар тамақ, химия, мұнай және газ өнеркәсібінде, металлургияда, энергетикада және басқа да салаларда кеңінен қолданылатындықтан, қайнаған қабатты қондырғыларда жүретін процестердің (механикалық, физикалық, физика-химиялық және т.б.) ауқымы да соншалықты кең екені табиғи жағдай.

Мысалы, механикалық процестерге қатты түйіршікті материалдардың көлденең және тік бағытта орын ауыстыруы; түйіршікті материалдарды араластыру немесе керісінше, оларды өлшемі мен тығыздығына қарай бөлу (сепарация) жатады.

Физикалық процестерге мыналар: қыздыру және салқындату; түйіршікті материалдарды кептіру; газдарды құрғату; әртүрлі сіңіру (сорбция) және шығару (десорбция) процестері; ерітінділерден массалық кристалдану; қатты материалдарды еріту және экстракциялау; балқымаларды түйіршіктеу және т.б. кіреді.

Физика-химиялық процестерге каталитикалық гетерофазалық процестерді; отынды немесе басқа да қатты жанғыш материалдарды жағу және газификациялау; экзотермиялық және эндотермиялық, сондай-ақ басқа да технологиялық процестерді жатқызуға болады.

Жоғарыда айтылғандардың негізінде қондырғыларды да, олардың ішінде жүзеге асатын процестерді де жіктеу белгілі бір дәрежеде шартты екенін байқауға болады, себебі әдетте бір қондырғыда бір мезгілде бірнеше түрлі процесс қатар жүреді.

Тәжірибеде қатты фаза бойынша үздіксіз де, мерзімді процестер де кеңінен қолданылады. Мұнда маңыздысы қай жағдайда да газ немесе сұйықтық жалған сұйылу үшін үзіліссіз (импульсті жалған сұйылудан басқа) беріледі, ал қатты материалдың берілуі импульсті түрде де жүзеге асырылуы мүмкін [8, 12-15-бб.].

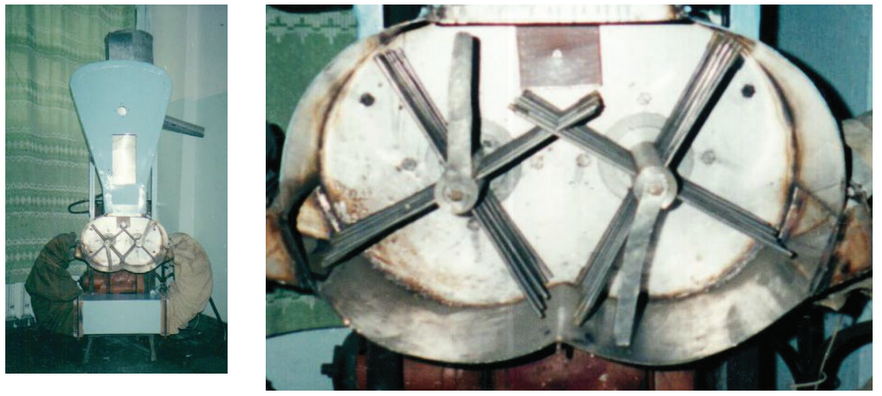
Жоғары температуралы және қысқа мерзімді технологиялық процесс буланудың өте жоғары қарқындылығын қамтамасыз етеді, әсіресе кіреберісте, мұнда бос ылғалдың буланууы іс жүзінде лезде жүзеге асады. Ұсақ бөлшектердің қызып кетуін және ірі бөлшектердің жеткіліксіз кебуін болдырмау үшін бөлшектердің түйіршік құрамы шектеулі болуы қажет, бөлшектердің максималды өлшемі 1-2 мм аралығында болуы тиіс. Газдың жылдамдығы бөлшектердің өлшеміне байланысты, бірақ әдетте ол 10-30 м/с аралығында болады. Кептіргіш қондырғылардың типтік өлшемдері диаметрі бойынша 0,6-1,1 м шамасында өзгереді.

Пневматикалық кептіргіштер мен жалған сұйылу қабатты кептіргіштер жоғары кептіру қарқындылығымен және термиялық тиімділігімен ерекшеленеді, сондай-ақ кептіру шарттарын реттеу мүмкіндігіне ие. Бұдан бөлек, құрылмасының қарапайымдылығы мен аз қозғалатын компоненттерінің болуы арқасында күрделі шығындар мен техникалық қызмет көрсету шығындары салыстырмалы түрде төмен [9, 525-530-бб.].

Материалдар мен әдістер

Мақала полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының құрылмасын жасауға арналған. Кептіру агентін тиімді пайдалану, камера ішіндегі тоқырау аймақтарын жою, өнім бірлігіне шаққандағы энергия шығындарын азайту, бөлшектердің агломерациясын болдырмау және кептірілетін материалдың шығынын азайту мақсатында полидисперсті материалдар үшін жаңа кептіргіш құрылмасы жасалған (1-сурет). Бұл кептіруге арналған қондырғының құрылмасына ҚР инновациялық патенті алынған [10, 2-б.]. Аталған қондырғыда Шәкәрім

университетінің «Технологиялық жабдықтар» кафедрасының ғылыми-зерттеу зертханасында сүзбені кептіру бойынша зерттеулер жүргізілген.



а *б*

1-сурет – Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының жалпы түрі (а) және оның жұмысшы органдары (б)

Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғы [11, 2-б.] құрамында құйынды камера, екі тангенциалды саптама және екі тиеу құрылғысы, газ суспензиясын алу саптамасы, орақ тәріздес саптамалары өзара параллель көлденең орналасқан біліктер бар. Біліктердің өстері цилиндрлік қабықшаларды құрайтын өстермен бірөсті және біліктер арасындағы қашықтық келесі қатынастан анықталады:

$$(R_1-R_2)<L<2\cdot(R_1-R_2), \quad (1)$$

мұнда: L – біліктер арасындағы қашықтық, м; R_1 – құйынды камераның төменгі бөлігінің цилиндрлік қабырғаларын құрайтын радиус, м; R_2 – білік радиусы, м.

Орақ тәріздес саптамалар икемді және олардың бос ұштары құйынды камераның төменгі бөлігінің ішкі бетімен әрекеттеседі.

Тангенциалды құбырлар бір-біріне қарама-қарсы бір өсте құйынды камераның төменгі жағына орнатылады.

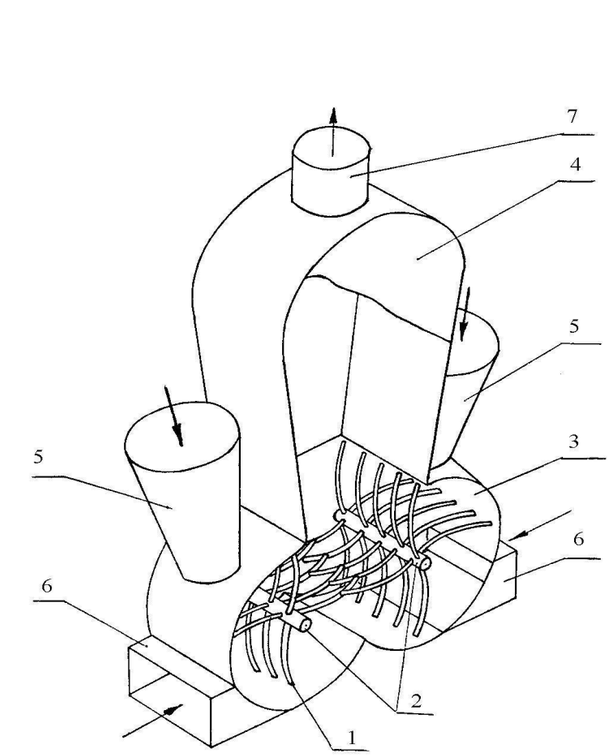
Кептіру агентін енгізу үшін құйынды камераны тангенциалды құбырлармен қамтамасыз ету камераның ішінде қарқынды қысым жасауды және оны бүкіл көлемде біркелкі ағындармен таратуды қамтамасыз етеді. Жүктеу құрылғысы кептірілген материалды камераға біркелкі жеткізуді қамтамасыз етеді.

Камераның ішінде орақ тәріздес саптамалары бар екі параллель көлденең біліктің болуы жылутасымалдағыштың (кептіргіш агентінің) өтуіне айтарлықтай кедергі жасамайды және тіпті олардың кептірілген материалды араластыру процесінде оның азаюына ықпал етеді. Материалды араластыру материалдың кептіру агентімен жанасуының бетін жасайды және жылутасымалдағыш

энергиясының эксергиялық бөлігін толық пайдалануға мүмкіндік береді, осылайша кептіргіштің буланған ылғал өнімділігі мен кептіру процесінің қарқындылығын арттырады. Айналмалы көлденең біліктерге орнатылған камераның ішкі бетімен өзара әрекеттесу мүмкіндігі бар корпуста орнатылған орақ тәріздес икемді саптамаларды қолдану құйынды камераның қабырғаларын материалдан үздіксіз тазартуға мүмкіндік береді және оны камераның төменгі бөлігінде жүзеге асырылатын кептірудің бастапқы кезеңінде ұнтақтауға ықпал етеді. Ұсынылған саптамалардың құрылмасы кептірілген материалдың агломерациялануына жол бермейді, камерада тоқырау аймақтарының пайда болуын болдырмайды және әртүрлі өлшемдегі бөлшектердің біркелкі термиялық өңделуіне жағдай жасайды.

Тангенциалды келтеқұбырлар арқылы құйынды камераға берілетін жылутасымалдағыштың (кептіргіш агентінің) оңтайлы арын шамасын таңдау қажеттілік жағдайынан және құйынды камераның жоғарғы бөлігінде материалдың алуан түріне байланысты кептірілетін материалдың бөлшектерінен жалған сұйылу қабатын жасау арқылы жүзеге асырылады.

2-суретке сәйкес кептіру қондырғысы жетекке (сызбада көрсетілмеген) қосылған өзара параллель көлденең біліктерге 2 бекітілген орақ тәріздес саптамалардан 1 тұрады. Бұл біліктер құйынды камераның 3 төменгі бөлігінде орналасқан. Құйынды камераның 3 жоғарғы бөлігі 4 кептірілетін материалдан жалған сұйылу қабатын жасауға арналған. Орақ тәріздес саптамалар 1 иілгіш материалдан жасалған. Құйынды камераның 3 төменгі бөлігінің ортаңғы аймағында орақ тәріздес саптамалар 1 бірін-бірі жабады.



2-сурет – Полидисперсті материалдарды
кептіруге арналған қондырғы:
1 - орақ тәріздес саптамалар; 2 - біліктер; 3 - құйынды камера;
4 - құйынды камераның жоғарғы бөлігі;
5 - материалды жүктеуге арналған құрылғы;
6 - тангенциалды келтеқұбырлар; 7 – келтеқұбыр.

Құйынды камераның 3 төменгі бөлігінде материалды жүктеуге арналған құрылғы 5 және жылутасымалдағышты (кептіргіш агентті) ішке беру үшін тангенциалды құбырлар 6 бар. Тангенциалды құбырлар 6 бір-біріне қарама-қарсы орнатылған, бұл құбырлар арқылы жылутасымалдағыш ағыстарының соқтығысуынан туындайтын гидравликалық соққының пайда болдырмайды және (жылутасымалдағышты беру жылдамдығы белгілі бір мәнде болған жағдайда) камераның 3 жоғарғы бөлігінде 4 жалған қайнау қабатының түзілуін қамтамасыз етеді. Камераның 3 жоғарғы бөлігінде пайдаланылған кептіргіш агент пен кептірілген материалдан газ қалқымасын қондырғыдан шығару үшін келтеқұбыр 7 орнатылған.

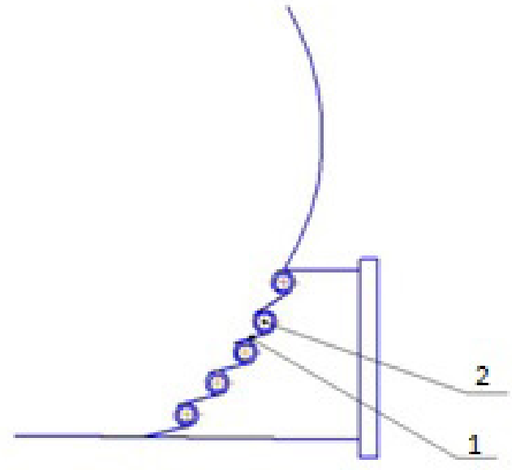
Қондырғыда басқару автоматтандырылған жүйе арқылы жүзеге асырылады. Кептіргіш агенттің температурасын бақылап реттеу үшін DS18B20 сандық датчиктер мен бағдарламаналатын термореттегіш W3230 қолданылды. Ылғалдылықты бақылау үшін ылғал және кептірілген материалдағы ылғалдылықты салыстыра отырып кептіру кезінде массаның жоғалуын бақылау әдісі қолданылады. Кептіру процесі нақты уақыт режімінде бақыланады.

Қондырғы келесі түрде жұмыс істейді. Шикі материал жүктеу құрылғылары 5 арқылы камераның 3 төменгі бөлігіне беріледі, мұнда ол 2 біліктерге бекітілген және жетекпен айналымға келтірілетін орақ тәріздес саптамалар 1 көмегімен араластырылады және ұсақталады. Құйынды камераға 3 тангенциалды келтеқұбырлар 6 арқылы берілетін кептіргіш агентінің әсерінен және орақ тәріздес саптамалар 1 арқылы үнемі араластырылуы нәтижесінде материал ішінара кептіріледі.

Ұсақталған материал кептіргіш агенттің арыны мен айналмалы орақ тәріздес саптамалар 1 берген кинетикалық энергияның әсерінен құйынды камераның 3 жоғарғы бөлігіне 4 шығарылып, сол жерде тұрақты жалған сұйылу режимінде толықтай кептіріледі. Кептірілген материал пайдаланылған жылутасымалдағышпен (кептіргіш агентпен) бірге келтеқұбыр 7 арқылы құйынды камерадан шығарылады. Газ қалқымасы одан кейін белгілі құрылғылармен, мысалы газды қатты бөлшектерден тазарту үшін циклондармен бөлінуі мүмкін немесе бірден басқа технологиялық аппаратқа түсіп, онда кептірілген материал мен пайдаланылған жылутасымалдағыштан құралған газ қалқымасы басқа кептірілген материалмен араластырылып, содан кейін газ тәріздес және қатты фазаларды бөлу белгілі тәсілдермен жүзеге асырылады.

Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғыны қолдану кептіру процесін қарқынды жүргізуге, тұрақты жалған сұйылу режимін жасауға және өнімді біркелкі кептіруге мүмкіндік береді. Қондырғыны, әсіресе, жоғары температураның ұзақ әсері жағымсыз болатын термолабилді материалдарды кептіру үшін пайдалануға болады.

3-суретке сәйкес, кептірілетін материалдың шығынын азайту және дайын өнімнің сапасын арттыру мақсатында кептіргіш қосымша түрде жалюзи тәріздес айналмалы пластиналармен жабдықталған, олар тангенциалды келтеқұбырлардың ішіне орнатылған. Бұл пластиналар құйынды камераның төменгі бөлігіне жанасатын бағытта тангенциалды келтеқұбырларға өстер арқылы бекітіледі және (жылутасымалдағыш) кептіргіш агенттің арынының ашылу мүмкіндігіне ие.



3-сурет – Полидисперсті материалдарға арналған кептіргіштің тангенциалды келтеқұбырлары: 1 – айналмалы пластиналар; 2 – өс.

Айналмалы жалюзи пластиналар кептіргіш агент берілген сәтте ашылады. Осылайша, олар кептіргіш агенттің құйынды камераның барлық көлеміне біркелкі таралуына ықпал етіп, кептіру сапасын арттырады. Кептіргіш агенттің берілуі тоқтатылғанда, жалюзи жабылып, құйынды камераның төменгі бөлігіне кіретін жолды жауып тастайды және кептірілген материал бөлшектерінің тангенциалды келтеқұбырларға түсіп кетуінің алдын алады. Сонымен бірге, бұл айналмалы пластиналар кептіргіш агенттің өтуіне айтарлықтай кедергі келтірмейді.

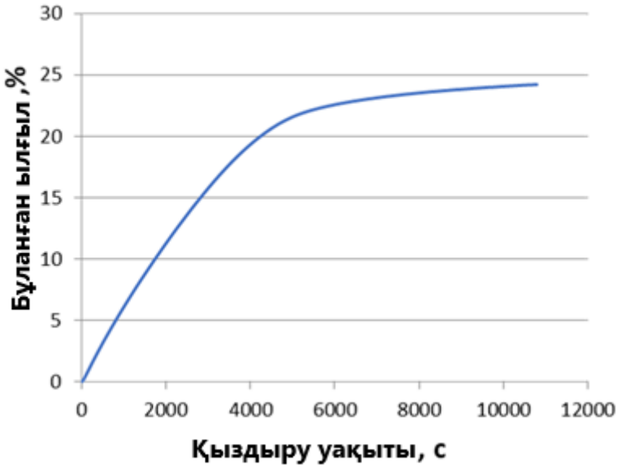
Жалған сұйылу қабаты бар кептіргіштерді қолдану негізінен бөлшектерінің өлшемі әдетте 0,1 мм-ден асатын және механикалық зақымданусыз біркелкі қайнау қабатын түзе алатын тағамдық өнімдермен шектеледі.

Нәтижелер және талқылау

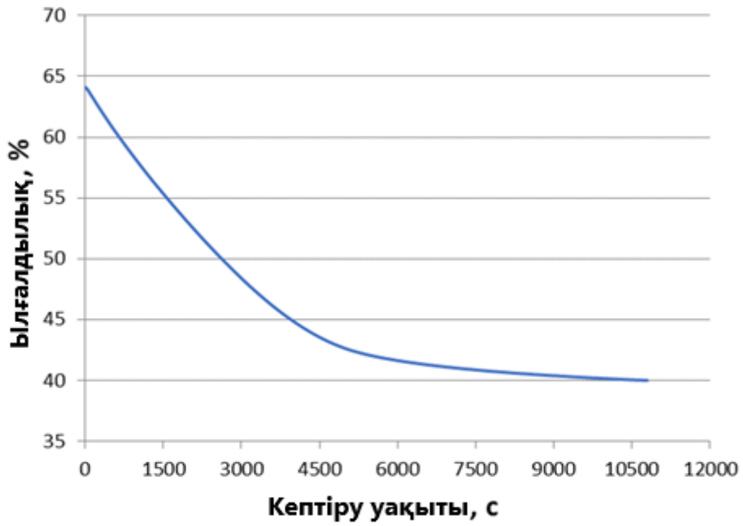
Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғыны пайдалана отырып, өнімнің ылғалдылығын зерттеу бойынша алдын ала сынақтар жүргізілді.

Сынақтар барысында майлылығы 2% сүзбенің ылғалдылығы анықталды. Сынақ ұзақтылығы 10800 с кептіру режимінде материалды желілік қыздырумен және 180 с ішінде 100°С дейін қыздырумен және 80°С ұстаммен экспресс-талдау режимінде жүргізілді.

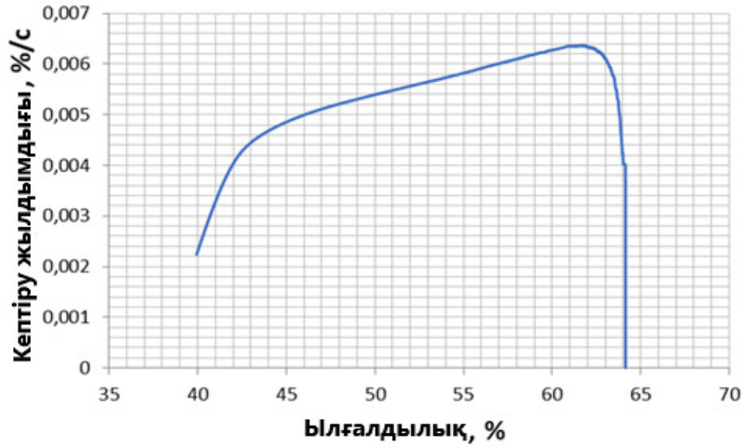
Сынақтар нәтижесінде ылғалдылықтың өзгеру графиктері, кептіру қисықтары және кептіру жылдамдығының қисықтары алынды (4-9-суреттер).



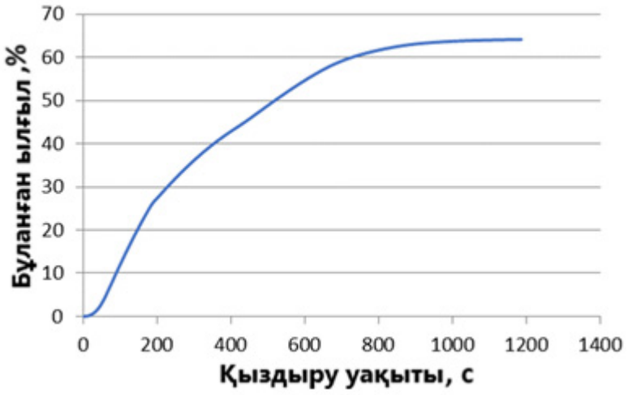
4-сурет – Кептіру процесінде 60°С температурада майлылығы 2 % сүзбеден ылғалдың буланууы



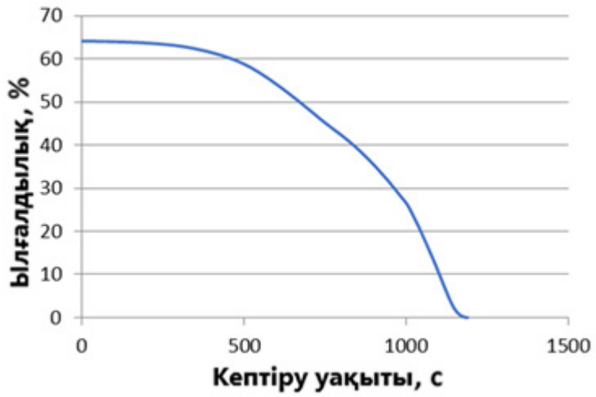
5-сурет – Майлылығы 2% сүзбені кептіру қисығы



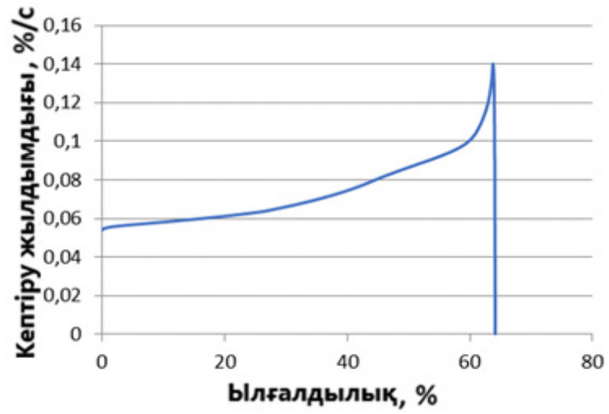
6-сурет – Майлылығы 2% сүзбені кептіру жылдамдығының қисығы



7-сурет – Экспресс-қыздыру арқылы майлылығы 2 % сүзбеден ылғалдың буланууы



8-сурет – Экспресс-қыздыру кезінде алынған
2 % майлылығы сүзбені кептіру қисығы



9-сурет – Экспресс-қыздыру кезінде алынған майлылығы
2 % сүзбені кептіру жылдамдығының қисығы

2 % майлылықтағы сүзбені кептіру қисығы мен кептіру жылдамдығының қисығы бойынша 4–9 суреттерге сәйкес полидисперсті материалдарды кептіру үшін қондырғыны пайдалану кептіру процесін жеделдетеді деп болжауға болады. Құйынды камерасы кептіру агентін енгізу үшін тангенциалды келтекұбырлармен жабдықталғандықтан, ол камераның ішінде қарқынды арынды құруды және оны бүкіл көлемі бойынша біркелкі ағынмен бөлуді қамтамасыз етеді.

Сонымен қатар, полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының инженерлік есептеу әдістемесі әзірленді. Қондырғының материалдық, жылу және конструктивтік есебі орындалды. Қопсытқыш жетегінің қуаты анықталды.

Ылғалды материалдың мөлшері:

$$G_1 = G_2 \cdot \frac{100-w_2}{100-w_1} \quad (2)$$

мұнда: G_1 – ылғалды материалдың массалық шығыны, кг/с; G_2 – кептірілген материалдың массалық шығыны, кг/с; w_1 – материалдың бастапқы ылғалдылығы (кептіруге дейін), %; w_1 – материалдың соңғы ылғалдылығы (кептіруден кейін), %.

Кептіруге жұмсалатын ауа шығыны:

$$L = \frac{w}{x_2 - x_0} \quad (3)$$

мұнда: L - кептіруге жұмсалатын ауа шығыны, кг/с; x0 – калориферге дейінгі ауаның ылғалдылығы, кг/кг; x_2 – қондырғыдан шыға берістегі пайдаланылған ауаның ылғал құрамы, кг/кг

Кептіруге жұмсалатын жылу шығыны:

$$Q = L \cdot (i_1 - i_0) \quad (4)$$

мұнда: Q - кептіруге жұмсалатын жылу шығыны, Дж; i_0 – калориферге дейінгі ауа энтальпиясы, Дж/кг; i_1 – калориферден кейінгі қыздырылған ауаның энтальпиясы, Дж/кг.

Қопсытқыш жетегінің қуаты:

$$N_в = \sum_1^z \frac{E_р \cdot w_р}{1000} \quad (5)$$

мұнда: $N_в$ – қопсытқыш жетегінің қуаты, кВт; $E_р$ – материалға батырылған тік саптамаға әсер ететін өнімнің тепе-тең әсер ететін кедергі күші, Н; $w_р$ – саптаманың шеңберлік жылдамдығы, м/с; z – бір мезгілде материалға батырылған тік саптамалар саны, дана.

Полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының келесі конструктивтік параметрлері анықталды:

Көрсеткіш және оның өлшем бірлігі	Мәні
Қайнау қабатының биіктігі h, м	0,24
Сепарациялық кеңістігінің биіктігі $h_{сеп}$, м	0,96
Кондырғының жалпы биіктігі Н, м	1,2
Қайнау қабаты бар қондырғының гидравликалық кедергісі $\Delta P_{суш}$, Па	1498,1
Жылу электржылытқыштың қуаты N, кВт	56,8
Қопсытқыш жетегінің қуаты $N_в$, кВт	0,3

Қорытынды

Жасалған қондырғыны қолдану нәтижесінде кептіру уақыты газ таратушы торымен пневматикалық кептіргішке қарағанда 12%-ға қысқарды, гидравликалық кедергісі 1,5-2 есе азайды, кептірілген өнім бірлігіне жұмсалатын энергия шығыны 10% дейін төмендеді.

Жоғарыда айтылғандарға сәйкес, полидисперсті материалдарды кептіруге арналған қондырғының құрылмасын жасау кезінде мынаны ескеру қажет: жалған сұйылу қабатының біркелкі болмауы аппараттың тұрақсыз жұмысына себеп болады, полидисперсті материалдар қабатындағы арын жоғалуы қабат биіктігімен сызықтық түрде артады, ал газ таратушы тор айтарлықтай гидравликалық кедергіге ие. Сондықтан тиімді гидродинамикалық жағдайды қамтамасыз ету үшін кептірілетін материалды араластырып отыратын газ таратушы торы жоқ қопсытқыштармен жабдықталған аппараттарды қолдану қажет. Бұл шешім аталған жағымсыз факторлардың әсерін азайтып, жалған сұйылу қабатында кептіру процесін қарқындатуға ықпал етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Vosteen, B.** Trockner // Chemie.-Ing.-Techn. – 1976, № 48. – P. 941–949.

2 **Rosch, M., Probst, R.** Granulation in der Wirbelschicht. // Verfahrensteshnik, 1975, № 9. – P. 59–64.

3 **Simon, E. J.** Agglomeration in der Wirbelschehtlin vielseitiges Verfahren fur die Struklurierung von Feststoffgemischen. // Verfahrenstechnik. – 1976, № 10. – P. 758–763.

4 **Bartknecht, W.** Explosionsschutz - Mabnahnien an Spruhgranulatoren und Wirbelschicht. // Trockenanlagen, Machinenmarkt. – 1976, № 82. – P. 826–829.

5 **Wormald, D., Burnell, E. M. W.** Design ol Fluidised Bed Driris and Coolers for the Chemical Industry. // British Chemical Engineering. - 1971, No 16. – P. 376-380.

6 Broiner, H., Mtwes, D. Slolfaustaus cheinschliefill chshemischer Reaktionen. – Aarau. Franklurt, 2011. – 693 p.

7 **Валентас, К. Дж., Ротштейн, Э., Сингх, Р. П.** Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов / (ред.) / пер. с англ. под общ. науч. ред. А. Л. Ишевского. – СПб: Профессия, 2004. – С. 160–161.

8 **Тусипов, Н. О., Акимов, М. М., Еренгалиев, А. Е., Давыдова, С. Г.** Сушилки с псевдоожиженным слоем : аналитический обзор. - Усть-Каменогорск, 2014. – 60 с.

9 **Плаксин, Ю. М., Малахов, Н. Н., Ларин, В. А.** Процессы и аппараты пищевых производств – М. : Колос, 2007. – С. 525–530.

10 **Тусипов, Н. О., Акимов, М. М., Еренгалиев, А. Е., Давыдова, С. Г.** Установка для сушки полидисперсных материалов. Инновационный патент РК № 29537 от 16.02.2015, бюл. № 2. – 3 с.

11 **Тусипов, Н. О., Акимов, М. М., Лобасенко, Б. А., Алиева, М. А.** Установка для сушки полидисперсных материалов. Патент РК на полезную модель № 4989 от 29.05.2020, бюл. № 21. – 4 с.

REFERENCES

1 **Vosteen, B.** Trockner. // Chemie.-Ing.-Techn. – 1976, № 48. – P. 941–949.

2 **Rosch, M., Probst, R.** Granulation in der Wirbelschicht. // Verfahrensteshnik, 1975, № 9. – P. 59–64.

3 **Simon, E. J.** Agglomeration in der Wirbelschehtlin vielseitiges Verfahren fur die Struklurierung von Feststoffgemischen. // Verfahrenstechnik. – 1976, № 10. – P. 758–763.

4 **Bartknecht, W.** Explosionsschutz - Mabnahnien an Spruhgranulatoren und Wirbelschicht. // Trockenanlagen, Machinenmarkt. – 1976, № 82. – P. 826–829.

5 **Wormald, D., Burnell, E. M.W.** Design ol Fluidised Bed Driris and Coolers for the Chemical Industry. // British Chemical Engineering. – 1971, № 16. – P. 376–380.

6 **Broiner, H., Mtwes, D.** Slolfaustaus cheinschliefill chshemischer Reaktionen. - Aarau. Franklurt, 2011. – 693 p.

7 **Valentas, K. Dzh., Rotshtejn, E., Singh, R.P.** Pishchevaya inzheneriya: spravochnik s primerami raschetov / (red.) / per. s angl. pod obshch. nauch. red. A. L. Ishevskogo. - SPb: Professiya [Food Engineering: A Reference Guide with Calculation Examples / (ed.) / transl. from English. Ed. by A. L. Ishevsky. – St. Petersburg: Profession]. – 2004. – P. 160–161.

8 **Tusipov, N. O., Akimov, M. M., Erengaliev, A. E., Davydova, S. G.** Sushilki s psevdoozhizhennym sloem: analiticheskij obzor. - Ust'-Kamenogorsk [Fluid bed dryers: an analytical review. – Ust-Kamenogorsk]. – 2014. – 60 p.

9 **Plaksin, Yu. M., Malahov, N. N., Larin, V. A.** Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv – M. : Kolos [Processes and Apparatus of Food Production - Moscow : Kolos]. – 2007. – P. 525–530.

10 **Tusipov, N. O., Akimov, M. M., Erengaliev, A. E., Davydova, S. G.** Ustanovka dlya sushki polidispersnyh materialov. Innovacionnyj patent RK № 29537 ot 16.02.2015, byul. № 2 [A plant for drying polydisperse materials. Innovation Patent RK No 29537 dated 16.02.2015, bulletin № 2]. – 3 p.

11 **Tusipov, N. O., Akimov, M. M., Lobasenko, B. A., Alieva, M. A.** Ustanovka dlya sushki polidispersnyh materialov. Patent RK na poleznuyu model' № 4989 ot 29.05.2020, byul. № 21 [A plant for drying polydisperse materials. Patent of the Republic of Kazakhstan for utility model № 4989 dated 29.05.2020, bulletin № 21]. – 4 p.

Н. О. Тусипов[1], Б. Б. Кабулов[2], *Г. Б. Абдилова[3],
А. Л. Касенов[4], Г. Н. Конарбаева[5]
[1,2,3]Университет Шакарима, Республика Казахстан, г. Семей
[4]Казахский агротехнический исследовательский
университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана
[5]Казахстанский технический университет имени
Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена разработке конструкции установки для сушки полидисперсных материалов. С целью повышения эффективности использования сушильного агента, устранения образования застойных зон внутри камеры, снижения удельных энергозатрат на единицу продукции, устранения агломерации частиц и уменьшения потерь высушиваемого материала была разработана новая конструкция сушилки для полидисперсных материалов. В статье приведены устройство и принцип работы установки для сушки полидисперсных материалов. Конструкция установки содержит серповидные насадки, валы, вихревую камеру, устройство для загрузки материала, тангенциальные патрубки и т.д. Принцип работы установки заключается в сушке измельченного материал под действием напора сушильного агента и кинетической энергии в вихревой камере в режиме устойчивого псевдоожижения. Проведены предварительные эксперименты по исследованию влажности продукта с использованием установки для сушки полидисперсных материалов. Получены графики изменения влажности, кривые сушки и кривые скорости сушки творога жирностью 2 %. Разработана методика инженерного расчета установки для сушки полидисперсных материалов. В результате применения установки для сушки полидисперсных материалов позволит интенсифицировать процесс сушки, создать режим устойчивого псевдоожижения, обеспечить равномерную сушку продукта. Установка может быть использована для сушки термолабильных материалов, для которых нежелательно продолжительное воздействие высокой температуры. При разработке конструкции установки для сушки полидисперсных материалов необходимо учитывать то, что неоднородность псевдоожиженного слоя создает условия для нестабильной работы аппарата, потери напора в слое полидисперсных материалов линейно увеличиваются с высотой слоя, газораспределительная решетка обладает значительным сопротивлением. Поэтому для обеспечения условий эффективной гидродинамической обстановки следует применять аппараты без газораспределительной решетки с ворошителями, которые перемешивают высушиваемый материал, снижают влияние вышеперечисленных негативных факторов и способствуют интенсификации сушки в псевдоожиженном слое.

Ключевые слова: разработка, процесс, установка, сушка, полидисперсный материал, псевдоожижение.

N. Tusipov[1], B. Kabulov[2], *G. Abdilova[3],
A. Kassenov[4], G. Konarbayeva[5]
[1,2,3]Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey
[4]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana
[5]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk

DEVELOPMENT OF POLYDISPERSE MATERIALS DRYING PLANT

The article is devoted to the design of a plant for drying polydispersed materials. In order to increase the efficiency use of the drying agent, eliminate the formation of stagnant zones inside the chamber, reduce the specific energy consumption per unit of production, eliminate agglomeration of particles and reduce the loss of drying material, a new design of a dryer for polydisperse materials has been developed. The article presents the device and principle of operation of the plant for drying polydispersed materials. Proposed plant comprises crescent-like nozzles, shafts, vortex chamber, material loader, tangential branch pipes, etc. The principle of operation of the plant is to dry the crushed material under the pressure of a drying agent and kinetic energy in a vortex chamber in a stable fluidization mode. Preliminary experiments were carried out on the moisture content of the product using a polydisperse drying plant. Curves of humidity changes, drying curves and curves of curd drying rate with fat content of 2 % were obtained. A method for engineering calculation of a polydisperse material drying unit has been developed. As a result of using the polydisperse materials drying plant, it will make it possible to intensify the drying process, create a stable fluidization regime, and ensure uniform drying of the product. The apparatus can be used to dry thermolabile materials for which prolonged exposure to high temperature undesirable. When designing an installation for drying polydisperse materials, it is necessary to take into account that the inhomogeneity of the fluidized bed creates conditions for unstable operation of the apparatus, pressure losses in the layer of polydisperse materials linearly increase the of the layer height, and the gas distribution grid has significant resistance. Therefore, to ensure the conditions of an effective hydrodynamic situation, it is necessary to use devices without a gas distribution grid with agitators that mix the dried material, reduce the influence of the above negative factors and contribute to the intensification of drying in a fluidized bed.

Keywords: development, process, installation, drying, polydisperse material, fluidization.

SRSTI 55.39.29
DOI

***M. M. Chazhabayeva[1], A. Z. Bukayeva[2],**
A. S. Madiyarova[3], G. S. Mambetaliyeva[4], K. S. Rzayeva[5]
Caspian University of Technology and Engineering
named after Sh. Yessenov, Kazakhstan, Aktau
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2676-2807
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0956-1552
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2236-4038
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0390-1886
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6322-6598
*e-mail: marzhan.chazhabayeva@yu.edu.kz

ANALYSIS OF DYNAMOMETRIC MAPS OF VARIOUS STATES OF OPERATION OF THE ROD BOREHOLE PUMPING UNIT

The article examines the analysis of various operating conditions of a downhole pumping unit using dynamometric maps. Dynamometric maps allow you to monitor the operation of the rod pump in detail: it is possible to identify defects such as gas exposure, liquid shocks, valve leakproofness, the effect of bending the polished stem and rupture of the stem. Liquid shocks are caused by a mismatch between the displacement rate of the pump and the performance of removing liquid from the tank, which leads to excessive pumping. As a result, the pump may suffer mechanical damage due to increased deflection and wear. One of the most common defects is the lack of tightness of the discharge valve or plunger. To understand the shape of the dynamometer card when the intake valve leaks, it must be borne in mind that the dynamometer card of the well shows the load depending on the displacement above the plunger.

Therefore, a leak in the intake valve indicates its effect on the plunger load. Excessive accumulation of gas inside the pump can lead to a situation where the gas is completely clogged, when the gas stops working and the intake and discharge valves remain closed. Low and high displacement of the plunger also affects this condition, as leaks disrupt the efficient operation of the valves and adversely affect pump performance. A polished rod that has a malfunction is usually characterized by its bending. This bending causes significant friction between the stem and the stuffing box of the wellhead. Such friction can lead to oil leakage from the mouth or even breakage of the polished stem itself.

Keywords: pump, dynamometer, plunger, discharge valve, intake valve, liquid, pump card shape, polished rod.

Introduction

Dynamograms are essential for diagnosing and monitoring the performance of rod borehole pumping units. Traditionally, experts in the field analyze these dynamograms, and the accuracy of the diagnostics heavily relies on their knowledge and experience.

This process is significantly influenced by human factors. However, the integration of machine learning into automatic diagnostics of pumping units enhances operational efficiency, allowing for quicker and more precise detection of equipment malfunctions, reducing dependency on human expertise. One of the key challenges in troubleshooting rod pumps is the difficulty of visually interpreting the data obtained from dynamograms. This visual complexity is influenced by several factors, such as the pump system's behavior, which often leads to dynamograms having similar patterns. Furthermore, when the issues reflected in the dynamogram surpass the knowledge and experience of the expert performing the analysis, visual inspection alone may be insufficient for diagnosing downhole conditions. In such cases, visual analysis is not ideal for monitoring and detecting faults. Accurate and rapid identification of downhole problems is crucial for optimizing oil recovery processes.

Artificial lift methods are widely used in the oil industry to increase productivity either to maximize well production rates or at low reservoir pressures. Although there are several artificial elevator methods in the oil industry (such as gas elevator, electric submersible pump, progressive cavity pumps), the most common artificial elevator method in the world remains the use of sucker rod deep well pumping units. At present, more than 850,000 oil wells worldwide are operated with sucker rod pumping units (SRPU), [1].

As shown in Figure 1, HDD is the main method of oil extraction in Kazakhstan's fields. Approximately 85 % of all wells are operated with sucker rod deep well pumps, 13 % of wells are operated with electric centrifugal pump, and the remaining 2 % come from other methods of oil extraction (hydraulic pumps, etc.).

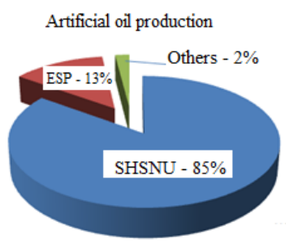


Figure 1 – Statistics of artificial mining methods in Kazakhstan

The operation of sucker rod well pumping units is influenced by some factors such as composition of pumped oil, presence of mechanical impurities, ARPD, gas influence, etc., which lead to malfunctioning or complete failure of sucker rod pumping unit.
In cases where hazards are manifested or failure of SRPS equipment occurs, it is a matter of timely monitoring and detection of malfunctions. The efficiency of pumping components will be greatly improved with a comprehensive verification system to avoid problems as much as possible. These systems allow operators to prioritize drilling and make better decisions. The literature review showed that the method of analyzing the obtained dynamometric maps of the well is used for diagnosing the well equipment of the

SRPS. The dynamometer map is a closed curve formed by the pump rod displacement values and the load values at the pump rod-pump unit junction generated in each pumping cycle [2].

Figure 2 shows the main components of the system, namely the pump unit, the pump rod, and the pump itself. The pump unit is usually connected to an electric motor or internal combustion engine via a torque reducer, which converts the rotary motion of the motor into an alternating motion at the top of the pump rod. The pump rod transfers the mechanical energy received from the surface to the pump.

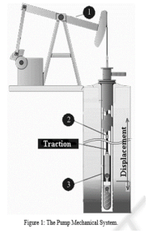


Figure 2 – Mechanical system of the pump

The main components of the pump are the plunger, the cylinder, the discharge valve and the suction valve. Together they form the pumping system of the positive displacement pump type. When traveling downward, the discharge valve opens and the suction valve closes. Thus, the weight of the liquid column is supported by a subset of the suction valve and it is transferred to the piping through the barrel. The inside of the plunger is filled with liquid. Immersion of the rod column in the fluid causes a small discharge due to the volume that has been displaced. As it moves upwards, the discharge valve closes and the suction valve opens. The liquid moved by the plunger appears on the surface while the chamber fills again through the suction valve. Thus, the weight of the fluid in the pipeline is transferred to the boom columns. The dynamics described here can be viewed as a simple harmonic motion of the mass corresponding to the boom columns and the fluid load accumulated at one point. Finally, the pump, which is shown in detail in Figure 3, transfers the resulting mechanical energy to the multiphase fluid (oil, gas, sediment and water).

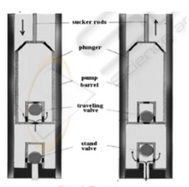


Figure 1.3 – Pump

The dynamics described here can be viewed as a simple harmonic motion of a mass corresponding to the boom columns and fluid load accumulated at a single point. This approach is no longer valid if, for example, depth increases; or if fluid loading increases; or if friction or rotation increases; or if the physical properties of the equipment change. These cases require a more precise study of the operating conditions, and this leads to solving the damped wave equations to describe the motion.

Periodic evaluation of the system is accomplished by: a) Pump submersions: determined by the level of the dynamic level; б) Borehole dynamometer map: obtained by reading the rod displacement and its corresponding pulling force; c) Other indicators obtained from production tests, or core temperature checks, or also pressure testing of equipment

Materials and methods

Dynamograms are used to diagnose typical malfunctions in rod pumps, which are essential components in oil production. These graphs plot load against displacement during the pump cycle and can reveal common issues with the system. For instance, gas interference can cause a flattened dynamogram, indicating that gas has reduced the pump's efficiency. Fluid pound occurs when the pump is not fully filled with liquid, which shows as a drop in load during the upstroke. Valve problems, such as leaks in the standing or traveling valves, distort the dynamogram, reflecting inefficient fluid handling. Issues like rod buckling or wear on the polished rod also leave distinct signatures in the dynamogram, indicating mechanical problems that can reduce pump performance.

Effect of gas. In wells with a high gas-oil ratio (GOR), gas enters the pump, leading to a reduction in volumetric efficiency (VE). As gas accumulates inside the pump, a full gas lock occurs, with gas obstructing the pump's movement throughout its stroke. At this stage, both the discharge valve (N. C.) and the inlet valve (V. C.) remain closed. The pump's operation is then characterized by gas compression during the downstroke and gas expansion during the upstroke, significantly lowering volumetric efficiency [1]. Figure 2 depicts the effects of free gas entering the pump. At point A, the plunger initiates its upward motion. Under normal conditions, the pressure inside the pump cylinder should be lower than the pump's suction pressure, enabling the inlet valve to open.

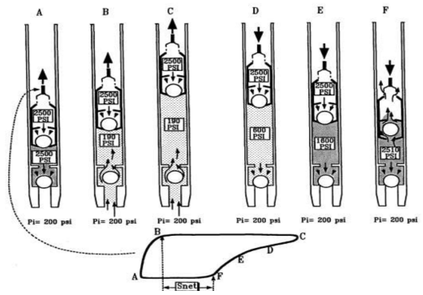


Figure 2 – Well dynamometer map with free gas influence problem

From point A to B, the plunger expands the gas inside the pump. In an ideal situation without gas, the pressure in the cylinder would quickly decrease, allowing the inlet valve to open as soon as the plunger began to rise. However, with free gas present in the cylinder, much of the stroke is used to expand the gas instead of lifting the liquid. This reduction in pump efficiency, caused by gas expansion, can be minimized by positioning the pump piston closer to the bottom of the pump. At point B, the fluid load is fully supported by the plunger, the inlet valve opens, and fluid enters the pump cylinder. This continues through the remainder of the upward stroke to point C, where the plunger reaches the top of its stroke and momentarily pauses before beginning its downward movement. At point D, the plunger begins its downward motion. The discharge valve remains closed because the pressure above the valve is still higher than the pressure below it. As the plunger continues to descend, the pressure inside the pump cylinder increases, causing the load on the rod to decrease. Moving towards point E, the plunger compresses the gas-liquid mixture further, raising the pressure inside the cylinder even more. At point F, the plunger descends far enough to compress the fluid in the pump cylinder, raising its pressure to a level higher than that above the plunger. As a result, the discharge valve opens, allowing the fluid to be pushed out of the pump cylinder and into the piping system. Throughout the upward stroke from point A to point B, no fluid is moved because the inlet valve remains closed. The inlet valve only opens once the plunger reaches point B, allowing fluid to enter the pump cylinder. Similarly, during the downward stroke from point C to point F, the discharge valve remains closed due to the effects of free gas in the pump. It only opens when the plunger compresses the fluid sufficiently at point F, permitting fluid to be discharged.

Fluid pound. Liquid shocks result from a mismatch between the displacement rate of the pump and the available liquid volume from the tank, causing over-pumping. This condition can lead to excessive mechanical strain on the pump, resulting in increased deflection, wear, and potential mechanical damage. In cases of liquid shock, as illustrated, the discharge valve remains closed at point A, while liquid flows into the pump cylinder between points A and B. The plunger carries the full liquid load, but as the stroke nears its end, the pump lacks sufficient liquid to fill the cylinder, leading to a partial fill. The remaining volume is filled with low-pressure gas, reducing the pump's

efficiency and increasing the risk of further mechanical issues. As the plunger begins its downward movement, the discharge valve remains closed due to the absence of liquid pressure to force it open. The load on the plunger stays high, with only a minor decrease caused by pipeline-rod friction, until the plunger reaches point D, where it strikes the liquid. This sudden and forceful impact, shown in Figure 2, is a common issue when the pump cylinder is not fully filled, leading to mechanical strain and potential damage.

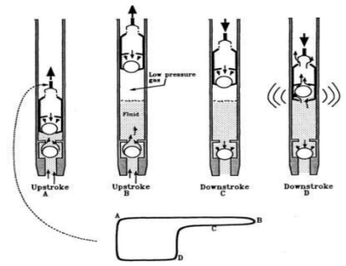


Figure 3 – Downhole Dynamometer card with liquid impact problem

One of the frequent issues with rod pumps is a leaky discharge valve or plunger. Figure 4 depicts the typical dynamometer card shape for this malfunction. The primary feature of this card is its rounded upper half, which occurs because the discharge valve or plunger cannot fully absorb the liquid load as it would in a properly functioning, fully filled pump cylinder. This malfunction compromises the pump's ability to handle the liquid load efficiently, leading to reduced operational performance and increased wear over time. As the plunger begins to move upward, it gradually lifts the fluid. To capture the full fluid load, a significant pressure differential across the plunger is required. The plunger must, therefore, move at a higher velocity than the leakage rate of the fluid. Depending on the extent of the leakage, the plunger may or may not be able to fully take up the fluid load. This cycle results in reduced pumping efficiency and increased wear on the pump components, which can lead to further mechanical issues over time. As illustrated in Figure 5, the shape of the dynamometer map for a leaking inlet valve appears as the inverse of the shape seen for a discharge valve or plunger leak. To fully understand this dynamometer map, it's important to remember that the downhole dynamometer map reflects the load applied to the plunger, based on changes in its position. In the case of an inlet valve leak, this unique shape reveals how such leakage influences the load on the pump plunger. When the inlet valve leaks, the plunger is unable to fully retain the liquid load, which impacts the distribution of pressure and load during the pump's operation. This characteristic shape provides diagnostic insights into the condition of the inlet valve, allowing operators to assess and address potential inefficiencies or malfunctions in the pump system. On the upward stroke, when the plunger starts to move upward at point A, the discharge valve closes and the plunger takes a load of fluid. At the same time, the inlet valve opens, allowing fluid to enter the pump cylinder. Up to this point, a worn inlet valve does not affect the plunger load. A worn inlet valve has a significant effect on the plunger load during the down stroke.

Particularly at the beginning and at the end of the downstroke changes are shown on the dynamometer chart.

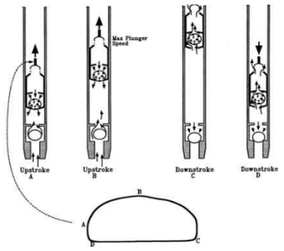


Figure 4 – Well dynamometer chart with track valve leakage problem

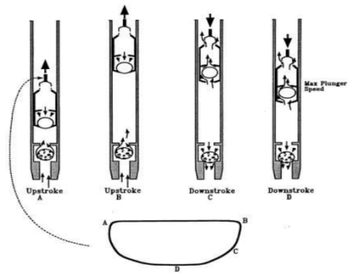


Figure 5 – Well dynamometer with a leakage problem of the receiver valve

Gas lock. The accumulation of gas within the pump can lead to a complete gas lock, effectively obstructing the pump's operation while both the inlet and discharge valves remain closed. During the upward stroke, the pressure inside the pump cylinder exceeds the inlet pressure, keeping the inlet valve shut and causing the gas to expand. Conversely, during the downward stroke, the gas is compressed, leading to inefficient pumping and potential operational issues. Figure 6 illustrates the dynamometer chart reflecting a real gas lock in a sucker rod depth pump.

Results and discussion

To address this problem, two primary solutions can be employed: increasing the pump clearance or enhancing the pump's submergence within the well. Increasing the pump clearance improves fluid movement through the plunger, thus raising the degree of gas compression. On the other hand, increasing the pump submergence elevates the fluid level, which requires a lower compression ratio, facilitating better pump performance.

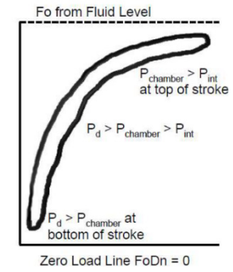


Figure 6 – Well dynamometer map with gas shutoff problem

Low and high plunger landings. When the plunger is positioned too low, there is a risk of it hitting the end of the downstroke. This scenario alters the shape of the well pump card, as depicted in Figure 7. The primary distinction between this shape and that of a fully functioning pump map is the load peak at the very end of the downstroke. As illustrated, when the plunger reaches the bottom at point D, a spike occurs due to a strong compression stroke, which significantly reduces the load on the plunger. This phenomenon indicates a mechanical limitation and can affect the overall efficiency of the pumping system.

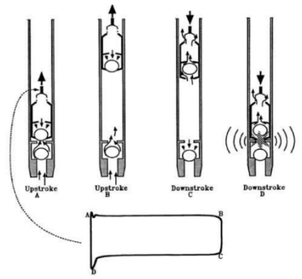


Figure 7 – Downhole dynamometer card with plunger kick problem

Faulty pipe anchor. If the pipe anchor malfunctions, it can lead to a torque pump card shape resembling that shown in Figure 7. At point A, as the plunger begins its upward motion, the pipe anchor remains engaged, allowing the plunger to draw fluid. At point B, the pipe anchor releases, causing a snap action. During this release, both the pipes and inlet valve ascend at the same speed as the plunger. For a brief interval between points B and B', the relative distance between the discharge and inlet valves stays constant, resulting in no change in load. However, as the plunger accelerates, it quickly captures all the fluid at point C. This malfunction can disrupt the efficiency of the pumping system and lead to additional complications, emphasizing the need for regular maintenance and monitoring of the pipe anchor's condition. Understanding the mechanics involved can aid in troubleshooting and improving overall operational performance. As shown in Figure 7, from point B to C, the dynamometer card has the

characteristic shape of a loose tube. For the rest of the upward stroke (from point C to point D), nothing changes; and consequently, the load remains constant. When the plunger begins to move downward, the pipe anchor is held from D to E. However, from E' to E, the shape becomes similar to the shape at the top. This shape change is caused by the elongation of the pipe. Bending of the polished rod is a significant issue that can affect the operational efficiency of pumping systems. This failure may not always be visible, as the bend can be subtle. Such bending often arises from misalignment of the carrier tube or improper centering of the surface block [5]. Figure 9 illustrates the dynamometer map that corresponds to this condition, highlighting the changes in load characteristics resulting from the bent polished rod.

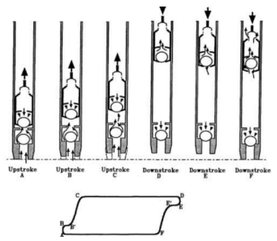


Figure 8 – Downhole dynamometer with a fault in the pipeline anchor

Figure 9 shows the typical shape of a dynamometer map for a high-viscosity oil well. In this condition, the card does not have a definite shape. However, the dynamometer test data shows some common features. The first feature is that the peak pump load exceeds the maximum fluid load. This indicates high pump friction during the up stroke. Also, another feature is that the minimum pump load exceeds the zero load line. This is another indication of high friction during the down stroke.

Resistance to fluid flow through the pump's inlet valve can significantly hinder the filling of the pump cylinder by the time the plunger reaches its maximum stroke. This resistance can be caused by various factors, including scale buildup, wax, corrosion, sand, or other solid materials obstructing the inlet valve.

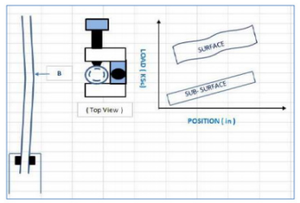


Figure 9 – Downhole dynamometer card with polished stem bend

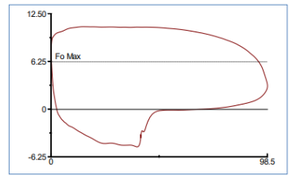


Figure 10 – Well dynamometer map with viscous oil

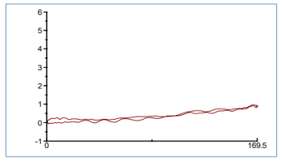


Figure 10 – Downhole dynamometer map of deep rod breakage

Such blockages restrict the fluid's ability to enter the pump effectively. Additionally, when the oil produced is highly viscous, it leads to increased friction losses within the fluid. These losses can further limit the flow into the cylinder during the upstroke.

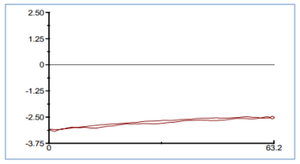


Figure 11 – Downhole dynamometer map of shallow rod breakage

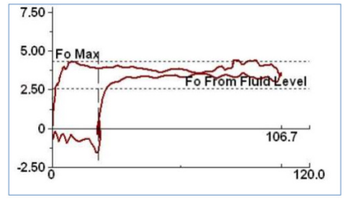


Figure 12 – Downhole dynamometer with clogged pump inlet

The model developed by this technique performs a transformation of the dynamometer map data (x, y). This transformation transforms the map from observation space to an n-dimensional vector. The resulting vector includes characteristic elliptic Fourier descriptors. These descriptors simplify, normalize, and describe each map well. They presented a new approach to the old problem of numerical characterization of complex shapes. Essentially, elliptic Fourier descriptors are a parametric solution to the problem of numerical determination of complex shapes. A two-dimensional contour (x, y) can be divided into two curves. The separation is accomplished by plotting

the contour function of the third variable (t). The first curve is a plot of the X-axis dependence on map (t). The second curve represents a plot of the dependence of the Y-axis on map (t). Then a pair of equations is obtained as a function of the third variable (t). The parameters of these two equations are used in the feature vector. The closer the distance between the observed points, the more accurate the map image. The X and Y axes can be defined as a function of time (Third variable). These new functions are single-valued and periodic. Therefore, they can be fitted with Fourier functions. Figure 12 shows an example of a real dynamometer chart of a rod pump. Consider the x and y coordinate values in Figure 12 plotted on a new horizontal "x-axis" that has been labeled as the "t-axis" (time axis). These x and y "projections" are shown in Figures 11 and 12. Examination of these figures shows that they will always be single-valued and periodic. It is emphasized that Figures 11 and 12 establish the Fourier function. One advantage of using this algorithm is that the map can be reconstructed. x- Coordinates and y-coordinates that were computed separately can be "reunited" with these coordinates (for identical values of t). The expected shape is then recreated.

In summary, the elliptic Fourier descriptors represent a parametric solution. This implies the derivation of a pair of equations. These two equations are a function of a third variable $(X\ (\mathrm{t})\ and\ Y\ (t))$, as shown in equation (1).

$$\begin{pmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{pmatrix} = \sum_{n=0}^{k} \begin{pmatrix} a_n b_n \\ c_n d_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \\ cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Where: t: the third assumed variable; n: the harmonic number; an, bn, bn, cn, dn: Fourier coefficients corresponding to nth-harmonics; T: period (sum of all t increments).

Step one: extracting the boundary

The map file is represented as a list of (x, y) items of the entire map. xp and yp are defined as the summation of the links between each subsequent point. The sum of links between points can be calculated from Equations 2 and 3.

$$x_p = \sum_{i-1}^{p} \Delta x_i \quad (2)$$

$$y_p = \sum_{i-1}^{p} \Delta y_i \quad (3)$$

Where: p: chain link index; x_p: summation of links on the x-axis; y_p: summation of y-axis links.

Step two: determination of the third parameter

The length of the links is called «time». The contribution of any diagonal link is $\sqrt{x^2 + y^2}$. «Time» of a path link is the sum of all times of previous links, as shown in Equation 2.4.

$$t_p = \sum_{i-1}^{p} \Delta t_i \quad (4)$$

Where: p: the index of the chain link; t_p: chain length in the track link;

Step three: Fourier descriptors

Equation (1) is solved to obtain a_n and b_n as shown in Equations 5 and 6:

$$a_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{i-1}^{p} \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left[cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - cos\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right] \quad (5)$$

$$b_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{i-1}^{p} \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left[sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - sin\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right] \quad (6)$$

Where: n: harmonic number; a_n, b_n: Fourier coefficients corresponding to the nth-harmonics; T: period (sum of all t increments); k: total number of links; p: chain link index; x_p: summation of links along the x-axis; t_p: chain length in the path link.

The same procedures are applied for the y-axis. Accordingly, c_n and d_n are identified as shown in Equations 7 and 8.

$$c_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{i-1}^{p} \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} \left[cos\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - cos\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right] \quad (7)$$

$$d_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{i-1}^{p} \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} \left[sin\left(\frac{2n\pi t_p}{T}\right) - sin\left(\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \right] \quad (8)$$

Where: n: harmonic number; c_n, d_n: Fourier coefficients corresponding to the nth-harmonics; T: period (sum of all t increments); k: total number of links in the chain; y_p: summation of links along the y-axis; t_p: chain length of a path link.

Step four: machine learning input vector

It should be emphasized that the input parameters are 15 elliptic Fourier descriptors that provide a normalized set of coefficients a_n, b_n, c_n, and d_n.

These coefficients are invariants of rotation, displacement and scale. Hence, a matrix of values [15 × 4] is created. The first coefficient refers to the centroid of the input shape.

Therefore, this can be ignored. This leaves the remaining 59 EFD coefficients. These 59 descriptors can be used to compare shapes.

Hence, the feature vector $\chi = (a_2, b_2, c_2, d_2, \ldots, a_{15}, b_{15}, c_{15}, d_{15})$ can be constructed and used as input to the classification algorithm.

Conclusion

The article focuses on analyzing dynamometric maps that illustrate various operational states of rod pumps. It emphasizes how these maps can reveal the effects of factors such as gas ingress, liquid shocks, polished rod bending, and valve leaks on the pump's performance. Additionally, utilizing dynamometric maps for diagnosing pumping units enhances operational efficiency by facilitating quicker and more precise identification of equipment malfunctions.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Чажабаева М. М.** /Анализ динамометрических карт различных состояний работы ШСНУ. Труды университета. – № 3 (88), 2022. – С. 144–149.

2 **Молчанов А. Г.** Пути дальнейшего совершенствования штанговых скважинных насосных установок / Москва: Специализированный журнал «Бурение и нефть», 2014 г. – С. 2–4 .

3 **Арбузов В. Н.** Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. Часть 2 / В. Н. Арбузов – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012 г. – 272 с.

4 **Бубнов М. В., Зюзев А. М.** Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов / УралЭНИН, ФГАОУ ВПО «УрФУ» - Конференция молодых ученых, 2016 – С. 2–3.

5 **Yuriy Shinyakov, Maxim Sukhorukov, Daria Torgaeva and Andrey Soldatov.** Methods and facilities for monitoring the operation of a sucker rod pump/ International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume 9, Issue 12, December 2018 – С. 1224–1231.

6 **Tecle, S. I., & Ziuzev, A. A.** Review on Sucker Rod Pump Monitoring and Diagnostic System. B Proceedings – IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2019 – С. 85–88.

7 **Khakimyanov M. I., Shafikov I. N., Khusainov F. F., Semisynov R. A. and Bezryadnov E. A.** Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards / International Conference on Information Technologies in Business and Industry – 2016 – С. 2–5.

8 **Зюзев А. М.** Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме / А. М. Зюзев, М. В. Бубнов – Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – №. 4. – С. 178–187.

9 **M. S. Al-Kadem, F. T. Al-Khelaiwi, and M. A. Al-Amri.** Real-time estimation of well drainage parameters. Journal of Engineering Research, 1(2): P. 93–100, 2013.

10 **M. F. I. Ahmed and S. N. Nabil.** Automatic Well Testing and PIP Calculations Using Smart Rod Pump Controllers. In North Africa Technical Conference and Exhibition, 2012.

REFERENCES

1 **Chazhabaeva M. M.** /Analiz dinamometricheskikh kart razlichnykh sostoyanii raboty ShSNU. [Analysis of dynamometric maps of various states of operation of the RWPU] Trudy universiteta № 3 (88), 2022. – P. 144–149.

2 **Molchanov A. G.** Puti dal'neishego sovershenstvovaniya shtangovykh skvazhinnykh nasosnykh ustanovok [Ways to further improve downhole rod pumping units]/ Moskva: Spetsializirovannyi zhurnal «Burenie i neft'», 2014 g. – P. 2–4.

3 **Arbuzov V. N.** Ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh skvazhin. [Operation of oil and gas wells] Chast' 2 / V. N. Arbuzov – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012 g. – 272 p.

4 **Bubnov M. V., Zyuzev A. M.** Sredstva diagnostirovaniya oborudovaniya ustanovok shtangovykh glubinnykh nasosov [Diagnostic tools for equipment installations of rod depth pumps]/ UralENIN, FGAOU VPO «UrFU» - Konferentsiya molodykh uchenykh, 2016 – P. 2–3.

5 **Yuriy Shinyakov, Maxim Sukhorukov, Daria Torgaeva and Andrey Soldatov.** Methods and facilities for monitoring the operation of a sucker rod pump/ International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume 9, Issue 12, December 2018 – P. 1224–1231.

6 **Tecle, S. I., & Ziuzev, A. A.** Review on Sucker Rod Pump Monitoring and Diagnostic System. V Proceedings – IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2019 – P. 85–88.

7 **Khakimyanov M. I., Shafikov I. N., Khusainov F. F., Semisynov R. A. and Bezryadnov E. A.** Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards / International Conference on Information Technologies in Business and Industry – 2016 – P. 2–5.

8 **Zyuzev A. M.** Diagnostika uravnoveshennosti shtangovoi glubinnoi nasosnoi ustanovki po vattmetrogramme [Diagnostics of the balance of the rod deep pumping unit according to the wattmetrogram]/ A. M. Zyuzev, M. V. Bubnov – Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2019. – T. 330. – №. 4. – P. 178–187.

9 **M. S. Al-Kadem, F. T. Al-Khelaiwi, and M. A. Al-Amri.** Real-time estimation of well drainage parameters. Journal of Engineering Research, 1(2): P. 93–100, 2013.

10 **M. F. I. Ahmed and S. N. Nabil.** Automatic Well Testing and PIP Calculations Using Smart Rod Pump Controllers. In North Africa Technical Conference and Exhibition, 2012.

М. М. Чажабаева, А. З. Букаева, А. С. Мадиярова,
Г. С. Мамбеталиева, К. С. Рзаева
Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті, Қазақстан Республикасы, Ақтау қ.

ШТАНГАЛЫҚ ҰҢҒЫМА СОРҒЫ ҚОНДЫРҒЫСЫ (ШҰСҚ) ЖҰМЫСЫНЫҢ ӘРТҮРЛІ ЖАҒДАЙЛАРЫНЫҢ ДИНАМОМЕТРЛІК КАРТАЛАРЫН ТАЛДАУ

Мақалада штангілі ұңғымалық сораптық қондырғының әртүрлі жұмыс жағдайларын динамометриялық карталар арқылы талдау қарастырылады. Динамометриялық карталар штангілі сораптың жұмысын егжей-тегжейлі бақылауға мүмкіндік береді: газдың әсері, сұйықтық соққылары, клапанның герметикалығының бұзылуы, полирленген штоктың иілу әсері және штанганың үзілуі сияқты ақауларды анықтауға болады. Сұйықтық

соққылары сорғының ығыстыру жылдамдығы мен резервуардан сұйықтық шығарылу өнімділігінің сәйкессіздігінен туындайды, бұл шамадан тыс перекачкаға алып келеді. Нәтижесінде сорғы механикалық зақымдануы мүмкін, себебі прогиб пен тозу артады. Жиі кездесетін ақаулардың бірі — бұл айдау клапанының немесе плунжердің герметикалық болмауы. Впусктық клапанның ағуы кезіндегі динамометриялық картаның пішінін түсіну үшін, ұңғыманың динамометриялық картасы жүктемені плунжердің үстіндегі орын ауыстыруға байланысты көрсететінін ескеру керек. Сондықтан, впусктық клапанның ағып кетуі плунжердегі жүктемеге оның әсерін көрсетеді. Насос ішінде газдың шамадан тыс жиналуы газды толығымен бітеп тастайтын жағдайға алып келуі мүмкін, мұнда газ сорғының жұмысын тоқтатып, впусктық және нагнетательдік клапандар жабық күйде қалады. Плунжердің төмен және жоғары орын ауыстыруы да осы жағдайға әсер етеді, себебі ағып кетулер клапандардың тиімді жұмысын бұзады және сорғының өнімділігіне кері әсерін тигізеді. Ақауы бар жылтыратылған өзек әдетте оның иілуімен сипатталады. Бұл иілу ұңғыма сағасының өзегі мен май қорабы арасында айтарлықтай үйкеліс тудырады. Мұндай үйкеліс мұнайдың аузынан ағып кетуіне немесе тіпті жылтыратылған өзектің сынуына әкелуі мүмкін. Мұнайдың тұтқырлығының жоғарылауы проблемаларды тудыруы мүмкін, бұл сорғының жұмысын қиындатады, бұл «бітелген сорғы»әсерін тудырады.

Кілтті сөздер: сорғы, динамометр, плунжер, айдау клапаны, кіріс клапаны, сұйықтық, сорғы картасының пішіні, жылтыратылған шток.

М. М. Чажабаева, А. З. Букаева, А. С. Мадиярова,
Г. С. Мамбеталиева, К. С. Рзаева
Каспийский университет технологии и инжиниринга имени Ш. Есенова, г. Актау

АНАЛИЗ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКИХ КАРТ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ РАБОТЫ ШТАНГОВОЙ СКВАЖИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ (ШСНУ)

В статье рассматривается анализ различных условий работы штанговой скважинной насосной установки с помощью динамометрических карт. Динамометрические карты позволяют детально отслеживать работу штангового насоса: можно выявить такие дефекты, как воздействие газа, удары жидкости, нарушение герметичности клапана, эффект изгиба полированного штока и разрыв штока. Удары жидкости вызваны несоответствием скорости вытеснения насоса и производительности удаления жидкости из резервуара, что приводит к чрезмерной перекачке. В результате насос может получить механическое повреждение из-за увеличения прогиба и износа. Одним из наиболее распространенных дефектов является отсутствие герметичности нагнетательного клапана или плунжера. Чтобы понять форму динамометрической карты при утечке впускного клапана, необходимо учитывать, что динамометрическая карта скважины показывает нагрузку в зависимости от смещения над плунжером. Следовательно, утечка впускного клапана указывает на его влияние на

нагрузку на плунжер. Чрезмерное скопление газа внутри насоса может привести к ситуации, когда газ полностью забивается, когда газ перестает работать, а впускные и нагнетательные клапаны остаются закрытыми. Низкое и высокое смещение плунжера также влияет на это состояние, поскольку утечки нарушают эффективную работу клапанов и отрицательно влияют на производительность насоса. Полированный шток, который имеет неисправность, обычно характеризуется его изгибом. Этот изгиб вызывает значительное трение между штоком и сальниковой коробкой устья скважины. Такое трение может привести к утечке нефти из устья или даже к поломке самого полированного штока. Повышенная вязкость нефти также может вызвать проблемы, делая работу насоса более сложной, что создаёт эффект «забитого насоса».

Ключевые слова: насос, динамометр, плунжер, нагнетательный клапан, впускной клапан, жидкость, форма карты насоса, полированный шток.

МЕТАЛЛУРГИЯ

ҒТАМР 53.31.15

А. М. Аубакиров[1], *Л. Б. Толымбекова[2], А. Г. Калиакпаров[3]
Ю. Е. Капелюшин[4], Х. Б. Теміртас[5]
[1,2,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[3]ERG Capital Projects, Қазақстан Республикасы, Астана қ.
[4]Оңтүстік-Орал мемлекеттік университеті, Ресей федерациясы, Челябинск қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3775-655X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3785-7943
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2394-3127
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3352-1780
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6580-2085
*e-mail: lyazattolymbekova@gmail.com

ФЕРРОҚОРЫТПА ӨНЕРКӘСІБІНДЕ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРҒЫШТАР АЛУ ҮШІН КҮЙДІРГЕНДЕ ӘЛСІЗ БІРІГЕТІН КӨМІРДЕН ЖАСАЛҒАН КӨМІР ШИКІҚҰРАМЫНЫҢ ҚҰРАМЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада ферроқорытпа өнеркәсібінде қолданылатын тиімді тотықсыздандырғыштарды алу үшін күйдіргенде әлсіз бірігетін газ көмірін ұзақ жалыды күйдіргенде бірікпейтін көмірмен бірге пайдалану мүмкіндігі қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – алынған кокстың қажетті физика-химиялық сипаттамаларын қамтамасыз ететін көмір шикіқұрамның компоненттерінің оңтайлы арақатынасын анықтау. Термогравиметриялық және дифференциалды-термиялық зерттеулер жүргізілді, бұл күйдіргенде бірікпейтін көмірдің үлесі мен массаның жоғалу көрсеткіштері, жылу әсерлері, құрылымдық беріктік, реактивтілік (CRI) және реакциядан кейінгі беріктік (CSR) арасындағы байланысты анықтауға толықтай мүмкіндік берді. Көмірдің эксперименттік жолмен алынып, қарастырылатын қоспалары термиялық өңдеуден өтіп, содан кейін кокстың беріктік сипаттамалары бағаға алынды. Күйдіргенде бірікпейтін көмір құрамының артуы кокстың шығымдылығының және оның беріктік сипаттамаларының төмендеуіне әкелетіні анықталды, ал аз күйдіргенде әлсіз бірігетін көмір құрамы 75–100 % деңгейінде қоспалар ферроқорытпа өнеркәсібінде беріктігі мен қолдануға жарамдылығы бойынша ең оңтайлы көрсеткіштерді көрсетеді. Атап айтқанда, мақалада ұсынылған нәтижелер отандық көмірді пайдалану перспективасын растайды және импорттық кокс тәуелділігін төмендетуге, сонымен қоса, жергілікті көмір ресурстарын пайдалану тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін берілген қасиеттері бар тотықсыздандырғыштарды алу технологиясын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: көмір, тотықсыздандырғыш, кокс, ферроқорытпа өндірісі, күйдіргенде әлсіз бірігетін көмір, күйдіргенде бірікпейтін көмір.

Кіріспе

Балама шикізатты іздеу оларды қолданудың мүмкіндігі мен орындылығын негіздеу үшін егжей-тегжейлі және сапалы зерттеулермен бірге жүреді, бұл дәстүрлі пайдаланылатын шикізат базасының жетіспеушілігі немесе сарқылуы мәселесін шешуге, сондай-ақ қымбат импорт жағдайында экономикалық шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

Республиканың қара металлургиясының, атап айтқанда ферроқорытпа өндірісінің шикізат базасы бүгінгі күні өз шикізатынан қорытпаларды толығымен өндіру мүмкіндігі үшін үлкен әлеуетке ие. Алайда, тәжірибе көрсеткендей, қалпына келтіру процестері үшін Ресей мен Қытайдың кокстары отандық кокстан басқа қолданылады. Бүгінгі таңда ERG құрамына кіретін «Шұбаркөл Көмір» АҚ жобалық қуатқа қол жеткізгенімен, қалпына келтірушілердің дәстүрлі түрлеріне балама іздеу мәселесі де өзекті болып қала береді [1–6].

Алдыңғы жұмыстарда біз ұзақ жалынды көмірмен байланысты арнайы кокс алу үшін күйдіргенде әлсіз бірігетін газ көмірін пайдалану мүмкіндігі туралы мәселені қарастырдық [7–9].

Бұл жұмыста оңтайлы арақатынасты анықтау үшін оларды араластыру нәтижесінде күйдіргенде әлсіз бірігетін және күйдіргенде бірікпейтін көмірді термогравиметриялық талдау бойынша деректер, сондай-ақ беріктік сипаттамалары мен реактивтілік деректері ұсынылған, бұл оларды әрі қарай қолданудың перспективалылығы мен орындылығын бағалауға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістері

Зерттеуде күйдіргенде әлсіз бірігетін газ (ӘБ) көмірлер концентрациясының келесі шектері таңдалды, % : 100, 85, 75, 65, 55. Оларды араластыру үшін күйдіргенде бірікпейтін ұзын жалынды көмірлер қолданылды. Тәжірибелік қоспаларды термиялық өңдеу процесін зерттеу «Lonroy» фирмасының Synchronous Thermal Analyzer TG-DTA/DSC дериватографында жүргізілді. Термиялық өңдеу процесін зерттеу динамикалық режимде 30 мл/мин шығыны бар азоттың инертті ортасында 10ºС/мин қыздыру жылдамдығымен 30-дан 1200 ºС дейінгі температура аралығында жүргізілді. Дериватографтың жұмыс принципі жылу эффектілерінің айырмашылығын, зерттелетін заттың массасының Al_2O_3 ретінде пайдаланылған эталонға қатысты өзгеруін салыстыруға негізделген. Талдау кезінде массаның өзгеруі (TG), температураның өзгеру жылдамдығы (DTG) және жылу әсерінің айырмашылығы (DTA) туралы мәліметтер жазылды.

Сыналатын көмірлер мен олардың қоспаларына техникалық талдау 1-кестеде келтірілген. Күйдіргенде әлсіз бірігетін газ көмірі «ӘБ» қысқаруымен белгіленді, сандық деректер олардың қоспадағы пайызын сипаттайды. Араластыру үшін «БҰ» белгісімен күйдіргенде бірікпейтін ұзын жалынды көмірлер қолданылды.

1-кесте – Көмір сапасының сипаттамасы

№	Материал атауы	Құрамы, %		
		A	W	V
1	БҰ	1,84	5,83	45,39
2	ӘБ -100	6,62	3,41	36,72
3	ӘБ -85	6,22	5,38	37,84
4	ӘБ -75	6,64	6,08	38,19
5	ӘБ -65	7,26	5,25	38,58
6	ӘБ -55	6,89	5,50	40,01

Дериватографты пайдалана отырып, сыналатын көмірдің физика-химиялық қасиеттерін зерттеу «Металлургия» кафедрасының зертханасы, «Торайғыров университеті» КЕАҚ жағдайында жүргізілген зерттеулермен бекітілді.

0-3 мм фракциялық шихта ұсақтау және ұнтақтау арқылы алынды. Әрі қарай, берілген пропорцияларда шихта мұқият араластырылып, болат тигельге орналастырылды. Содан кейін контейнер электр муфель пешіне түсірілді. Пештің максималды температурасы – 1150 °С, кокстеу уақыты – 150 мин. осы температураға жеткеннен кейін пеште ұстау 30 мин, содан кейін салқындату болды.

Салқындағаннан кейін кокстың гранулометриялық құрамы 1,8 м биіктіктен түсірілгенге дейін және кейін анықталды. Гранулометриялық құрамы мен құрылымдық беріктігі МЕСТ 2093-82 және МЕСТ 9521-2017 стандарттарын қолдана отырып анықталды. Тотықсыздандырғыштардың беріктік сипаттамалары ауаға қол жеткізбестен (құрғақ әдіс) сөндірілгеннен кейін зерттелді.

Бұдан әрі МЕСТ 54250 – 2010 «Кокстың реактивтілігін (CRI) және реакциядан кейінгі кокстың беріктігін (CSR) анықтау» стандарттарын қолдана отырып, реакциядан кейінгі реактивтілік (CRI) және реакциядан кейінгі беріктік (CSR) анықталды.

CRI (Coke Reactivity Index) және CSR кокстың «ыстық» беріктігі (Coke Strange after Reaction) көрсеткіштері кокстың физика-химиялық қасиеттерін зерттеудің маңызды және басым бағыттары болып табылады. Әдеттегі металлургиялық кокстарда реактивтілік көрсеткіштері арнайы кокстардан төмен және CRI = 22 ÷ 25 % шегінде болады, дегенмен олар жоғары ыстық күшке ие CSR = 62 ÷ 67 %, олар домна өндірісі үшін қолайлы, бірақ ферроқорытпа үшін емес. Әрине, бүгінгі күні мұндай тотықсыздандырғыштар белсенді қолданылады және оларды ферроқорытпалар өндірісінде қолдану қолайлы техникалық құрамға және зиянды қоспалардың аз болуына, сондай-ақ реактивтілік пен электр кедергісінің жоғары көрсеткіштері бар арнайы тотықсыздандырғыштардың тапшылығына байланысты.

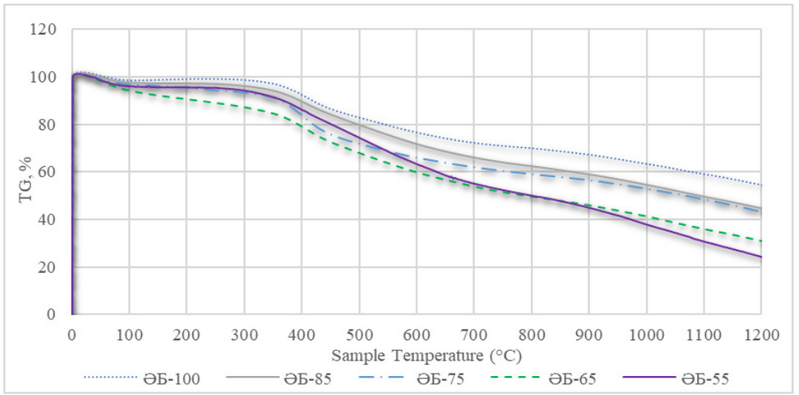
Салмағы 200 г сынамаларды реактор камерасына салып, азот атмосферасында 1100 °С температураға дейін қыздырды. Әрі қарай, азоттың орнына 120 минут ішінде CO_2 берілді, содан кейін камераны салқындату N_2 атмосферасында 50 °С дейін жүргізілді. Реактивтілік (CRI) CO_2 реакциясына дейін және одан кейін үлгі бөлігінің массалық айырмашылығымен анықталды. Реакциясыз кокс қалдығы

барабанда 20 айн/мин жылдамдықпен өңделді. Реакциядан кейінгі кокстың беріктік көрсеткіші (CSR) тесіктер өлшемі 10,0 немесе 9,5 мм болатын електе қалған кокты себу және өлшеу арқылы анықталады.

Сапалы тотықсыздандырғыштарды алу үшін көмірдің оңтайлы арақатынасын анықтауға физика-химиялық және физика-механикалық қасиеттерін егжей-тегжейлі зерттеу арқылы қол жеткізуге болады, ал төменде келтірілген нәтижелер оларды ферроқорытпаларды балқыту үшін одан әрі пайдалану перспективасы мен мүмкіндігін бағалауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

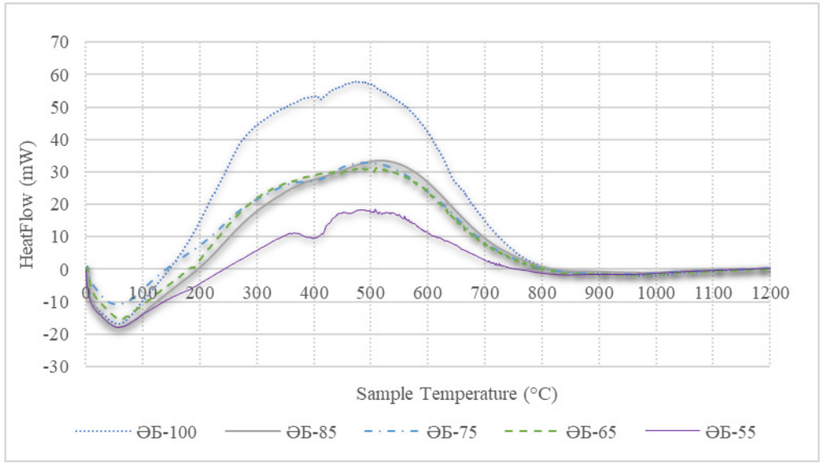
1-суретте келтірілген дене салмағының өзгеруі (TG) деректері күйдіргенде бірікпейтін көмірдің үлесі артқан кезде кокс қалдығы массасы бойынша айтарлықтай төмендейтінін көрсетеді, бұл ұшпа компоненттердің көп болуын көрсетеді.



1-сурет – Зерттелетін үлгілердің массасының жоғалуы

Массаның едәуір жоғалуы көмірінің үлесі 45 %-ға дейін өскен кезде байқалады, ал керісінше, ӘБ көмірінің үлесі жоғары қоспалар массаның аз жоғалуымен сипатталады, бұл олардың термиялық ыдырауға төзімділігін көрсетеді.

Дифференциалды термиялық талдау нәтижесінде алынған жылу әсерлері (DTA) салыстырылды және 2-суретте көрсетілген.



2-сурет – Зерттелетін көмірдің жылу әсері

Барлық дерлік термиялық эндотермиялық шыңдар (~86–97 °C) барлық үлгілер үшін тұрақты, бұл гигроскопиялық ылғалды кетіру процесіне сәйкес келеді, бірақ БҰ көмірдің үлесінің жоғарылауымен тереңірек эндотермиялық жылу әсері байқалады, бұл бастапқы қыздыру кезеңіндегі белсенді процестерді көрсетеді. Сондай-ақ, көмірдің ӘБ мөлшері төмендеген кезде жылу әсері айтарлықтай төмендейді (ӘБ -100 көмірі үшін 57,82 мВт-тан 18,65 МВт ӘБ-55 көміріне дейін), бұл қоспаны агломерациялау кезінде жылу шығарудың төмендеуін көрсетеді.

Жалпы, зерттелетін көмірдің термиялық шыңдары оларды Кокс алу үшін пайдалану мүмкіндігін көрсетеді. Көмірдің ӘБ үлесі артқан кезде:

БҰ көмірімен салыстырғанда ӘБ көмірінің термиялық тұрақтылығы, бұл ұшпа компоненттердің салыстырмалы түрде аз болуымен байланысты;

бастапқы қыздыру сатысында көмірдің көп мөлшері бар қоспада неғұрлым белсенді процестерді көрсететін жылу эндотермиялық әсерлердің төмендеуі;

қоспадағы ӘБ көмірінің үлесінің жоғарылауымен экзотермиялық шыңдардың қарқындылығы артады, бұл көмірдің ыдырауы мен агломерациясындағы неғұрлым белсенді физика-химиялық процестерді көрсетеді, бұл сонымен қатар қыздыру кезінде жоғары белсенділік пен калориялық құндылықты көрсетеді.

Зерттелетін көмірдің физика-химиялық қасиеттерін зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, кокстеу бойынша зертханалық сынақтар жүргізілді. Көмірдің ӘБ және олардың қоспаларының сапалық сипаттамалары 2 кестеде келтірілген.

2-кесте – Алынған үлгілердің сапалық сипаттамасы

Сынақ №	Материалдың атауы, %	Құрамы, %		
		A	W	V
1	ӘБ-100	13,34	0,12	0,36
2	ӘБ-85	10,59	4,78	2,86
3	ӘБ-75	12,57	0,12	1,03
4	ӘБ-65	12,15	0,35	0,65
5	ӘБ-55	11,75	0,26	0,78

Жалпы алғанда, алынған үлгілердің техникалық талдауы ферроқорытпа өнеркәсібінде қолданылатын тотықсыздандырғыштарға қойылатын талаптарға сәйкес келеді. Әдетте, ферроқорытпаларды өндіру үшін күл 11–13 % құрайды, кейде 15 % дейін рұқсат етіледі, бірақ шектеулі мөлшерде.

3-кестеде 1,8 м биіктіктен бір рет түсіруге дейін және кейін зерттелетін үлгілердің гранулометриялық құрамы көрсетілген.

3-кесте – Зерттелетін үлгілердің гранулометриялық құрамы

Көрсеткіштің атауы	Ірілік класы, мм	Материал, %				
		ӘБ-100	ӘБ-85	ӘБ-75	ӘБ-65	ӘБ-55
Пештен шыққаннан кейін сөндірілген кокс	> 25	54,8	57,1	56,5	43,2	38
	15-25	36,5	35,3	28,1	20,0	14,4
	< 15	8,7	7,6	15,4	36,8	47,6
	Жалпы	100	100	100	100	100
Кокс 1,8 м биіктіктен түсірілгеннен кейін	> 25	23,1	24,4	21,8	16,5	14,2
	15-25	54,6	57,9	51,9	48,7	46,5
	< 15	22,3	17,7	26,3	34,8	39,3
	Жалпы	100	100	100	100	100

Күйдіргенде бірікпейтін көмірдің үлесінің артуы, күткендей, аз берік жақтаудың пайда болуына әкеледі. Құрамында күйдіргенде әлсіз бірігетін көмірдің 75 %-дан азы бар үлгілерді 1,8 метрден түсіру кезінде ұсақ заттың түзілу үлесі артады, негізінен 3 мм және одан аз фракцияларда.

Құрылымдық беріктік ферроқорытпа өнеркәсібінде қолданылатын көміртекті тотықсыздандырғыштардың негізгі беріктік сипаттамасы болып табылады. Әдетте олардың мәндері 45–55 % аралығында болады [10].

4-кестеде тәжірибе үлгілерінің құрылымдық беріктік сипаттамалары туралы мәліметтер келтірілген.

4-кесте – Тәжірибе үлгілерінің құрылымдық беріктік сипаттамалары

Көрсеткіштер	Материал				
	ӘБ-100	ӘБ-85	ӘБ-75	ӘБ-65	ӘБ-55
Құрылымдық беріктік ($П_к$), %	81.1	78,5	71,7	56,4	44,1

Алынған деректерді талдау ең үлкен құрылымдық беріктікті (Пк) ӘБ-100 көмірінен алынған кокс көрсететінін білдіреді. Қоспадағы күйдіргенде бірікпейтін көмірдің (БҰ) үлесінің артуымен беріктік көрсеткіштері төмендейді. Мысалы, құрамында күйдіргенде бірікпейтін көмірдің ең көп үлесі бар ӘБ-55 үлгілерінде ӘБ-100-мен салыстырғанда құрылымдық беріктіктің айтарлықтай төмендеуі байқалады. Бұл пісірілмеген көмірлер кокстың аз берік қаңқасын құрайтындығын растайды, бұл оның металлургиялық өндірісте қолданылуына теріс әсер етуі мүмкін.

Жалын көмірінің 75 %-дан астамы бар кокстардың құрылымдық беріктігі жоғары, бұл оларды металлургиялық өндірісте қолдану үшін қолайлы етеді.

Реактивтілікті зерттеу үшін ӘБ-100, ӘБ-85, ӘБ-75, ӘБ-65, ӘБ-55 арнайы кокстарынан алынған үлгілер іріктеліп алынды, ал салыстыру үшін Шұбаркөл кен орнының күйдіргенде бірікпейтін ұзын жалынды көмірінен (БҰ) алынған кокс пайдаланылды.

Тәжірибе үлгілерінің реактивтілік қасиеттері 5-кестеде келтірілген.

5-кесте – Тәжірибе үлгілерінің реактивтілік қасиеттері

Көрсеткіштер	Кокс					
	БҰ	ӘБ-100	ӘБ-85	ӘБ-75	ӘБ-65	ӘБ-55
МЕСТ Р 54250-2010 бойынша көрсеткіштер, %:						
Реактивтілік қасиеті, CRI	73,5	74,9	75,5	71,8	73,1	72,6
Реакциядан кейінгі беріктік, CSR	24,5	26,7	25,8	23,6	16,7	16,1

CRI көрсеткіштері кокстың көмір құрамына байланысты 71,8 %-дан 75,5 %- ға дейін өзгереді. ӘБ және БҰ мөлшерінің жоғарылауы немесе төмендеуі ерекше өзгерістерге әкелмейді: барлық үлгілердің реактивтілігі жоғары, бұл көміртектенудің ерте сатысымен және ұшпа компоненттердің жоғары құрамымен сипатталатын көмірдің ерекшелігінен туындаған.

Реакциядан кейінгі беріктік көрсеткіштері (CSR) белгілі бір тәуелділікті көрсетеді – күйдіргенде бірікпейтін көмірдің жоғарылауымен CSR айтарлықтай төмендейді, бұл кокстың реактивтілігінің жоғарылауымен оның реакциядан кейінгі механикалық жүктемелерге төзімділігі төмендейтіндігімен түсіндіріледі. CSR-дің күрт төмендеуі ӘБ-65 және ӘБ-55-те байқалады, бұл оларды реакциядан кейін кокстың жоғары беріктігін қажет ететін жағдайларда қолдануға артықшылық бермейді. Салыстыра айтқанда, жоғары сапалы металлургиялық кокстардың реактивтілігі төмен CRI = 22–25 % және жоғары «ыстық» беріктігі CSR = 62–67 %, ал ең төмен сапалы металлургиялық (домендік) кокстардың реактивтілігі CRI = 38–46 % және «ыстық» беріктігі CSR = 44–48 %

Қаржыландыру туралы ақпарат

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінен гранттық қаржыландыру шеңберінде қаржыландырылатын ЖТН № AP25796225 жобасын іске асыру барысында алынған нәтиже болып табылады.

Қорытынды

Ферроқорытпа өнеркәсібінде тотықсыздандырғыштарды өндіру үшін аз тұтанатын және күйдіргенде бірікпейтін көмір қоспаларын термиялық өңдеудегі физика-химиялық процестерді зерттеу мынадай қорытынды жасауға мүмкіндік береді:

Көмір қоспаларын термиялық өңдеу компоненттердің арақатынасының қыздыру кезінде болатын процестерге айтарлықтай әсерін анықтады. Күйдіргенде бірікпейтін көмірлер үлесінің өзгеруі ұшпа заттар мен кокс қалдықтарының шығымдылығының өзгеруіне, сондай-ақ эндо- және экзотермиялық әсерлердің өзгеруіне әкеледі. Атап айтқанда, күйдіргенде бірікпейтін көмірлер үлесінің ұлғаюы ұшпа заттардың шығымдылығының артуына ықпал етеді (көмірлер үлесінің 45 %-ға дейін ұлғаюымен, массаның жоғалуы артады) және бастапқы қыздыру сатысында эндотермиялық процестерді күшейтеді (көмірлер үлесінің ұлғаюымен эндотермиялық әсер тереңдігінің артуы), ал күйдіргенде әлсіз бірігетін көмірлер үлесінің артуы термиялық ыдырауға төзімділікті (ӘБ көмірдің массасының жоғалуының азаюы) және экзотермиялық реакциялардың қарқындылығын (экзотермиялық шыңдардың қарқындылығының жоғарылауы) арттырады.

Көмірдің арақатынасы кокстың гранулометриялық құрамы мен құрылымдық беріктігіне айтарлықтай әсер етеді. Күйдіргенде бірікпейтін көмірлер үлесінің ұлғаюы кокс беріктігінің төмендеуіне және үстіден тастау сынақтары кезінде ұсақ фракциялардың шығымдылығының артуына әкеледі (1,8 метрден төмен үлгілерде үстіден тасталғанда, олардың құрамында күйдіргенде әлсіз бірігетін көмірдің 75 %-дан азы ұсақ заттардың пайда болу үлесін арттырады), ал күйдіргенде әлсіз бірігетін көмірдің көп мөлшері бар кокстар жоғары құрылымдық беріктікті (құрылымдық беріктік (Пк) ӘБ-100 көмірінен алынған кокс 81,1 % құрайды) көрсетеді.

Кокстың реактивтілігі (CRI) қоспадағы көмірдің арақатынасына салыстырмалы түрде әлсіз тәуелді және зерттелген барлық үлгілер үшін жоғары болып қалады (CRI 71,8 %-дан 75,5 %-ға дейін өзгереді). Сонымен қатар, кокстың реакциядан кейінгі беріктігі (CSR) күйдіргенде бірікпейтін көмірдің үлесінің жоғарылауымен айтарлықтай төмендейді, бұл кокстың реакциядан кейінгі механикалық жүктемелерге төзімділігінің төмендеуін (CSR ӘБ-100 үшін 26,7 %-дан ӘБ-55 үшін 16,1 %-ға дейін төмендейді) көрсетеді.

Әлсіз тұталатын және күйдіргенде бірікпейтін көмірдің арақатынасын оңтайландыру қажетті қасиеттер кешенімен кокс алу үшін шешуші фактор болып табылады. Кокстың жоғары беріктігі мен реактивтілігіне қол жеткізу үшін оны ферроқорытпа өндірісінде қолдану үшін құрамында 75 % және одан жоғары әлсіз тұталатын көмір бар қоспаларды қолдану ұсынылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Исагулов, А. З., Орлов, А. С., Ким, С. В., Мишо, Ж., Толымбеков, М. Ж.** Исследование физико-химических и технологических свойств высокозольного угля Борлинского месторождения // Труды Университета. – 2018. – № 3 (72). – С. 55–58.

2 **Romazanov, Zh., Silayeva, O., Tatieva, M., Latypova, M., Petrovskaya, A.** Feasibility study of the creation of a special coke production in Kazakhstan // Metalurgija. – 2023. – № 1 (62) – P. 161–163.

3 **Etemadi, A., Koohestani, H., Tajally, M.** The effect of different carbon reductants on the production of ferrosilicon 75% on an industrial scale in an electric arc furnace // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – № 3. – https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13956.

4 **Kim, V. A., Tolymbekov, M. Zh., Privalov, O. E., Osipova, L. V., Kudarinov, S. Kh.** Carbon-based reducing agents for ferroalloy production in Kazakhstan // Steel in Translation. – 2010. – Vol. 40. – № 10. – P. 918–922.

5 **Strakhov, V. M., Kaliakparov, A. G., Kariev, A. D., Zhumagulov, M. G., Nikiforov, A. S.** Industrial investigation of thermooxidative coking on interlinked gratings // Coke and Chemistry. – 2008. – №. 51. – P. 178–183. – https://doi.org/10.3103/S1068364X08050050.

6 **Aubakirov, A. M., Kaliakparov, A. G., Tolymbekova, L. B.** Determination of the quality of special coke as a result of heat treatment of coal from the Shubarkol field // Complex Use of Mineral Resources. – 2023; – Vol. 326. – № 3. – P. 96–106. – https://doi.org/10.31643/2023/6445.33.

7 **Аубакиров, А. М., Калиакпаров, А. Г., Толымбекова, Л. Б., Капелюшин, Ю. Е., Ким, С. В.** Анализ и оценка качества сырьевой базы для производства специальных видов кокса // Наука и техника Казахстана. – 2022. – №3. – P. 76–85. – https://doi.org/10.48081/HMWS9874.

8 **Aubakirov, A. M., Tolymbekova, L. B., Kaliakparov, A. G., Khoshnaw, F., Kulumbaev, N. K.** Production of special coke from low-caking coals used in the ferroalloy industry // Наука и техника Казахстана. – 2024. – №1. – P. 138–149. – https://doi.org/10.48081/LDCU7796.

9 **Aubakirov, A. M., Tolymbekova, L. B., Kaliakparov, A. G., Temirtas, Kh. B., Khoshnaw F.** Research of moisture capacity and the process of water saturation of a special coke // Наука и техника Казахстана. – 2024. – №2. – P. 131–141. – https://doi.org/10.48081/RKRP8312.

10 **Толымбекова, Л. Б.** Разработка технологии выплавки ферросиликомарганца из окомкованного высококремнистого марганцевого сырья: дис. … канд. техн. наук: 05.16.02. – Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН, 2014. – 114 с.

REFERENCES

1 **Isagulov, A. Z., Orlov, A. S., Kim, S. V., Misho, Zh., Toly`mbekov, M. Zh.** Issledovanie fiziko-ximicheskix i texnologicheskix svojstv vy`sokozol`nogo uglya Borlinskogo mestorozhdeniya [Investigation of physico-chemical and technological properties of high-ash coal from the Borlinsky deposit]. Trudy` Universiteta. – 2018. – № 3 (72). – P. 55–58.

2 **Romazanov, Zh., Silayeva, O., Tatieva, M., Latypova, M., Petrovskaya, A.** Feasibility study of the creation of a special coke production in Kazakhstan // Metalurgija. – 2023. – № 1 (62) – P. 161–163.

3 **Etemadi, A., Koohestani, H., Tajally, M.** The effect of different carbon reductants on the production of ferrosilicon 75% on an industrial scale in an electric arc furnace // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – № 3. – https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13956.

4 **Kim, V. A., Tolymbekov, M. Zh., Privalov, O. E., Osipova, L. V., Kudarinov, S. Kh.** Carbon-based reducing agents for ferroalloy production in Kazakhstan // Steel in Translation. – 2010. – Vol. 40. – № 10. – P. 918–922.

5 **Strakhov, V. M., Kaliakparov, A. G., Kariev, A. D., Zhumagulov, M. G., Nikiforov, A. S.** Industrial investigation of thermooxidative coking on interlinked gratings // Coke and Chemistry. – 2008. – №. 51. – P. 178–183. – https://doi.org/10.3103/S1068364X08050050.

6 **Aubakirov, A. M., Kaliakparov, A. G., Tolymbekova, L. B.** Determination of the quality of special coke as a result of heat treatment of coal from the Shubarkol field // Complex Use of Mineral Resources. – 2023; – Vol. 326. – № 3. – P. 96–106. – https://doi.org/10.31643/2023/6445.33.

7 **Aubakirov, A. M., Kaliakparov, A. G., Toly`mbekova, L. B., Kapelyushin, Yu. E., Kim, S. V.** Analiz i ocenka kachestva sy`r`evoj bazy` dlya proizvodstva special`ny`x vidov koksa [Analysis and evaluation of the quality of the raw material base for the production of special types of coke]. Nauka i texnika Kazaxstana. – 2022. – № 3. – P. 76–85. – https://doi.org/10.48081/HMWS9874.

8 **Aubakirov, A. M., Tolymbekova, L. B., Kaliakparov, A. G., Khoshnaw, F., Kulumbaev, N. K.** Production of special coke from low-caking coals used in the ferroalloy industry // Наука и техника Казахстана. – 2024. – №1. – P. 138–149. – https://doi.org/10.48081/LDCU7796.

9 **Aubakirov, A. M., Tolymbekova, L. B., Kaliakparov, A. G., Temirtas, Kh. B., Khoshnaw F.** Research of moisture capacity and the process of water saturation of a special coke // Наука и техника Казахстана. – 2024. – №2. – P. 131–141. – https://doi.org/10.48081/RKRP8312.

10 **Toly`mbekova, L. B.** Razrabotka texnologii vy`plavki ferrosilikomargancza iz okomkovannogo vy`sokokremnistogo margancevogo sy`r`ya [Development of technology for smelting ferrosilicon manganese from pelletized high-silicon manganese raw materials]: dis. … kand. texn. Nauk : 05.16.02. – Ekaterinburg : IMET UrO RAN, 2014. – 114 c.

А. М. Аубакиров[1], *Л. Б. Толымбекова[2], А. Г. Калиакпаров[3]
Ю. Е. Капелюшин[4], Х. Б. Теміртас[5]
[1,2,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[3]ERG Capital Projects, Республика Казахстан, г. Астана;
[4]Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ ИЗ СЛАБОСПЕКАЮЩИХСЯ УГЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ В ФЕРРОСПЛАВНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статье рассматривается возможность использования слабоспекающихся газовых углей в сочетании с длиннопламенными неспекающимися углями для получения эффективных восстановителей, применяемых в ферросплавной промышленности. Целью исследования является определение оптимального соотношения компонентов угольной шихты, обеспечивающего требуемые физико-химические характеристики получаемого кокса. Проведены термогравиметрические и дифференциально-термические исследования, позволившие установить зависимости между долей неспекающихся углей и показателями потери массы, тепловыми эффектами, структурной прочностью, реакционной способностью (CRI) и прочностью после реакции (CSR). Экспериментальные смеси углей подвергались термической обработке, после чего проводилась оценка прочностных характеристик кокса. Установлено, что увеличение содержания неспекающихся углей приводит к снижению выхода кокса и его прочностных характеристик, в то время как смеси с содержанием слабоспекающихся углей на уровне 75–100 % демонстрируют наилучшие показатели по прочности и пригодности к применению в ферросплавной отрасли. Представленные результаты подтверждают перспективность использования углей отечественного происхождения и могут быть использованы для разработки технологии получения восстановителей с заданными свойствами, что позволит снизить зависимость от импортного кокса и повысить эффективность использования местных угольных ресурсов.

Ключевые слова: угли, восстановитель, кокс, производство ферросплавов, слабоспекающиеся угли, неспекающиеся угли.

A. M. Aubakirov[1], *L. B. Tolymbekova[2],
A. G. Kaliakparov[3], Yu. E. Kapelyushin[4], Kh. B. Temirtas[5]
[1,2,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[3]ERG Capital Projects, Republic of Kazakhstan, Astana;
[4]South Ural State University, Russian Federation, Chelyabinsk;

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF THE COAL CHARGE FROM LOW-BURNING COALS FOR THE PRODUCTION OF REDUCING AGENTS IN THE FERROALLOY INDUSTRY

The article considers the possibility of using low-burning gas coals in combination with long-flame non-burning coals to produce effective reducing agents used in the ferroalloy industry. The purpose of the study is to determine the optimal ratio of coal charge components that provides the required physico-chemical characteristics of the resulting coke. Thermogravimetric and differential thermal studies were carried out, which made it possible to establish the relationship between the proportion of non-burning coals and mass loss, thermal effects, structural strength, reactivity (CRI) and strength after reaction (CSR). Experimental coal mixtures were subjected to heat treatment, after which the strength characteristics of coke were evaluated. It was found that an increase in the content of non-burning coals leads to a decrease in coke yield and its strength characteristics, while mixtures with a low-burning coal content of 75–100 % demonstrate the best performance in terms of strength and suitability for use in the ferroalloy industry. The presented results confirm the prospects of using coal of domestic origin and can be used to develop a technology for producing reducing agents with specified properties, which will reduce dependence on imported coke and increase the efficiency of using local coal resources.

Keywords: coals, reducing agent, coke, ferroalloys production, low-burning coals, non-burning coals.

МРНТИ 53.39.29
DOI

А. С. Ахметов[1], Е. Н. Махамбетов[2], *Р. Т. Төлеуқадыр[3], Ж. В. Еремеева[4], А. К. Жунусов[5]
[1,2,3]Химико-металлургический институт им Ж. Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда
[4]Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ), Московский государственный институт стали и сплавов (МИСИС), Российская Федерация, г. Москва.
[5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1606-838X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8613-9932
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5402-0400
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1790-5004
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9119-9737
*e-mail: rus.toleukadyr@gmail.com

КАЧЕСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ УПРОЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОКАТНОЙ ОКАЛИНЫ

Данная статья посвящена исследованию процесса восстановления прокатной окалины – техногенного отхода, образованного на отечественном предприятии. Окалина была подвергнута измельчению без дальнейшего просева и других подготовительных операций и восстановлена в потоке водорода. Высота засыпки порошка окалины, представленной основной фракцией 0,9 – 0,315 мм, составляла 10 мм, выдержка при восстановлении 60 мин, температура 900 и 1000 ℃. В ходе и после восстановления рассмотрены качественные признаки протекания процесса, по которым можно судить о ходе процесса восстановления: по изменению цвета и объема факела, образованного в результате поджигания водорода на выходе из печи; по внешним признакам металлической губки, образованной в результате восстановления. Отсутствие этапа строгого контроля гранулометрического состава и других подготовительных операций и получение железного порошка чистотой до 95,80 % при 1000 ℃ показало потенциальную возможность адаптации данной технологии в реальной промышленности без значительных затрат на дополнительное оборудование. При полном восстановлении железных оксидов в составе железного порошка осталась тонкораспределённая в структуре порошковых частиц примесь – SiO_2, присутствующая в результате пескоструйной обработки проката для снятия окалины. Это говорит о необходимости предварительного удаления примеси для получения чистого порошка железа.

Ключевые слова: окалина, железо, железный порошок, восстановление, водород, порошковая металлургия.

Введение

Страны мира стремятся к углеродной нейтральности и к экологичному производству. Данная инициатива связана с комплексом проблем, возникающих в результате глобального потепления, вызванного выбросом парниковых газов, где значительную часть составляет CO_2. Казахстан является одним из крупнейших производителей CO_2 на душу населения, порядка 14 тонн в год, при среднемировом значении 4,7 тонн [1]. Учитывая задачу снижения парниковых газов, которую обязан выполнить Казахстан в рамках Парижского соглашения, необходимым является решение проблемы высокой углеродоемкости отечественной экономики.

Одной из таких наиболее углеродоемких отраслей является металлургия, которая ответственна за генерацию 8–10 % выбросов от всех парниковых газов [2]. Это связано как с высокой энергоемкостью, так и с применением углеродсодержащих материалов в качестве восстановителей непосредственно в металлургических процессах [3, с. 22].

Снизить количество выбросов в данном случае можно косвенно, используя электричество, генерируемое при помощи возобновляемых источников энергии. Прямое же снижение связано с использованием углеродно-нейтральных восстановителей.

В некоторых случаях к таким восстановителям можно отнести металлы, поскольку они прямо не генерируют CO_2 в ходе восстановления: алюминий, кальций, магний, кремний и т.д. Однако их получение (добыча руд данных металлов, их обогащение и восстановление) сопряжено с генерацией CO_2, и применение значительно повышает себестоимость конечных продуктов. Более экологически чистым аналогам металлам является газ – водород [4, с. 1627].

Водород в настоящее время получает все большее промышленное применение, что связано с его экологичностью и удешевлением. Ожидается, что к 2030 г он станет достаточно дешевым для широкого применения в промышленности. Этому способствует, в частности, развитие электролитического метода получения водорода из воды – практически неиссякаемого дешевого источника [5, с. 317].

Полученный таким методом водород классифицируется как «зеленый», при условиях поступления электричества из возобновляемых источников энергии, поскольку углеродного следа он производить не будет.

Применение водорода в металлургии приводит к декарбонизации, позволяет получать экологически чистую зеленую продукцию, или продукцию со значительно меньшим углеродным следом. В Казахстане планируется реализация крупнейшего проекта по производству зеленого водорода [6], что делает актуальным развитие и распространение технологий на его основе.

Вторая проблема, чьё решение реализуемо посредством применения водорода – это проблема образования твердых отходов, их накопление и неэффективная переработка в Казахстане. В частности, особый интерес вызывает прокатная окалина – техногенный отход, который образуется в результате высокотемпературной обработки стальных и железных заготовок в среде воздуха с их последующим окислением [7, с. 1548]. Чешуйчатые частицы отделяются от

поверхности, и они представляют собой смесь различных оксидов железа: Fe2O3, Fe3O4 и FeO, в зависимости от температуры и длительности нагрева на воздухе [7; 8]. Окалина также зачастую бывает замасленной и загрязненной пылью, в её составе могут находиться оксиды других легирующих металлов, входящих в состав исходных заготовок [9, с. 7].

Окалина может служить сырьем для производства губчатого железа и её порошка, который в настоящее время промышленно производят из железной руды высокой чистоты с использованием основных этапов магнитной сепарации и измельчения, процесса первичного восстановления, водородного отжига, окончательного измельчения и классификации [10, с. 161]. Притом восстановление часто проводят и при помощи углеродсодержащих восстановителей [11, с. 1004].

С учетом пока относительной дороговизны водорода остро стоит вопрос нахождения путей удешевления производства железного порошка из прокатной окалины. Перспективно прямое восстановление окалины с операцией предварительной подготовки в один этап – измельчением в короткий промежуток времени с минимальными затратами энергии и времени, без применения дальнейшего отжига или других операций с целью удаления легколетучих соединений и примесей.

Актуальным является исследование возможности получения губчатого железного порошка прямым восстановлением отечественной окалины в потоке водорода. Моделирование в лабораторных условиях общих принципов, которые будут отображены в реальном производстве, позволят рассмотреть возможность реализации такой технологии. Тем самым целью данной работы является исследование возможности восстановления прокатной окалины, образованной в Казахстанских предприятиях, в потоке водорода при условии измельчения окалины технологически простым и быстрым методом без дальнейших операций подготовки.

Материалы и методы

В качестве исходного материала была использована прокатная окалина, образованная на Казахстанском предприятии. Окалина в исходном виде состояла из смеси чешуйчатых частиц черного цвета крупностью до 30 – 40 мм, влажная и с жирным блеском, что говорит об её замасленности. Внешний вид представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид окалины

Окалина магнитится, что говорит о высоком содержании в её составе магнетита Fe_3O_4.

Было проведено измельчение окалины в шаровой вращающейся мельнице (водопадный режим измельчения, соотношение мелющих шаров к окалине 5:1, длительность измельчения 60 мин) для интенсификации процесса восстановления за счет повышения удельной поверхности частиц окалины. Восстановление проводили в потоке водорода чистотой 99,999 % при расходе 510 мл/мин в трубчатой печи при температуре 900 и 1000 ℃.

После проводили анализ химического состава методами мокрой химии. Была исследована морфология и технологические свойства полученных порошков. На растровом электронном микроскопе ZEPTOOLS Z20 с установкой для энергодисперсионной спектроскопии исследовали частицы восстановленного железного порошка.

Результаты и обсуждение

Был определен гранулометрический состав исходной и измельченной окалины. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение гранулометрического состава исходной и измельченной окалины по фракциям

Фракция, мм	Исходная, %	Измельченная, %
+ 10	8	0
- 10 + 7,5	10	0
-7,5 +5	43	0
-5 +3	30	0
-3 +2,5	2	0
-2,5 +1,25	1	0
-1,25 +0,9	2	5
-0,9 +0,63	3	60
-0,63 +0,315	1	30
-0,315 -0,16	0	4
-0,16 +0,08	0	1
-0,08 +0,071	0	0
-0,071	0	0

Большая часть окалины в исходном виде представлена чешуйчатыми крупными частицами размером < 10 мм. После одного этапа измельчения размер частиц был представлен основной фракцией 0,9 – 0,315 мм. Можно предположить, что такая фракция является удовлетворительной как с точки зрения достаточности удельной поверхности для интенсивного процесса восстановления, так и с точки зрения обеспечения относительно высокой насыпной плотности, которая необходима для загрузки большего количество порошка в лодочку для дальнейшего восстановления [12; 13].

Процесс восстановления проводили при 900 и 1000 ℃, с повторением эксперимента по три раза при каждой температуре. Измельченную окалину загружали в лодочку. Высота засыпки составляла 10 мм. Лодочку загружали в холодную трубчатую печь, в которой был поток водорода. На выходе из печи водород поджигали и образовывался бесцветный факел, чье наличие определяли установкой асбестовой нити в зону образования факела. Печь нагревали со скоростью 10 ℃/мин, пламя по ходу нагрева приобретало оранжевый и красный цвет.

Данные качественные наблюдения позволяют судить о процессах, происходящих с материалом в лодочке. Так, факел чистого водорода прозрачен для невооруженного взгляда, так как находится за пределами видимого спектра света [14, с. 300]. В дальнейшем, когда пыль, масло, влага и легколетучие соединения, которыми может быть загрязнена поверхность окалины, начинают удаляться с повышением температуры, факел окрашивается в более характерные оранжевые и красные цвета.

Параллельно происходит восстановление и самих оксидов железа, в основном, по известной цепочке [12; 15] (1):

$$Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$$

При дальнейшем нагреве, с достижением 850 ℃, наблюдали резкое увеличение факела и окрашивание в ярко-красный цвет, что может говорить об обильном газовыделении. Продолжительность такого изменения составила 3 – 4 минут. Данная особенность, которая наблюдалась во время всех экспериментов, может свидетельствовать об интенсивном процессе восстановления при достижении этой температуры. Точная температура восстановления из одного соединения в другое, с конечным переходом в металлическое железо зависит от размера частиц и удельной поверхности.

Средние результаты анализа химического состава восстановленных порошков приведены в таблице 2. В ней же приведен состав исходной окалины.

Таблица 2 – Результаты анализа химического состава восстановленных порошков

Температура восстановления, ℃	Fe, %	SiO_2, %	Al_2O_3, %
Исходная	66,29	3,24	0,73
900	93,90	3,39	0,65
1000	95,80	3,25	0,70

По высокому содержанию железа в исходной окалине можно говорить о том, что в её составе преобладает гематит Fe_2O_3, который представляет собой высший оксид железа. Химический анализ также выявил достаточно высокое содержание SiO_2, который свидетельствует об использовании пескоструйной обработки для снятия окалины с поверхности проката.

Восстановление в водороде оксидов железа может полностью пройти при температуре 900 ℃ [16, с. 25], однако в данном случае для полноценного протекания процесса не хватило времени выдержки из-за относительно крупного размера частиц исходной окалины.

На рисунке 2 представлены РЭМ-изображения восстановленных при 1000 ℃ частиц железного порошка.

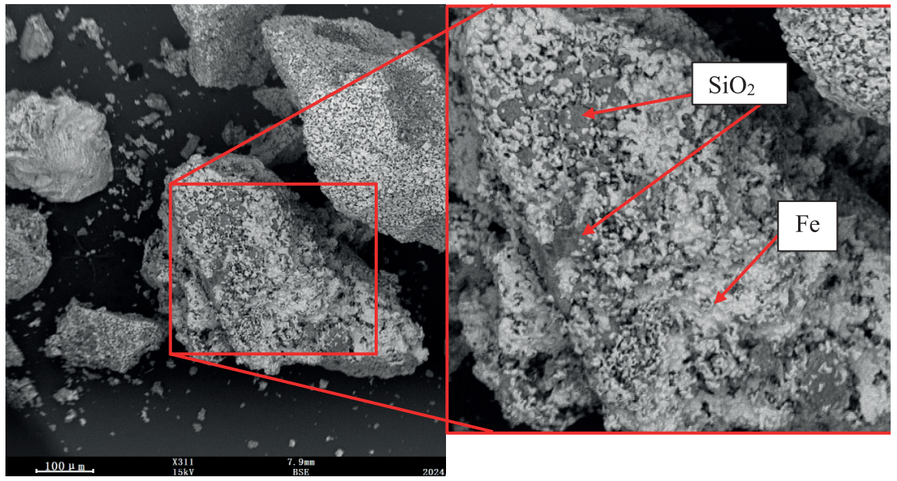


Рисунок 2 – РЭМ-изображение восстановленных частиц

Из рисунка 2 можно наблюдать достаточно типичную губчатую морфологию частиц железного порошка. Благодаря использованию режима детектирования обратно отраженных электронов, по цветовому градиенту можно судить о разности природы материалов. Так, на поверхности частиц расположены неметаллические включения SiO_2, чье присутствие было продемонстрировано результатами химического анализа.

Ещё один метод качественной оценки невооруженным взглядом процесса восстановления служит внешний вид полученного продукта. Продукт восстановления представлен в виде металлической губки, чье образование связано со спеканием восстановленных частиц между собой. Внешний вид таких губок представлен на рисунке 3.



а б

Рисунок 3 – Внешний вид губчатого железа,
полученного восстановлением при температуре: а) 900 ℃, б) 1000 ℃

На рисунке 3 можно наблюдать наличие цветового градиента в губках, образованных в результате восстановления при 900 ℃, тем временем как при 1000 ℃ образуется более однородная по цвету металлическая губка. Это вызвано наличием оксидов, сохранившихся в результате неполноценного протекания

восстановления. Губка с оксидами извлекается из лодочки легче, поскольку из-за низких температур и худшей спекаемости оксидов, металлическая связь между частицами отсутствует или недостаточно прочная. По тем же причинам её дальнейшее измельчение также протекает легче.

Губка, образованная после спекания при 1000 ℃ более прочная и сложнее измельчается. Вместе с тем всё же дальнейшее измельчение не так затруднено, и реализуемо использованием доступных в промышленности и лабораториях методов – ступки, шаровой мельницы и т.п.

На рисунке 4 представлена обобщенная схема традиционной и экспериментальной (представленной в этой работе) технологии восстановления окалины.



Рисунок 4 – Принципиальная схема восстановления прокатной окалины
традиционной (синие стрелки) и экспериментальной
(зеленые стрелки) технологией

Тем самым можно заключить, исходя из рисунка 4, что принципиальной разницей предлагаемой технологии является её упрощенность, отсутствие строгого контроля гранулометрического состава и операции предварительного отжига.

Вместе с тем стоит отметить, что всё же отсев порошка в дальнейшем понадобится для удаления особо крупных частиц. Тем не менее, все ещё не будет необходимости извлечения узкой фракции измельченной окалины. В случае исследованной окалины также присутствует проблема высокого содержания примесей.

Информация о финансировании: Данные исследования были проведены в рамках программно-целевого финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24992758).

Выводы

Определено, что предварительная операция для удаления легколетучих загрязняющих примесей необязательна, и она протекает в ходе постепенного нагрева окалины в трубчатой печи до 900 – 1000 ℃.

Показана возможность полного восстановления водородом относительно крупных частиц прокатной окалины при 1000 ℃ при высоте засыпки в лодочку 10 мм и выдержке 60 мин.

Продемонстрирована возможность качественной оценки процесса восстановления невооруженным взглядом по косвенным признакам без применения отдельного оборудования и методов.

В работе продемонстрировано отсутствие значительных технологических сложностей восстановления прокатной окалины водородом в лабораторных условиях, моделирующих условия близкие к промышленным. Эти выводы позволяют говорить о возможности внедрения такой технологии в реальную промышленность без значительных затрат на строгий контроль гранулометрического состава исходной окалины и энергозатрат на её интенсивное измельчение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Интернет-ресурс – официальный сайт организации Our World in Data. – [Электронный ресурс]. – https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions.

2 The International Platinum Group Metals Association (IPA). – [Электронный ресурс]. – https://ipa-news.com/index/policy/energy-transition-and-the-case-for-hydrogen.html

3 **Strakhov, V. M.** Alternative carbon reducing agents for ferroalloy production // Coke Chem. – 2009. – Vol. 52. – P. 19–22.

4 **Akhmetov, A. S., Eremeeva, Z. V., Makhambetov, E. N.** Application of hydrogen in production of ferroalloys // Metallurgist. – 2024. – Vol. 67. – P. 1621–1627.

5 **Akhmetov, A. S., Eremeeva, J. V.** Prospects for the Extensive Application of Hydrogen in Powder Metallurgy // Metallurgis. – 2021. – Vol. 65. – P. 314–319.

6 Интернет-ресурс – официальный сайт журнала Forbes Kazakhstan – [Электронный ресурс]. – https://forbes.kz/articles/kak_v_kazahstane_realizuyut_proekt_po_proizvodstvu_zelenogo_vodoroda_stoimostyu_50_mlrd

7 **Shin, S. M., Lee, D. W., Yun, J .Y., Kang, Ch. Y., Wang, J. P.** A study on the fabrication of iron powder from forging scale using hydrogen // Archives of Metallurgy and Materials. – 2015. – Vol. 60(2). – P. 1547–1549.

8 **Khaerudini, D. S., Chanif, I., Insiyanda, D. R.** Preparation and characterization of mill scale industrial waste reduced by biomass-based carbon // J. Sustain. Metall. – 2019. – Vol. 5. – P. 510–518.

9 **Nemchinova, N. V., Patrushov, A .E., Tyutrin, A. A.** Pyrometallurgical technology for extracting iron and zinc from electric arc furnace dust // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13(6204). – P. 1–8.

10 **Martin, M.I ., López, F. A., Torralba, J. M.** Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale // Ironmaking & Steelmaking. – 2012. – Vol. 39(3). – P. 155–162.

11 **Sista, K. S., Dwarapudi, S.** Iron powders from steel industry by-products // ISIJ International. – 2018. – Vol. 58(6). – P. 999–1006.

12 **Wang, Y., Wang, X., Hua, X., Zhao, C., Wang, W.** The reduction mechanism and kinetics of Fe_2O_3 by hydrogen for chemical-looping hydrogen generation // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 129(3). – P. 1831–1838.

13 **Babanejad, S., Ahmed, H., Andersson, C., Heikkinen, E. P.** Mechanical activation-assisted recovery of valuable metals from black mass in the form of Fe/Cu alloys // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2023. – Vol. 9(2). – P. 522–536.

14 **Omatick, T., Zhang, D., Blais, M. S., Mossolly, M., Renzi, P., Kurz, R., Freund, S., Harvey, S.** Machinery and energy systems for the hydrogen economy. – 2022. – P. 251–304.

15 **Zhang, J., Li, K., Liu, Z.,Yang, T.** Direct reduction of iron oxides with hydrogen // Primary Exploration of Hydrogen Metallurgy. – 2024. – P. 117–171.

16 **Jozwiak, W. K., Kaczmarek, E., Maniecki, T. P., Ignaczak, W., Maniukiewicz, W.** Reduction behavior of iron oxides in hydrogen and carbon monoxide atmospheres // Applied Catalysis A: General. – 2007. – Vol. 326(1). – P. 17–27.

REFERENCES

1 Internet-resurs – oficial'nyj sajt organizacii Our World in Data [Online resource – the official website of Our World in Data]. – [Electronic resource]. – https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions

2 The International Platinum Group Metals Association (IPA). – [Электронный ресурс]. – https://ipa-news.com/index/policy/energy-transition-and-the-case-for-hydrogen.html

3 **Strakhov, V. M.** Alternative carbon reducing agents for ferroalloy production // Coke Chem. – 2009. – Vol. 52. – P. 19–22.

4 **Akhmetov, A. S., Eremeeva, Z. V., Makhambetov, E. N.** Application of hydrogen in production of ferroalloys // Metallurgist. – 2024. – Vol. 67. – P. 1621–1627.

5 **Akhmetov, A. S., Eremeeva, J. V.** Prospects for the Extensive Application of Hydrogen in Powder Metallurgy // Metallurgis. – 2021. – Vol. 65. – P. 314–319.

6 Internet-resurs – oficial'nyj sajt zhurnala Forbes Kazakhstan [Online resource – the official website of Forbes Kazakhstan magazine]. – [Electronic resource]. – https://forbes.kz/articles/kak_v_kazahstane_realizuyut_proekt_po_proizvodstvu_zelenogo_vodoroda_stoimostyu_50_mlrd

7 **Shin, S. M., Lee, D. W., Yun, J .Y., Kang, Ch. Y., Wang, J. P.** A study on the fabrication of iron powder from forging scale using hydrogen // Archives of Metallurgy and Materials. – 2015. – Vol. 60(2). – P. 1547–1549.

8 **Khaerudini, D. S., Chanif, I., Insiyanda, D. R.** Preparation and characterization of mill scale industrial waste reduced by biomass-based carbon // J. Sustain. Metall. – 2019. – Vol. 5. – P. 510–518.

9 **Nemchinova, N. V., Patrushov, A .E., Tyutrin, A. A.** Pyrometallurgical technology for extracting iron and zinc from electric arc furnace dust // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13(6204). – P. 1–8.

10 **Martin, M.I ., López, F. A., Torralba, J. M.** Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale // Ironmaking & Steelmaking. – 2012. – Vol. 39(3). – P. 155–162.

11 **Sista, K. S., Dwarapudi, S.** Iron powders from steel industry by-products // ISIJ International. – 2018. – Vol. 58(6). – P. 999–1006.

12 **Wang, Y., Wang, X., Hua, X., Zhao, C., Wang, W.** The reduction mechanism and kinetics of Fe_2O_3 by hydrogen for chemical-looping hydrogen generation // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 129(3). – P. 1831–1838.

13 **Babanejad, S., Ahmed, H., Andersson, C., Heikkinen, E. P.** Mechanical activation-assisted recovery of valuable metals from black mass in the form of Fe/Cu alloys // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2023. – Vol. 9(2). – P. 522–536.

14 **Omatick, T., Zhang, D., Blais, M. S., Mossolly, M., Renzi, P., Kurz, R., Freund, S., Harvey, S.** Machinery and energy systems for the hydrogen economy. – 2022. – P. 251–304.

15 **Zhang, J., Li, K., Liu, Z.,Yang, T.** Direct reduction of iron oxides with hydrogen // Primary Exploration of Hydrogen Metallurgy. – 2024. – P. 117–171.

16 **Jozwiak, W. K., Kaczmarek, E., Maniecki, T. P., Ignaczak, W., Maniukiewicz, W.** Reduction behavior of iron oxides in hydrogen and carbon monoxide atmospheres // Applied Catalysis A: General. – 2007. – Vol. 326(1). – P. 17–27.

А. С. Ахметов[1], Е. Н. Махамбетов[2], *Р. Т. Төлеуқадыр[3], Ж. В. Еремеева[4], А. К. Жунусов[5]

[1,2,3]Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[4]Ұлттық технологиялық зерттеу университеті,
Мәскеу мемлекеттік болат және қорытпалар институты,
Ресей Федерациясы, Мәскеу қ.
[5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ПРОКАТТЫ ОТҚАБЫРШАҚТЫ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРУДЫҢ ЖЕҢІЛДЕТІЛГЕН ТЕХНОЛОГИЯСЫН САПАЛЫ БАҚЫЛАУ

Бұл мақала сутегі ағынында одан әрі електен өткізбестен және басқа дайындық жұмыстарынсыз ұнтақталған прокатты отқабыршақтың тотықсыздандыру процесін зерттеуге арналған. 0,9-0,315 мм негізгі фракциямен ұсынылған отқабыршақты ұнтақты толтыру биіктігі 10 мм, тотықсыздандыру кезінде 60 мин, температура 900 және 1000 ℃ болды. Тотықсыздандыру барысында және одан кейін тотықсыздандыру процесінің барысын бағалауға болатын сапалық белгілер қарастырылады: пештен шыққан кезде сутекті жағу нәтижесінде пайда болған алаудың пайда болуы; тотықсыздандыру нәтижесінде пайда болған металл кеуектің сыртқы белгілері бойынша. Гранулометриялық құрамды және басқа дайындық операцияларын қатаң бақылау кезеңінің болмауы және 1000 ℃ температурада 95,80% дейін таза темір ұнтағын алу бұл технологияны қосымша жабдыққа айтарлықтай шығынсыз нақты өнеркәсіпте бейімдеудің әлеуетті мүмкіндігін көрсетті. Темір ұнтағының құрамындағы темір оксидтерінің толық тотықсыздануымен ұнтақ бөлшектерінің құрылымында – отқабыршақты кетіру үшін прокатты құммен жару нәтижесінде болатын SiO2 жұқа бөлінген қоспа қалды. Бұл таза темір ұнтағын алу үшін қоспаны алдын ала алып тастау қажеттілігін көрсетеді.

Кілтті сөздер: отқабыршақ, темір, темір ұнтағы, тотықсыздану, сутегі, ұнтақ металлургиясы.

A. S. Akhmetov[1], Ye. N. Makhambetov[2], *R. T. Toleukadyr[3], Zh. V. Yeremeeva[4], A. K. Zhunusov[5]

[1,2,3]Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
[4]National Research Technological University (NUST),
Moscow State Institute of Steel and Alloys (MISIS), Russian Federation, Moscow.
[5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

QUALITATIVE CONTROL OF THE SIMPLIFIED TECHNOLOGY OF ROLLING SCALE REDUCTION

This article is devoted to the study of the process of reduction of rolled scale subjected to crushing without further screening and other preparatory operations in a hydrogen stream. The filling height of the scale powder, represented by the main fraction 0.9 – 0.315 mm, was 10 mm, the recovery time was 60 minutes, the temperature was 900 and 1000 ℃. During and after the restoration, qualitative signs were considered, which can be used to judge the progress of the restoration process: by the appearance of the torch formed as a result of igniting hydrogen at the outlet of the furnace; according to the external signs of a metal sponge formed as a result of restoration. The absence of strict control of the granulometric composition and other preparatory operations and the production of iron powder with a purity of up to 95.80 % at 1000 °C showed the potential for adapting this technology in real industry without significant costs for additional equipment. With the complete reduction of iron oxides in the composition of the iron powder, an impurity, SiO_2, remained finely distributed in the structure of powder particles, which was present as a result of sandblasting rolled products to remove scale. This indicates the need for preliminary impurity removal to obtain pure iron powder.

Keywords: scale, iron, iron powder, reduction, hydrogen, powder metallurgy.

SRSTI 53.45.31
DOI

***А. В. Волокитин[1], Б. Б. Махмұтов[2], Г. С. Тлеулесова[3]**
[1,2,3]Қарағанды индустриялық университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0886-3578
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8978-8097
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2304-2590
*e-mail: bb.makhmut@tttu.edu.kz

ЖАҢА ЖОЛМЕН ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАННАН КЕЙІН МЫС СЫМДАҒЫ МИКРОҚҰРЫЛЫМНЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

Мақалада жаңа біріктірілген деформация процесінде мыс сымның микроқұрылымы мен механикалық қасиеттерінің эволюциясы зерттелді. Технологиялық процестің мәні айналмалы тең арналы сатылы матрицадағы сымның деформациясы және содан кейінгі сүйреу болып табылады. Матрица сым осінің аймағында айналады және осылайша матрицадағы тең арналы бұрыштық тартқыш пен айналу арқылы кернеу тудырады. Жұмыс барысында деформация бөлме температурасында жүргізілді. Сонымен қоса деформация нәтижесінде градиент құрылымы бар мыс сым алынды. Беткі қабат ≈ 1 мм тереңдікте 500 нм-ге дейін ұсақталды. Әрі қарай, түйіршіктердің көлемі сымның орталық бөлігіне қарай ұлғаяды және 4 мкм-ді қамтиды. Әр түрлі тереңдікте ірі бұрышты және қосарланған шекаралардың болуын сандық талдау үшін EBSD талдауы жасалды. EBSD талдауы нәтижесінде деформацияланған сымдағы түйіршіктер өтулер санының артуымен бағытына қарай ойысады [10]. Зерттеу барысында деформацияланған сымның беткі қабатындағы ірі бұрышты шекаралардың үлесі 68%, ортаңғы қабатта ≈ 42% және ортасында ≈ 25% -ды құрайды. Нәтижесінде мыс сымның құрылымдық өзгерістерін және оның механикалық қасиеттерін зерттей отырып, жаңа технология әдісімен оның беріктікке ие болуы анықталды.

Кілтті сөздер: бұрау, микроқұрылым, матрица, мыс, сым.

Кіріспе

Орташа және ірі қиылған сымдарды созу барысында қатты қысу, яғни, көптеген деформация циклдарын пайдалану қолайлы емес, себебі сымның алғашқы диаметрі шектеулі және өтулердің саны артқан сайын сымның диаметрінің азаюына әкеледі. Сондықтан, соңғы екі онжылдықта зерттеушілердің үлкен назарын металдар мен қорытпалардағы ультраұсақтүйіршікті (УҰТ) құрылымдарды қарқынды (үлкен) пластикалық деформациялар (ҚПД) әдістерімен, олардағы беріктікті 2-5 есеге дейін күрт арттыру мүмкіндіктеріне байланысты алу ісі аудартып отыр. Қазіргі уақытта құрылымды тиімді түрде ұсақтайтын технологияларға көп циклді өңдеу кезінде қарапайым ығысу схемасын жүзеге асыратын әдістер жатады [1]. Ең көп зерттелген және қолданылатын әдіс - тең арналы бұрыштық престеу (ТАБП).

Сымсозу технологиялары мен ТАБП-ның дамуы оларды бір құрамдас үдеріске біріктіру болды [2]. Қысыммен өңдеудің бұл әдісі ТАБП үдерісінің екі маңызды кемшілігін болдырмауға мүмкіндік берді, нәтижесінде шексіз ұзындықтағы дайындамаларды өзгертуге, немесе өзгерту үдерісін тұрақты түрде және тамдық түзілместен іске жүргізуге қолайлы болды.

Барлық айырмашылыққа қарамастан, көрсетілген қосылып жасалған тәсіл үдерістің технологиялылығымен байланысты қателіктерге ие. Жақсы көрсеткіш көрсету үшін біраз өзгерту циклдарын орындау керек. Негізінде бұл тәсілде әр деңгейден кейін бірдей арналы бұрыштық матрицасын және созу құралын нақты алмастыруды, болмаса қанағаттанарлық ұзын технологиялық желіні құруды (көп реттік созу құрылғысы үшін) білдіреді. Сондықтан «ТАБП–престеу» бірлескен үдерісін дамытудың одан әрі негізгі бағыты деформация циклдерінің қажетті санын төмендеуіне мүмкіндік беретін деформацияның қосымша деңгейін құру болып табылады. Көрсетілген осындай қосымша бұзылулар арқасында дайындаманың бөлшектері соншалықты аса бүлінбейтінін айтуға болады. Өйткені бөлшектердің көлемі азайған кезде қосылып жасалған үдерістің қандай болмасын бір уақыт ұзақтығының әсері болуы ықтимал, сонда да бұзылу үдерісінің жоғарылауы уақытында болмауы мүмкін. Ұсынылған бүкіл үдерістер тиімділік процестерін дамытуда классикалық жоғары қысымды бұралу үдерісі ретінде көрсетілген бұралу операцияларына тұспа – тұс келеді [3; 8].

Бұл жұмыста зерделенген қосылған үдерістің «ТАБП-сымсозу» әдісінен басты айырмашылығы - тең арналы сатылы матрицада дайындаманың осі айналасында айналуына байланысты дайындаманың бұралуы орын алады, бұл бүкіл көлденең қимада деформацияның қосымша деңгейін құруға қол жеткізуге мүмкіндік береді. Дайындама созу құралына түскен кезде, иіргіш арнаның өтуіне байланысты көлденең қиманы калибрлеу жүреді. Созуға дейін тұрған тең арналы сатылы матрица көлденең және бойлық ығысу деформацияларын жүзеге асыруды қамтамасыз етеді, бұл созу үдерісінің негізгі кемшілігін - төмен икемділікті жоюға мүмкіндік береді [5; 6].

Осыған байланысты бұралу тізбектерін, қарапайым ығысуларды және классикалық сым процестерін біріктіретін жетілдірілген деформация әдістерін қолдану металл өңдеудің жоғары деңгейіне мүмкіндік береді және дәстүрлі құрылымдық материалдарды қолдану шекараларын үлкейтеді. Бұл зерттеудің практикалық маңыздылығы жабдықтың конструкциясы мен деформация технологиясына елеулі өзгерістер енгізбестен бір түйінді қосу арқылы қолданыстағы созу жабдығына жетілдірілген технологияны енгізу мүмкіндігі болып табылады. Бұл технология түсті металдар мен қорытпалардан шыбықтар мен сымдар шығаруға мүмкіндік береді және ұлттық және халықаралық маңызы бар, өйткені ол жинақталған деформация және градиенттік микроқұрылымды қалыптастыру арқылы беріктік сипаттамаларын жақсартады.

Материалдар мен әдістер

Үлгілер ретінде бастапқы тең осьтік құрылымды алу үшін термиялық өңделген күйде диаметрі 6,5 мм М1 маркалы мыс сым пайдаланылды.

Технологиялық үдерістің мәні қозғалмалы бірдей арналы сатылы матрицадағы сымның деформациясы және содан кейін сымсозу болып табылады. Матрица сым осінің маңайында айналады. Сонымен қатар матрицадағы бірдей арналы бұрыштық тартуы мен қозғалу себебінен кернеу пайда болады. Оның айналуы әдейі дайындалған механизмде іске асырылады, және де созу құрылғысының жабдық желісіне технологиялық майлау блогына орнатылады, бұл майлауды созу блогындағы матрица мен иіргішке беруге мүмкіндік береді [4]. Майлау сабын көпіршіктерінен тұрады және шыбықтарды иіргіштің жұмыс ойықтары арқылы тарту кезінде пайда болатын әсерді азайтуға қызмет етеді.

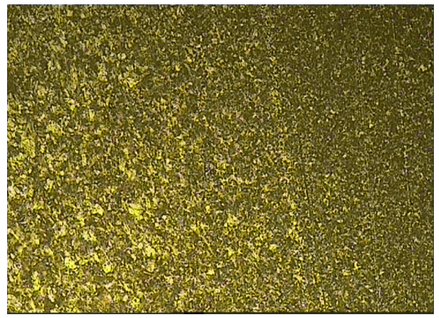
Мыс сымды деформациялау кезінде бірлескен технологияны жүзеге асыру үшін В-1/550М өнеркәсіптік барабанды сымсозу станогы қолданылды. Өту саны - 3. Әрбір деформация циклінен кейін сымның диаметрінің төмендеуі 0,5 мм болды, әр 3 деформация өткеннен кейін біз диаметрі 5,0 мм сым алдық. Созу жылдамдығы 500 мм/с болды, ал бұл жағдайда тең арналы сатылы матрицаның айналу жылдамдығы 30 айн/мин болды.

Металлографиялық талдау кезінде Leica оптикалық микроскопында және нақты және дұрыс реттеу үшін JEM2100 электронды микроскопында іске асырылады. Темплеттер мен фольга созу ретіне перпендикуляр және параллель жазықтықтардан жасалған. ПЭМ-ге арналған нысандар бөлме температурасы мен кернеуі 25В болатын Tenupol-3 құрылғысында 7% H3PO4 ерітіндісінде тазартылған суда сиялы жылтыратумен дайындалды.

EBSD сияқты локализацияланған аймақтардағы кристалдардың бағдарын өлшеудің дифракциялық әдістері бүгінде шағын масштабты микрокұрылымдық ерекшеліктердің сипаттамаларын анықтауда маңызды рөл атқарады. EBSD талдауы өрістік катодты Philips XL-30 REM құрылғысында жүргізілді. Төмен бұрышты түйірлердің шекаралары мен жоғары бұрышты түйір шекараларын ажырату үшін 150 сыни бағдарлау бұрышын қолдана отырып статистикалық талдау жүргізілді. EBSD картасында сәйкесінше төмен бұрышты және үлкен бұрышты шекаралар ақ және қара сызықтармен көрсетілген. Қос шекаралары Σ3 қызыл түспен белгіленген.

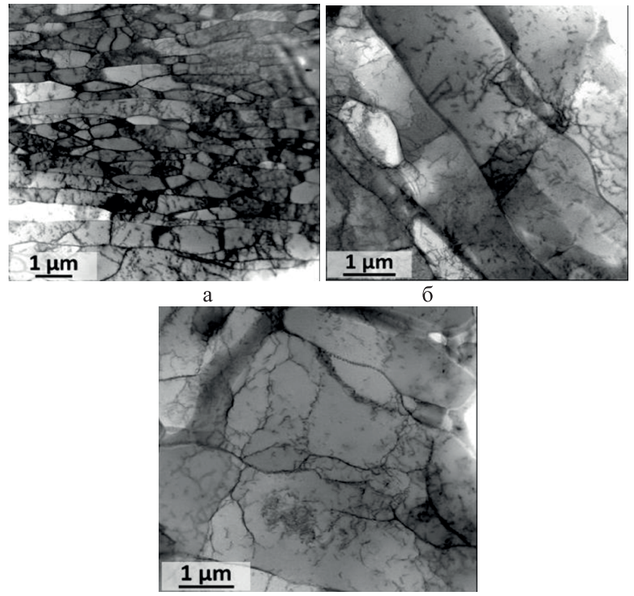
Нәтижелер және талқылау

Өзгеріске ұшыраған мыс сымға біріншіден металлографиялық талдау оптикалық микроскопта құрамдардың үгітілуінің барлық түрін барлау негізінде іске асырылады. Жанынан қиылған бөлшектегі оптикалық микроскоптағы саралау градиент құрамдасын сипаттайды. (1-сурет). Оның беткі қабаты ≈ 1 мм тереңдікте 500 нм-ге дейін бөлінеді. Түйірлердің көлемі сымның негізгі бөлігіне қарай өседі. Сонымен қоса 4 мкм-ді қамтиды. Бойлық құрылым ұзартылған және беткі қабаттағы сымсозу бағытына параллель және ортасына қарай біркелкі түйіршіктелген.



1-сурет – Деформацияланған мыс сымның микрокұрылымының оптикалық кескіні (көлденең қимасы)

3-суретте ПЭМ арқылы алынған микрокұрылымның фотосуреттері көрсетілген. Бірінші сурет сым бетінен (беткі қабат) ≈ 0,2 мм қашықтықта алынған (сурет. 2а). Көріп отырғанымыздай, түйіршіктердің шекаралары талшықты және қисық, бұл әдетте көптеген ақауларға тән, дәндердің орташа мөлшері 500 нм құрайды. Келесі ПЭМ кескіні сымның бетінен (ортаңғы қабат) ≈ 2 мм қашықтықта алынды (2б-сурет).



а б

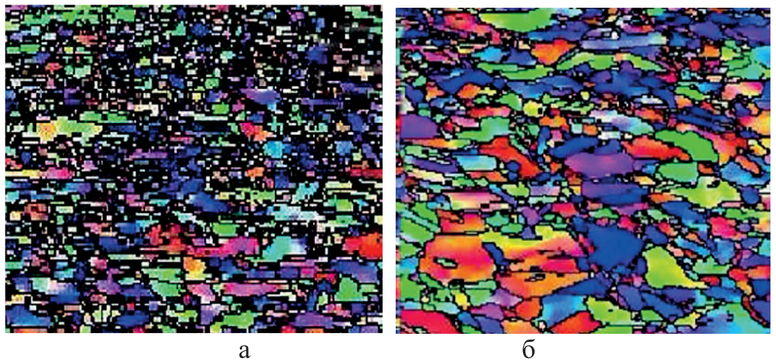
в

а – беттік қабат, б – ортаңғы қабат, в – орталық бөлік

2-сурет – Деформацияланған мыс сымның микрокұрылымы (көлденең қима)

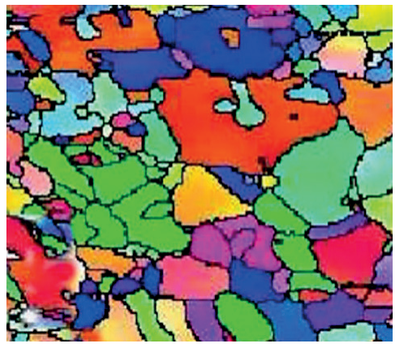
Бұл жерде жоғары бұрышты шекаралары бар кіші бөлшекті түйіршіктерден және дамыған субструкциясы бар ірі түйіршіктерден тұратын бимодальды құрылым пайда болған. Түйіршіктердің мөлшері орта есеппен - 2 мкм болады. Түйіршіктердің ішінде дислокация кластерлері мен ұяшықтар түрінде жұқа құрылым қалыптасады. Ірі түйіршіктер диффузиясыз қайта кристалдану механизмі арқылы пайда болуы мүмкін, себебі динамикалық қайта кристалдану болған болса, түйіршіктердегі кристалдық тордың бұзылуы мен ақаулар туындамайды. Келесі сурет (2в-сурет) сымның орталық негізгі бөлшегінен көрсетілді. Құрылым – орташа түйіршік мөлшері 4 мкм болып келетін деформация нәтижесінде пайда болған ұяшық тәріздес дислокациялық құрылым. Олар суб-шекаралары аз ірі түйіршіктер, сондай-ақ көптеген суб-шекаралары бар түйіршіктер ретінде байқалады.

Әр түрлі тереңдікте үлкен бұрыштық және қосарланған шекаралардың болуын сандық талдау үшін EBSD талдауы жасалды (3-сурет).



а

б



в

а – беттік қабат, б – ортаңғы қабат, в – орталық бөлік
3-сурет – Деформацияланған мыс сымның микроқұрылымының бағдарлану карталары (көлденең қимасы)

EBSD талдауы нәтижесінде деформацияланған сымдағы түйіршіктер өтулер санының артуымен бағытына қарай ойысады [7]. Барлық дерлік түйіршіктер егіздену үдерісіне қатысады, мұндай белсенді біріктіру нәтижесінде үлкен бұрыштық шекаралар ұлғаяды. Жаңа ірі бұрышты шекаралардың пайда болуы орташа түйіршік мөлшерінің азаюына әкеледі. Жұмыстарда сипатталғандай [9;10] егіздердің пайда болуы үшін қажет кернеу түйіршік мөлшерінің азаюымен сырғануды белсендіру үшін қажет кернеуге қарағанда тез артады. Бұл егіздердің ең көп саны сымның ортаңғы қабатында болатындығымен түсіндіріледі. Деформацияға ұшыраған сымның сыртқы қабатындағы ірі бұрышты шекаралардың мөлшері 68%, ортаңғы қабатта ≈ 42% және ортасында ≈ 25% -ды қамтиды.

Қорытынды

Мақалада жаңа технология әдісімен деформацияланған мыс сым зерделенді. Бұндағы негізгі өзгешеліктері - ығысу және созылу сызбаларының бұзылуының бір аймаққа жиналуы. Мақаладағы жұмыстың тәжірибелік ерекшелігі – жабдықтың (диірменнің) түріне технология кестесіне айтарлықтай жаңалықтар енгізбестен, түйін қосу негізінде пайдалынатын қондырғылар жүйесіне толықтырылған технологияны орнату мүмкіндігі. Осы технология түсті металдар мен қорытпалардан әр түрлі бұйымдар мен сымдар дайындауға мүмкіндік береді. Және ұлттық және халықаралық маңызы бар, өйткені ол жинақталған деформация және градиенттік микроқұрылымды қалыптастыру арқылы беріктік сипаттамаларын жақсартады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Langdon, T. G.** The characteristics of grain refinement in materials processed by severe plastic deformation // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2006, – № 13. – P. 6–14.

2 **Raab, G. I., Gunderov, D. V., Shafigullin, L. N., Podrezov, Yu. M., Danylenko, M. I., Tsenev, N. K., Bakhtizin, R. N., Aleshin, G. N., Raab, A. G.** Structural variations in low-carbon steel under severe plastic deformation by drawing, free torsion, and drawing with shear // Materials Physics and Mechanics. – 2015. – № 3 (24). – P. 242–252.

3 **Martínez, G. A. S., dos Santos, E. F., Kabayama, L. K., Guidi, E. S., Silva, F. D.** Influences of different die bearing geometries on the wire-drawing process // Metals. – 2019. – № 9. – P. 1089.

4 **Verma, D. P., Pandey, Sh.A., Bansal, A., Upadhyay, Sh., Mukhopadhyay, N.K., Sastry, G.V.S., Manna, R.** Bulk Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Pressing Followed by Flash Annealing // J. Mater. Eng. Perform. – 2016. – № 25, P. 5157–5166.

5 **Martínez, G. A. S., Santos, E. F., Kabayama, L. K., Guidi, E. S., Silva, F. D.** Influences of different die bearing geometries on the wire-drawing process // Metals. – 2019. – Vol. 9. – P. 1089–1095.

6 **Li, J., Mei, Q., Li, Y., Wang, T.** Production of Surface Layer with Gradient Microstructure and Microhardess on Copper by High Pressure Surface Rolling // Metals. – 2020. – Vol. 10. – P. 73–77.

7 **Rosakis, P., Rosakis, A.J., Ravichandran, G., Hodowany, J. A.** thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2000. – Vol. 48 (3). – P. 581–607.

8 **Fang, T. H., Li, W. L., Tao, N. R., Lu, K.** Revealing Extraordinary Intrinsic Tensile Plasticity in Gradient Nano-Grained Copper // Science. – 2011. – Vol. 331. – P. 1587–1590.

9 **Hotza, H., Smaga, M., Kirsch, B., Zhu, T., Beck, T., Aurich, J.** Characterization of the subsurface properties of metastable austenitic stainless steel AISI 347 manufactured in a two-step turning process // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 35–40.

10 **Meyers, M. A., Vöhringer, O., Lubarda, V. A.** The onset of twinning in metals : a constitutive descripton // Acta Materialia. – 2001. – Vol. 49. – P. 4025–4039.

А. В. Волокитин[1], Б. Б. Махмутов[2], Г. С. Тлеулесова[3]
[1,2,3]Карагандинский индустриальный университет,
Республика Казақстан, г. Темиртау

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ В МЕДНОЙ ПРОВОЛОКЕ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ НОВЫМ СПОСОБОМ

В статье изучена эволюция микроструктуры и механических характеристик медной проволоки в ходе нового совмещенного процесса деформирования. Технологический процесс включает в себя деформацию проволоки в вращающейся матрице с равноканальными ступенями, за которой следует процесс волочения. Матрица вращается вокруг оси проволоки, вызывая напряжение через равноканальную угловую протяжку и скручивание в матрице. Деформирование проводилось при комнатной температуре. В результате деформирования была получена медная проволока с градиентной структурой. Поверхностный слой измельчен до 500 нм на глубину ≈ 1 мм. Далее размер зерен увеличивается к центральной части проволоки и составляет 4 мкм. Для количественной оценки распределения большеугловых и двойниковых границ на различных глубинах был проведен EBSD-анализ. По результатам EBSD-анализа было выявлено, что с увеличением числа проходов зерна в деформированной проволоке ориентируются в определенном направлении. [10]. Практически все зерна вовлечены в процесс двойникования, в результате такого активного двойникования происходит увеличение большеугловых границ. Формирование новых большеугловых границ приводит к уменьшению среднего размера зерна. Доля большеугловых границ в поверхностном слое деформированной проволоки достигает 68 %, в среднем слое ≈ 42% и центре ≈ 25%.

Ключевые слова: скручивание, микроструктура, матрица, медь, проволока.

A. V. Volokitin[1], B. B. Makhmutov[2], G. S. Tleulesova[3]
[1,2,3]Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau

EVOLUTION OF MICROSTRUCTURE IN COPPER WIRE AFTER DEFORMATION BY A NEW METHOD

This work introduces a new technique for improving the performance of copper wire by combining room temperature drawing to create a gradient microstructure with rotating equal-channel step matrix deformation. A surface layer with nanoscale grains (500 nm) up to 1 mm is created by this combination process, which also introduces twisting and stretching forces. At the middle of the wire, these nanoscale grains eventually change into bigger micrometer-sized grains (4өм). The deformation reduces the average grain size by aligning the grains, causing extensive twinning, and increasing the density of large-angle grain boundaries, according to electron backscatter diffraction research. These large-angle boundaries play a significant role in enhancing the mechanical properties of the wire. With 68 % at the surface, 42 % in the middle, and 25 % in the center, the density of these large-angle boundaries is not uniform, suggesting a customized microstructure for better mechanical performance, including higher strength and improved ductility, which can be crucial for various industrial applications.

Keywords: torsion, microstructure, matrix, copper, wire.

МРНТИ 87.15.15
DOI

Е. У. Жумагалиев[1], К. Т. Ескалина[2], Е. Ж. Шабанов[3], А. А. Сексенбаева[4], А. С. Джундибаева[5]
[1,2,3,4,5]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Республика Казахстан, г. Актобе
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2227-0661
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2804-7076
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6902-1211
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6600-0662
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5244-3497
*e-mail: kuralai.tulegenovna@gmail.com

ПЫЛЕВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ФЕРРОСПЛАВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ: ИСТОЧНИКИ, ВЛИЯНИЕ И МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ

Ферросплавное производство является одним из наиболее значимых направлений металлургической промышленности, однако сопровождается значительными выбросами пылевых частиц, содержащих токсичные металлы. Эти выбросы не только ухудшают качество воздуха, но и оказывают негативное влияние на почву, водоемы и здоровье человека. В статье рассматриваются основные источники загрязнения, включая плавильные печи, газоочистные установки, процессы дробления и сортировки, а также накопление отходов. Особое внимание уделено характеристике пылевых выбросов, их распределению по размерам и потенциальному влиянию на окружающую среду. Анализ современных исследований показывает, что твердые частицы PM10 и PM2.5 представляют наибольшую опасность, так как они могут проникать в дыхательные пути, вызывая хронические заболевания легких, а также сердечно-сосудистые и неврологические расстройства.

Представлены современные методы минимизации загрязнений, такие как системы фильтрации, электростатические осадители, мокрые скрубберы и переработка отходов. Рассматриваются перспективы внедрения новых технологий, включая автоматизированный мониторинг выбросов и использование альтернативных экологически безопасных решений. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к снижению выбросов пылевых частиц на ферросплавных предприятиях для минимизации их воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Ключевые слова: ферросплавное производство, пылевое загрязнение, тяжелые металлы, PM10, PM2.5.

Введение

Ферросплавное производство играет стратегическую роль в металлургической отрасли, обеспечивая выпуск легирующих элементов, необходимых для производства различных видов стали и сплавов. Однако технологические процессы, используемые в данной отрасли, сопровождаются значительными выбросами пыли, содержащей токсичные металлы и другие загрязняющие вещества. Наибольший вклад в загрязнение окружающей среды вносят плавильные печи, процессы дробления и измельчения сплавов, а также отходы газоочистных систем.

Состав пыли ферросплавных производств зависит от вида используемого сырья и технологических процессов. Например, при выплавке феррохрома в атмосферу выбрасываются соединения хрома (III) и (VI), при производстве ферромарганца – оксиды марганца, а при выплавке ферросилиция – кремнезем. Эти частицы могут представлять серьезную опасность как для окружающей среды, так и для здоровья рабочих предприятий и населения, проживающего вблизи промышленных зон.

Исследования показывают, что уровень пылевого загрязнения в районах, прилегающих к ферросплавным заводам, зачастую превышает предельно допустимые концентрации в десятки раз. Мелкодисперсные частицы могут оставаться в воздухе продолжительное время, что способствует их распространению на большие расстояния и проникновению в дыхательные пути человека. Это повышает риск развития хронических заболеваний легких, сердечно-сосудистых патологий и неврологических расстройств.

Кроме негативного воздействия на здоровье, пылевые выбросы способствуют загрязнению почвы и водоемов. Тяжелые металлы, содержащиеся в промышленных отходах, могут накапливаться в экосистемах, оказывая длительное токсическое воздействие на флору и фауну. В связи с этим разработка и внедрение эффективных методов контроля пылевого загрязнения являются приоритетной задачей экологической политики предприятий ферросплавной промышленности.

Настоящее исследование направлено на систематический анализ источников пылевого загрязнения, его последствий и существующих технологий его минимизации. В работе рассмотрены новейшие исследования по данной теме, проведен сравнительный анализ различных методов газоочистки и утилизации отходов.

Материалы и методы

Источники загрязнения и их характеристики

Ферросплавное производство сопровождается значительными выбросами пыли, содержащей токсичные вещества. Основные источники загрязнения включают плавильные печи, системы газоочистки, дробильные установки и технологические отходы [1].

Пылевые выбросы ферросплавных производств содержат широкий спектр оксидов металлов, влияющих на окружающую среду и здоровье человека. Основными компонентами пыли являются оксиды железа, кремния, марганца,

хрома и алюминия (таблица 1). В зависимости от технологического процесса и используемого сырья их концентрация варьируется.

Таблица 1 – Состав пылевых выбросов

Компонент	Содержание (%)
Fe_2O_3 (оксид железа)	25-40
SiO_2 (диоксид кремния)	20-35
MnO_2 (оксид марганца)	10-20
Cr_2O_3 (оксид хрома)	5-10
Al_2O_3 (оксид алюминия)	2-5
Прочие примеси	5-10

Исследования показывают, что мелкодисперсные частицы, содержащие эти соединения, способны длительное время оставаться в атмосфере и распространяться на значительные расстояния, увеличивая риск воздействия на живые организмы и экосистемы [2].

Анализ выбросов твердых частиц на ферросплавных предприятиях за последние 10 лет показывает значительное колебание объемов загрязняющих веществ в зависимости от уровня производства, внедрения экологических технологий и регуляторных мер. Внедрение современных систем фильтрации и газоочистки способствует снижению выбросов, однако некоторые предприятия по-прежнему сталкиваются с проблемой избыточного загрязнения [4].

Ниже представлена диаграмма, демонстрирующая изменения объемов выбросов твердых частиц по годам: (график 1).



График 1 – Динамика выбросов твердых частиц на ферросплавных предприятиях за последние 10 лет

Эффективная система газоочистки включает несколько этапов очистки отходящих газов, позволяя значительно снизить выбросы твердых частиц. Основные технологии, применяемые на ферросплавных предприятиях, включают:

Электрофильтры, обеспечивающие осаждение мелкодисперсных частиц за счет электростатического воздействия.

Рукавные фильтры, улавливающие до 99 % твердых выбросов за счет механической фильтрации.

Мокрые скрубберы, снижающие содержание мелкодисперсных загрязнителей в газовых потоках.

Современные системы газоочистки позволяют значительно уменьшить уровень пылевого загрязнения, что подтверждается данными мониторинга выбросов и сравнительным анализом предприятий, внедривших новые технологии очистки [5].

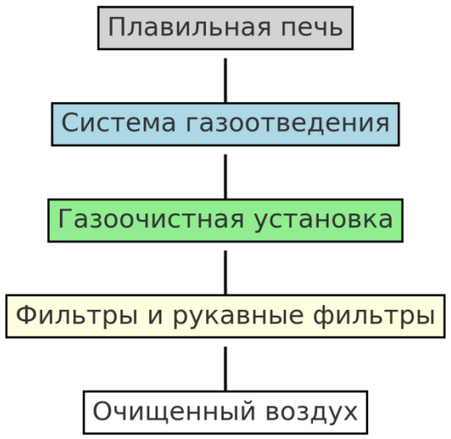


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы газоочистки на ферросплавных предприятиях

Плавильные печи. В процессе выплавки ферросплавов в доменных и электродуговых печах образуются значительные объемы пыли, содержащей оксиды хрома (Cr_2O_3), кремния (SiO_2), марганца (MnO_2) и железа (Fe_2O_3). Эти частицы способны долгое время оставаться в атмосфере, распространяясь на большие расстояния [6].

Газоочистные установки. Несмотря на наличие систем фильтрации, эффективность их работы может снижаться из-за износа оборудования и несвоевременного технического обслуживания. Современные электрофильтры и рукавные фильтры позволяют снизить уровень выбросов, однако старые установки остаются основным источником загрязнения.

Процессы дробления и сортировки. После выплавки ферросплавные слитки подвергаются механической обработке, что сопровождается образованием мелкодисперсной пыли. В отличие от пыли плавильных цехов, эта пыль содержит больше частиц металлов, таких как железо, кремний и марганец [7; 8].

Шлаковые и пылевые отходы. В процессе производства образуются твердые отходы, содержащие остатки ферросплавов и пылевидные соединения металлов. Эти отходы часто хранятся в открытых отстойниках, что способствует распространению пылевого загрязнения через ветровую эрозию [9].

Актюбинский завод ферросплавов, один из крупнейших производителей ферросплавов в Казахстане, является крупным источником промышленных выбросов. Основные источники загрязнения включают:

Плавильные печи. Высокотемпературные процессы плавки сопровождаются выбросами пыли с содержанием оксидов хрома, кремния и марганца.

Генерация газоаэрозольных выбросов. В технологическом процессе образуются газовые выбросы, содержащие мелкодисперсные частицы металлов, которые могут оказывать негативное влияние на окружающую среду.

Процессы измельчения и сортировки. В результате дробления ферросплавов образуется пыль, содержащая частицы металлов, способные проникать в дыхательные пути человека и вызывать заболевания органов дыхания.

Системы газоочистки. В 2024 году АЗФ начал модернизацию аспирационных систем, включая замену электрофильтров на более эффективные рукавные фильтры. Это позволит снизить уровень выбросов твердых частиц минимум на 30 %.

Исследования показывают, что значительная часть пылевых отходов ферросплавного производства состоит из мелкодисперсных частиц, способных к длительному нахождению в атмосфере. Эти частицы могут содержать токсичные соединения, такие как шестивалентный хром (Cr(VI)), который представляет особую опасность для здоровья человека [10; 11].

Таким образом, источники загрязнения на ферросплавных заводах являются многокомпонентными, включая выбросы плавильных печей, газоочистных установок, механическую обработку сплавов и хранение отходов. Эффективное снижение пылевого загрязнения возможно только при комплексном подходе, включающем модернизацию оборудования, внедрение современных технологий фильтрации и переработку отходов.

Результаты и обсуждение

Влияние на окружающую среду и здоровье

Ферросплавное производство оказывает значительное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Основные проблемы связаны с загрязнением воздуха, почвы и водоемов тяжелыми металлами и мелкодисперсными частицами пыли, которые обладают высокой токсичностью и способны длительно накапливаться в экосистемах.

Влияние на атмосферный воздух

Выбросы ферросплавных заводов включают в себя твердые частицы PM10 и PM2.5, которые могут задерживаться в атмосфере и распространяться на значительные расстояния. Эти частицы состоят из соединений хрома, марганца, железа и других металлов, оказывая негативное влияние на дыхательную систему человека. Вдыхание таких аэрозолей связано с повышенным риском хронических заболеваний легких, бронхиальной астмы и кардиоваскулярных патологий [12].

Исследования, проведенные в районах, прилегающих к ферросплавным заводам, показывают, что концентрация загрязняющих веществ часто превышает предельно допустимые нормы. В частности, вблизи Актюбинского завода ферросплавов зарегистрировано превышение допустимых уровней марганца в воздухе, что может способствовать развитию неврологических расстройств.



Рисунок 2 – Распределение пылевых частиц по размерам

Размер частиц пыли играет ключевую роль в оценке их влияния на окружающую среду и здоровье. Частицы PM10 (размер до 10 мкм) оседают в верхних дыхательных путях, тогда как более мелкие частицы PM2.5 (размер до 2.5 мкм) способны проникать глубже в легкие, вызывая воспалительные процессы и хронические заболевания [13]. Ультрадисперсные частицы (<1мкм) представляют наибольшую опасность, так как могут попадать в кровоток, оказывая токсическое воздействие на организм (рисунок 2).

Пыль ферросплавных производств, содержащая тяжелые металлы, может не только негативно влиять на качество воздуха, но и оседать в почве и водоемах, создавая долговременные экологические риски. Исследования показывают, что вблизи промышленных предприятий концентрация мелкодисперсных частиц значительно превышает допустимые нормы, что требует внедрения дополнительных мер по снижению выбросов и контроля их распространения [14].

Загрязнение почвы и водоемов

Пылевые выбросы оседают на поверхности почвы, накапливаясь в верхних слоях грунта и проникая в водные источники. Оксиды металлов, содержащиеся в пыли, могут вымываться в поверхностные и подземные воды, ухудшая их качество

и создавая угрозу для здоровья населения. Вблизи крупных промышленных предприятий выявлено загрязнение почвы тяжелыми металлами, такими как хром (VI), который обладает высокой токсичностью и канцерогенным эффектом.

На Актюбинском заводе ферросплавов, несмотря на предпринимаемые меры, остаются проблемы с накоплением отходов производства. Шлаки и пылевые частицы, хранящиеся на открытых площадках, подвержены ветровой эрозии, что способствует дальнейшему распространению загрязняющих веществ.

Воздействие на здоровье человека

Воздействие пылевого загрязнения на здоровье человека является одной из наиболее серьезных проблем, связанных с ферросплавным производством. Работники предприятий и жители прилегающих территорий подвергаются воздействию мелкодисперсных частиц, содержащих токсичные металлы, которые могут оказывать негативное влияние на различные системы организма.

Влияние на дыхательную систему

Мелкодисперсные частицы пыли (PM10 и PM2.5) способны проникать глубоко в дыхательные пути и оседать в альвеолах легких. Это приводит к развитию хронических заболеваний дыхательной системы, включая [15]:

Пневмокониоз – профессиональное заболевание, вызванное длительным вдыханием металлической пыли.

Бронхиальную астму и хроническую обструктивную болезнь легких (ХОБЛ).

Воспалительные процессы в бронхах, увеличивающие риск респираторных инфекций.

Влияние на сердечно-сосудистую систему

Исследования показывают, что вдыхание загрязненного воздуха может привести к развитию сердечно-сосудистых заболеваний. Токсичные металлы, такие как марганец и хром, могут накапливаться в кровеносной системе, повышая риск:

Гипертонии и ишемической болезни сердца.

Нарушений сердечного ритма и инфарктов миокарда.

Тромбообразования вследствие воспалительных процессов в сосудах [16].

Неврологические последствия

Длительное воздействие высоких концентраций марганца (Mn) и хрома (Cr) связано с развитием неврологических расстройств. В научных исследованиях зафиксированы:

Симптомы, сходные с болезнью Паркинсона, у рабочих ферросплавных заводов.

Снижение когнитивных функций и нарушение координации движений.

Повышенный риск нейродегенеративных заболеваний при длительном контакте с пылью ферросплавных производств.

Канцерогенные эффекты

Наибольшую опасность представляет шестивалентный хром (Cr(VI)), содержащийся в выбросах ферросплавных заводов. Международное агентство

по изучению рака (IARC) классифицирует Cr(VI) как канцероген группы 1, вызывающий [17]:

Рак легких при длительном вдыхании загрязненного воздуха.

Повышенный риск развития опухолей верхних дыхательных путей.

Генетические мутации, способствующие злокачественным процессам.

Таким образом, пылевое загрязнение, сопровождающее ферросплавное производство, оказывает серьезное воздействие на здоровье человека. Разработка и внедрение эффективных систем фильтрации, снижение концентрации опасных веществ в воздухе и соблюдение норм охраны труда являются необходимыми мерами для минимизации рисков.

Методы контроля и минимизации выбросов

Снижение уровня пылевого загрязнения на ферросплавных предприятиях требует комплексного подхода, включающего применение современных технологий фильтрации, переработки отходов, а также эффективного мониторинга выбросов. Рассмотрим основные методы, применяемые в промышленности.

Системы фильтрации и газоочистки

Современные предприятия используют различные типы фильтров для улавливания твердых частиц из газовых выбросов:

Электростатические фильтры (ЭФ) – обеспечивают эффективное осаждение мелкодисперсных частиц (PM2.5, PM10) за счет электростатического заряда.

Рукавные фильтры – наиболее эффективные для удаления пылевых частиц, так как улавливают до 99 % твердых выбросов [18].

Мокрые газоочистители – применяются для снижения содержания мелкодисперсных частиц и растворимых соединений металлов в выбросах [19].

В 2024 году на Актюбинском заводе ферросплавов была начата модернизация аспирационных систем, предусматривающая замену старых электрофильтров на рукавные, что позволит снизить пылевые выбросы на 30%.

Методы утилизации и переработки отходов

Эффективное управление пылевыми отходами предусматривает их утилизацию и повторное использование:

Брикетирование пылевидных отходов – позволяет перерабатывать пыль, содержащую марганец, хром и железо, для последующего использования в металлургическом производстве.

Использование ферросплавной пыли в строительных материалах – снижает объем отходов и улучшает свойства цемента и бетона.

Экологически безопасное складирование – предусматривает создание герметичных полигонов для хранения пылевых отходов, исключая их распространение [20].

Мониторинг и контроль выбросов

Для эффективного контроля за уровнем загрязнения применяются системы непрерывного мониторинга:

Анализ концентрации твердых частиц в реальном времени – с помощью лазерных анализаторов качества воздуха.

Программное моделирование выбросов – прогнозирование распространения загрязняющих веществ с учетом метеорологических факторов.

Автоматизированные системы контроля – интеграция датчиков в систему управления предприятия для оперативного выявления превышений норм выбросов.

Применение таких методов позволяет своевременно реагировать на изменения уровня загрязнения и минимизировать его последствия.

Таким образом, внедрение современных систем газоочистки, переработки отходов и мониторинга выбросов является ключевым фактором в снижении негативного воздействия ферросплавного производства на окружающую среду и здоровье населения.

Выводы

Пылевое загрязнение, сопровождающее процессы ферросплавного производства, представляет серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Основные источники загрязнения связаны с выбросами плавильных печей, процессами дробления и сортировки, а также неэффективными системами газоочистки. Пыль, содержащая тяжелые металлы и мелкодисперсные частицы, может оказывать негативное влияние на дыхательную, сердечно-сосудистую и нервную системы, а также обладать канцерогенными свойствами.

Современные методы контроля и минимизации выбросов, включая рукавные фильтры, электростатические осадители, системы мокрой очистки газов, а также переработку отходов и мониторинг выбросов, позволяют значительно снизить уровень загрязнения. Внедрение этих технологий на предприятиях, таких как Актюбинский завод ферросплавов, демонстрирует положительные результаты в снижении концентрации пыли в выбросах.

Однако для дальнейшего улучшения экологической ситуации необходимы дополнительные исследования, направленные на оптимизацию существующих систем фильтрации, разработку альтернативных методов утилизации отходов и создание комплексных программ мониторинга загрязнения. Государственная поддержка экологических инициатив и ужесточение нормативных требований также могут сыграть ключевую роль в снижении воздействия ферросплавного производства на окружающую среду.

Таким образом, успешное решение проблемы пылевого загрязнения требует интегрированного подхода, сочетающего технологические инновации, строгий контроль выбросов и эффективные меры по охране здоровья населения.

Информация о финансировании

Статья написана в ходе реализации научно-технической программы ИРН-BR24992882 - ОТ-24 «Разработка новых технологий по переработке техногенных отходов с улучшением экологической обстановки в регионе» в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам 2024-2026 гг.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Cherednichenko, M. V. & S. P. Zuev.** Ferroalloy industry waste processing // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 547(1). – P. 012016.

2 **Mehrdadi, N., M. Gholami & R.** Tavakkoli-Moghaddam. Environmental Impacts of Iran Ferrosilicon Company and Mitigation Plans // DIR0418205. – 2020. – P. 45–58.

3 **Kairakbaev, A. K., Dosmukhametov A. S., Ibragimova L. M.** Environmental assessment of water quality in industrial zones // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 771(1). – P. 012034.

4 **Батчаева З. А.** Негативное влияние промышленной пыли на здоровье человека // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2023. – № 2(69). – P. 118–122.

5 **Cao, S., Y. Gao & J. Wu.** Efficiency of Electrostatic Precipitators in Industrial Applications // Environmental Science & Technology. – 2020. – Vol. 54(3). – P. 1356–1368.

6 **Safarov, R. Z., Berdenov Zh. G.** Technogenic systems of Pavlodar region // L.N. Gumilyov Eurasian National University. – 2021. – P. 89–104.

7 **Stockmann-Juvala, H., Hedberg Y. Wallinder I. O.** Health Risk Assessment of Ferrochromium Alloys under REACH // International Ferroalloys Congress. – 2010. – P. 321–330.

8 **Stockmann-Juvala, H., Hedberg Y., Wallinder I. O.** Use of Read-Across in the Health Risk Assessment of Ferrochromium Alloys // International Ferroalloys Congress. – 2010. – P. 331–340.

9 **Kuznetsov, A. V., P. M. Ivanov & D. E. Sokolov.** Environmental Management and Impact Assessment in the Ferroalloy Industry // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 885(1). – P. 012047.

10 **Petrov, N. L., Sidorov K. M.** Effects of Technogenic Pollution on Ecosystems in Industrial Regions // Technogenic Systems Journal. – 2021. – Vol. 5(2). – P. 112–126.

11 **Williams, J., Thompson R. Zhang Y.** Air Pollution from Metallurgical Plants and Its Environmental Impact // Environmental Science and Technology Review. – 2022. – Vol. 68(4). – P. 765–780.

12 **Harrison, R.M., Yin J.** Impact of Airborne Heavy Metals on Human Health // Environmental Health Perspectives. – 2020. – Vol. 128(7). – P. 077010.

13 **Takahashi, K., Tanaka Y., Nishikawa K.** Pneumoconiosis in Metalworkers: Causes and Prevention // Journal of Occupational Medicine. – 2018. – Vol. 60(5). – P. 234–245.

14 **Barnes, P. J., Drazen J. M., Rennard S. I.** Asthma and COPD Risks from Industrial Emissions // Respiratory Medicine Journal. – 2019. – Vol. 113(2). – P. 312–325.

15 **Pope, C. A., Dockery D. W.** Inflammatory Responses to Air Pollution Exposure // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18(3). – P. 1055–1070.

16 **Brook, R. D., Rajagopalan S., Pope C. A.** Cardiovascular Diseases Induced by Metal Exposure // American Journal of Cardiology. – 2020. – Vol. 125(6). – P. 987–999.

17 **Peters, A. Schneider A.** Air Pollution and Arrhythmias: A Meta-Analysis // Circulation Research. – 2019. – Vol. 124(8). – P. 1205–1218.

18 **Franchini, M., Mannucci P. M.** Airborne Particulate Matter and Thrombosis // Blood Journal. – 2021. – Vol. 137(4). – P. 2821–2835.

19 Lucchini, R. G., Dorman D. C. Manganese Neurotoxicity in Industrial Workers // Journal of Neurology. – 2020. – Vol. 267(2). – P. 312–328.

20 **Grandjean, P. & Landrigan P. J.** Cognitive Decline in Populations Exposed to Heavy Metals // Neuroscience & Biobehavioral Reviews. – 2018. – Vol. 92(1). – P. 57–65.

REFERENCES

1 **Cherednichenko, M. V. & S. P. Zuev.** Ferroalloy industry waste processing // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 547(1). – P. 012016.

2 **Mehrdadi, N., M. Gholami & R.** Tavakkoli-Moghaddam. Environmental Impacts of Iran Ferrosilicon Company and Mitigation Plans // DIR0418205. – 2020. – P. 45–58.

3 **Kairakbaev, A. K., Dosmukhametov A. S., Ibragimova L. M.** Environmental assessment of water quality in industrial zones // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 771(1). – P. 012034.

4 **Batchaeva, Z. A.** Negativnoe vliyanie promy`shlennoj py`li na zdorov`e cheloveka [The negative impact of industrial dust on human health] [Text] // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2023. – № 2(69). – P. 118–122.

5 **Cao, S., Y. Gao & J. Wu.** Efficiency of Electrostatic Precipitators in Industrial Applications // Environmental Science & Technology. – 2020. – Vol. 54(3). – P. 1356–1368.

6 **Safarov, R. Z., Berdenov Zh. G.** Technogenic systems of Pavlodar region // L.N. Gumilyov Eurasian National University. – 2021. – P. 89–104.

7 **Stockmann-Juvala, H., Hedberg Y. Wallinder I. O.** Health Risk Assessment of Ferrochromium Alloys under REACH // International Ferroalloys Congress. – 2010. – P. 321–330.

8 **Stockmann-Juvala, H., Hedberg Y., Wallinder I. O.** Use of Read-Across in the Health Risk Assessment of Ferrochromium Alloys // International Ferroalloys Congress. – 2010. – P. 331–340.

9 **Kuznetsov, A. V., P. M. Ivanov & D. E. Sokolov.** Environmental Management and Impact Assessment in the Ferroalloy Industry // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 885(1). – P. 012047.

10 **Petrov, N. L., Sidorov K. M.** Effects of Technogenic Pollution on Ecosystems in Industrial Regions // Technogenic Systems Journal. – 2021. – Vol. 5(2). – P. 112–126.

11 **Williams, J., Thompson R. Zhang Y.** Air Pollution from Metallurgical Plants and Its Environmental Impact // Environmental Science and Technology Review. – 2022. – Vol. 68(4). – P. 765–780.

12 **Harrison, R.M., Yin J.** Impact of Airborne Heavy Metals on Human Health // Environmental Health Perspectives. – 2020. – Vol. 128(7). – P. 077010.

13 **Takahashi, K., Tanaka Y., Nishikawa K.** Pneumoconiosis in Metalworkers: Causes and Prevention // Journal of Occupational Medicine. – 2018. – Vol. 60(5). – P. 234–245.

14 **Barnes, P. J., Drazen J. M., Rennard S. I.** Asthma and COPD Risks from Industrial Emissions // Respiratory Medicine Journal. – 2019. – Vol. 113(2). – P. 312–325.

15 **Pope, C. A., Dockery D. W.** Inflammatory Responses to Air Pollution Exposure // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18(3). – P. 1055–1070.

16 **Brook, R. D., Rajagopalan S., Pope C. A.** Cardiovascular Diseases Induced by Metal Exposure // American Journal of Cardiology. – 2020. – Vol. 125(6). – P. 987–999.

17 **Peters, A. Schneider A.** Air Pollution and Arrhythmias: A Meta-Analysis // Circulation Research. – 2019. – Vol. 124(8). – P. 1205–1218.

18 **Franchini, M., Mannucci P. M.** Airborne Particulate Matter and Thrombosis // Blood Journal. – 2021. – Vol. 137(4). – P. 2821–2835.

19 Lucchini, R. G., Dorman D. C. Manganese Neurotoxicity in Industrial Workers // Journal of Neurology. – 2020. – Vol. 267(2). – P. 312–328.

20 **Grandjean, P. & Landrigan P. J.** Cognitive Decline in Populations Exposed to Heavy Metals // Neuroscience & Biobehavioral Reviews. – 2018. – Vol. 92(1). – P. 57–65.

Е. У. Жумагалиев[1], Қ. Т. Есқалина[2], Е. Ж. Шабанов[3], А. А. Сексенбаева[4], А. С. Джундибаева[5]

[1,2,3,4,5]Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.

ФЕРРОҚОРЫТПА ӨНДІРІСІНІҢ ШАҢМЕН ЛАСТАНУЫ: КӨЗДЕРІ, ӘСЕРЛЕРІ ЖӘНЕ АЗАЙТУ ӘДІСТЕРІ

Ферроқорытпа өндірісі металлургия өнеркәсібінің маңызды бағыттарының бірі болып табылады, бірақ құрамында улы металдар бар шаң бөлшектерінің айтарлықтай шығарындыларымен бірге жүреді. Бұл шығарындылар ауа сапасын нашарлатып қана қоймайды, сонымен қатар топыраққа, су қоймаларына және адам денсаулығына теріс әсер етеді. Мақалада ластанудың негізгі көздері, соның ішінде балқыту пештері, газ тазарту қондырғылары, ұсақтау және сұрыптау процестері және қалдықтардың жиналуы қарастырылады. Шаң шығарындыларының сипаттамасына, олардың мөлшеріне және қоршаған ортаға ықтимал әсеріне ерекше назар аударылады. Заманауи зерттеулердің талдауы PM10 және PM2.5 бөлшектері ең үлкен қауіп екенін көрсетеді, өйткені олар тыныс алу жолдарына еніп, өкпенің созылмалы ауруларын, сондай-ақ жүрек-қан тамырлары мен неврологиялық бұзылуларды тудыруы мүмкін.

Сүзу жүйелері, электростатикалық тұндырғыштар, дымқыл скрубберлер және қайта өңдеу сияқты ластануды азайтудың заманауи әдістері ұсынылған. Шығарындыларды автоматтандырылған бақылауды және баламалы экологиялық қауіпсіз шешімдерді пайдалануды қоса алғанда, жаңа технологияларды енгізу перспективалары қарастырылады. Нәтижелер қоршаған ортаға және адам денсаулығына әсерін азайту үшін ферроқорытпа зауыттарындағы шаң бөлшектерінің шығарындыларын азайтудың кешенді тәсілінің қажеттілігін растайды.

Кілтті сөздер: ферроқорытпа өндірісі, шаңның ластануы, ауыр металдар, PM10, PM2.5.

E. U. Zhumagaliev[1], K. T. Yeskalina[2],
Y. Zh. Shabanov[3], A. A. Seksenbayeva[4], A. S. Jundibayeva[5]
[1,2,3,4,5]Aktobe Regional University named after K. Zhubanov,
Republic of Kazakhstan, Aktobe

DUST POLLUTION OF FERROALLOY INDUSTRIES: SOURCES, IMPACT AND METHODS OF MINIMIZATION

Ferroalloy production is one of the most significant areas of the metallurgical industry, but it is accompanied by significant emissions of dust particles containing toxic metals. These emissions not only worsen air quality, but also have a negative impact on soil, water bodies and human health. The article examines the main sources of pollution, including melting furnaces, gas purification plants, crushing and sorting processes, as well as waste accumulation. Special attention is paid to the characteristics of dust emissions, their size distribution and potential impact on the environment. An analysis of current research shows that PM10 and PM2.5 particulate matter pose the greatest danger, as they can enter the respiratory tract, causing chronic lung diseases, as well as cardiovascular and neurological disorders.

Modern pollution minimization methods such as filtration systems, electrostatic precipitators, wet scrubbers and waste recycling are presented. The prospects for the introduction of new technologies, including automated monitoring of emissions and the use of alternative environmentally sound solutions, are being considered. The results obtained confirm the need for an integrated approach to reducing dust particle emissions at ferroalloy plants in order to minimize their impact on the environment and human health.

Keywords: ferroalloy production, dust pollution, heavy metals, PM10, PM2.5.

МРНТИ 53.01.94
DOI

К. Ж. Жумашев[1], *А. К. Нарембекова[2], Н. Ю. Лу[3],
Ф. А. Бердикулова[4], Е. В. Жинова[5]
[1,3,5]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Республика Казахстан, г. Караганда;
[4]Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8577-9417
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9066-6564
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3624-0984
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3505-4346
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7039-9254
*e-mail: cpk-kru@mail.ru

ПОИСКИ В РАЗВИТИИ НОВЫХ МЕТОДОВ УЛАВЛИВАНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Улавливание, хранение и получение товарных продуктов углекислого газа представляют собой чрезвычайно важную проблему для человечества в настоящее время. Ежегодно промышленные предприятия утилизируют около 40 млн. тонн выбросов углекислого газа. Из них большая часть газа приходится на долю предприятий по добыче и переработке природного газа. Остальная часть газа используется в производстве строительных материалов, удобрений, железа и его сплавов.

Авторами статьи в результате проведения краткого анализа выявлены возникающие задачи при очистке промышленных газов от диоксида углерода и вывода его в виде товарной продукции. Отмечена необходимость расширения ассортимента получаемой продукции, техногенных отходов и природного сырья для использования в качестве хемосорбента для улавливания этого газа.

Изучение улавливания диоксида углерода проводили в лабораторных условиях с использованием CO_2 из баллона. В качестве исходного хемосорбента использовали реактивный карбонат бария. Готовили пульпу, распределив по двум склянкам Дрекселя. Из баллона в последовательно соединенные склянки подавали диоксид углерода, через ротаметр со скоростью 2мл/сек в течение определенного времени. По истечению времени пульпу фильтровали на лабораторном вакуум-фильтре, сушили и определяли массу нерастворенного осадка. По разнице исходного и остатка карбоната бария расчетным путем определяли его переход в раствор в виде бикарбоната.

В статье дана информация о возможности развития такого направления с применением сырьевых источников на основе соединении бария.

Ключевые слова: диоксид углерода, карбонат бария, хемосорбция, регенерация, аммиак, пульпа.

Введение

В настоящее время утилизация углекислого газа представляет собой чрезвычайно важную проблему для человечества. В мире действуют около трех десятков крупных промышленных предприятий, где углекислый газ улавливается. На этих предприятиях этот газ используется как исходное сырье [1].

Ежегодно промышленные предприятия утилизируют около 40 млн. тонн выбросов углекислого газа. Из них большая часть газа приходится на долю предприятий по добыче и переработке природного газа. Остальная часть газа используется в производстве строительных материалов, удобрений, железа и его сплавов [1]. Однако, нельзя пренебрегать тем, что газ находящийся под давлением в результате тектонических сдвигов или землетрясения подобно «джину» в лампе Аладдина может вырваться наружу.

Снижение выбросов углекислого газа включает процессы его поглощения различными абсорбентами, десорбции с получением чистого газа, затем производство товарной продукции [1; 2; 3].

Современные методы утилизации и переработки углекислого газа.

Существует множество методов улавливания углекислого газа. Широко используемым методом улавливания углекислого газа из дымовых газов относится абсорбция 30 %-ным водным раствором моноэтаноламина с ингибиторами. Метод позволяет извлекать 85–95 % углекислого газа, чистотой 99,95 % [1]. Производительность абсорберов может извлекать от 90 до 1000 тонн углекислого газа в сутки и их мощность может быть повышена до 4600 тонн в сутки. Существенным недостатком использования этаноламина является образование значительных количеств смолистых веществ из-за его циклизации в производные оксазолидона-2 и в продукты их превращения, а также энергоемкость стадии десорбции.

Перспективным, по мнению авторов [2], является использование технологии жидкого углекислого газа для синтеза карбамида. Карбамид (мочевина) продукт крупнотоннажного производства и содержит 46% азота, что дает преимущество его использования в качестве азотного удобрения. Также, мочевина применяется в промышленном синтезе мочевино-альдегидных смол.

Целесообразно улавливание углекислого газа раствором аммиака с получением карбонатных удобрении аммония (формула 1):

$$NH_3 + CO_2 + H_2O = (NH_4)_2CO_3 \quad (1)$$

Согласно исследованиям [1], карбонат аммония образует соль амино-угольной кислоты, при нагревании которой отщепляется вода и соль переходит в мочевину (формула 2):

$$CO(NH_2)ONH_4 = CO(NH_2)_2 + H_2O \quad (2)$$

Использование оксида кальция для поглощения углекислого газа является малоперспективным, поскольку при его получении обжигом известняка выделяется намного больше этого газа [3]. Так происходит при обжиге известняка для различных целей: в металлургии, стройиндустрии и при производстве кальцинированной соды по аммиачной технологии. В природе свободный оксид кальция не существует, а специальное получение его для этих целей не оправдано, ввиду образования большего объема углекислого газа.

Учеными России установлено [4] положительное влияние природного явления - растворения известняка при повышенной концентрации диоксида углерода.

Основными компонентами материалов, твердеющими при повышенных концентрациях диоксида углерода являются известняковые наполнители, активно участвующие в процессах структурообразования и формирования физико-механических свойств. В межзерновом пространстве этих материалов происходит образование насыщенного раствора $Ca(HCO_3)_2$, который способствует лучшему сцеплению между собой. В результате термической обработки происходит разложение $Ca(HCO_3)_2$ в твердый нерастворимый карбонат кальция, выделяется диоксид углерода.

Куда девается высвободившийся диоксид углерода? Снова выделяется в атмосферу? При получении газоблоков, потребляемое количество газа остается ничтожно малым.

На основе выбрасываемого углекислого газа тепловыми электростанциями был создан экологичный бетон. Новый экологичный бетон является особо прочным и может быть использован в технологии 3D печати строительных конструкций [5]. Но какое содержание диоксида углерода в таком бетоне?

По данным [1], интересный вариант использования углекислого газа предложили ученые из Массачусетского технологического института. Ими предлагаются создание батарей из литий-углекислого газа, взамен металлических катализаторов на углеродный электрод. По их мнению, эффективность таких батарей, может быть сопоставимой с существующими литиево-газовыми батареями. В результате разряжения, углекислый газ превращается в твердый карбонатный электролит [6;7].

Новое решение, основанное на щелочноземельных солях со слабо координирующим анионом, было проверено с использованием комбинации глобального поиска минимума и моделирования молекулярной динамики с использованием полуэмпирического гамильтониана для мониторинга химических реакций. Тетракис(пентафторфенил)борат кальция захватывает 5,5 молекул CO_2 на атом кальция, тогда как тетракис(пентафторфенил) борат бария захватывает 3,6 молекул CO_2 на атом кальция [7]. Однако применение сложного соединения фтора может иметь ограниченние не только по запасам, но и по токсичности. Соединение с диоксидом углерода является термически относительно устойчивым и неясно как можно провести регенерацию исходного хемосорбента.

В целом, решение проблемы диоксида углерода требует параллельного поиска альтернативных методов переработки промышленного сырья без обжига и плавки. Для получения карбонатных продуктов, как кальцинированная сода, нужно использовать диоксид углерода из других имеющихся источников их образования. К примеру, вместо обжига известняка для получения синтетических карбонатов натрия все заводы в мире перевести на технологию использования CO_2 из газов обслуживающих ТЭС, что привело бы к уменьшению его выбросов до 45 млн. тонн в год [7–9].

Ввиду большого объема выбросов проблема улавливания и утилизации диоксида углерода требует наличия солидного объема природного запаса сырья и отходов, их разновидности, используемых в виде хемосорбента. Увеличение количества улавливаемого газа также порождает необходимость расширения ассортимента выпускаемой продукции и регенерации используемого хемосорбента.

В этом плане, применение солей бария имеет фундаментальный и прикладной интерес.

Карбонат бария имеет значительную область применения:

– производство оптических стекол;

– изготовление целлюлозной и бумажной продукции;

– отделочных строительных материалов и гончарных изделий;

– красок, лаков, эмалей и глазури для керамики и синтетических тканей;

– фейерверков, взрывчатых веществ и отравы для грызунов.

Барий в природе в основном распространен в виде баритовой руды. Сульфат бария малорастворим в воде и получение из него щелочного хемосорбента – гидрооксида бария требует более глубокого изучения.

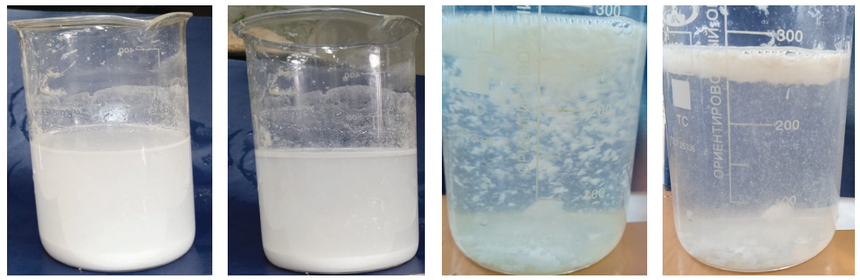
Материалы и методы

В лабораторных условиях изучение улавливания диоксида углерода проводился с использованием CO_2 из баллона.

В качестве исходного хемосорбента взяли реактивный карбонат бария. Приготовили пульпу, распределив по двум Склянкам Дрекселя с содержанием по 15 г карбоната бария и 250 мл воды. Из баллона в последовательно соединенные склянки подавали диоксид углерода, через ротаметр со скоростью 2мл/сек в течение определенного времени. Расчетное время для полного перевода карбоната бария в бикарбонат составило 1706 секунды. По истечению времени пульпу фильтровали на лабораторном вакуум-фильтре, сушили и определяли массу нерастворенного осадка. По разнице исходного и остатка карбоната бария расчетным путем определяли его переход в раствор в виде бикарбоната.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали, что при добавлении сульфата бария в раствор аммиака происходит мутнение с образованием в объеме раствора мелких коллоидных частиц (рисунки 1 – а, б).



а б в г

а – момент получения суспензии гидрооксида бария из карбоната бария; б – момент через 30 секунд отстоя; в – сульфат бария в растворе аммиака при прекращении перемешивания и г – через 5 минут.

Рисунок 1 – Приготовление и отделение коллоидных взвесей гидрооксида бария из пульпы карбоната бария

Аналогичное взаимодействие карбоната бария сопровождается образованием раствора крупными коллоидными взвесями (рисунок 1 – в, г).

Оба исходные соединения бария в воде почти нерастворимы, а раствор аммиака прозрачен и не имеет коллоидных включений. Относятся ли коллоидные частицы образованию гидрооксида бария или комплексного соединения типа – $NH_4Ba(OHCO_3)$ общим гидрооксидно-карбонатным анионом подлежит изучению. Исследования в этом направлений продолжаются, результаты которых будут опубликованы после получения дополнительных результатов.

Информация о финансировании

Исследования по данной статье были выполнены в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам на 2024-2026 годы (Министерство промышленности и строительства Республики Казахстан) по теме: «Создание инновационных ресурсосберегающих технологий добычи и комплексной переработки минерального и техногенного сырья».

Выводы

Итак, на основании проведенного исследования выявлены следующие проблемы:

– в связи с постоянным ростом объемов диоксида углерода для его улавливания и утилизации в виде товарной продукции требуются различные и большие запасы природных ресурсов;

– вывод диоксида углерода в виде отвальной или товарной продукции требует расширения их ассортимента;

– закачка сжиженного газа в подземные резервуары требуют особой осторожности, поскольку может вызвать растворение карбонатных пород и найти выход наружу, что может привести еще большей катастрофе;

– необходимо параллельно создавать технологии, исключающие выделение диоксида или других вредных газов;

– в качестве дополнительных сырьевых ресурсов для указанных целей предлагается использование соединении бария с получением щелочного реагента на основе бария в качестве регенерируемого хемосорбента;

– расширить область выпускаемой продукции на основе диоксида углерода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Малышев, В. П., Виноградов, О. В., Родионов, И. А.** Варианты формирования комплексных промышленных объединений по утилизации и переработке углекислого газа в продукты крупнотоннажной химии [Текст] // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – Том 19. – № 1 (71). – С. 31–35.

2 **Афанасьев, С. В.** Углекислый газ как сырье для крупнотоннажной химии // Neftegaz.Ru. – 2019. – № 9 (93). – С. 94–06.

3 **Aono, T.** Studies on the reactions between gas and solid, part II: absorption of CO_2 by CaO and $Ca(OH)_2$ [Текст] // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 1931. – № 6. – P. 319–324.

4 **Любомирский, Н. В., Бахтин, А. С., Бахтина, Т. А., Николаенко, Е. Ю., Николаенко, В. В.** Влияние гидрокарбоната кальция на структурообразование и свойства материалов на основе извести карбонизационного твердения [Текст] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11 (53). – С. 86–93.

5 **Vijayraghavan, R., et al.** Diaminoprotic ionic liquids for CO2 capture [Text] // Physical Chemistry Chemical Physics. − 2013. − № 15(46). − P. 19994–19999.

6 **Blath, J., et al.** Chemisorption of carbon dioxide in imidazolium based ionic liquids with carboxylic anions [Text] // Chemical Engineering Journal. − 2012. − № 181–182. − P. 152–158.

7 **Chaban, V. V., Andreeva, N. A., Vorontsov-Velyaminov, P. N.** Weakly Coordinating Anion Substantially Enhances Carbon Dioxide Fixation by Calcium and Barium Salts [Text] // Energy & Fuels. – 2017. – № 31(9) . – P. 9668–9674.

8 Пат. 36140 Республика Казахстан, МПК7 C01D 7/18 (2006.01), C01D 7/02 (6). Способ переработки технологических растворов при производстве синтетического карбоната натрия [Текст] / Жумашев К.; заявитель и патентообладатель Жумашев К. – № 2021/0563.1; заявл. 17.09.21; опубл. 24.03.23, Бюл. № 12.

9 Евразийский патент 202191383, МПК7 B01D 53/14 (2006.01), B01D 53/62 (2006.01), C01D 7/06 (2006.01), C01F 11/18 (2006.01), C04 14/28 (2006.01) / Способы улавливания и утилизации диоксида углерода при производстве кальцинированной соды и новое применение бикарбоната кальция [Текст] / Жумашев К.; заявитель и патентообладатель Жумашев К. – KZ2021/023; заявл. 21.05.2021; опубл. 30.11.2022.

10 **Ахметов, В. Р., Смирнов, О. В.** Улавливание и хранение диоксида углерода - проблемы и перспективы [Текст] // Башкирский химический журнал. – 2020. - Том.27. – № 3. – С. 103–115.

REFERENCES

1 **Malyshev, V. P., Vinogradov, O. V., Rodionov, I. A.** Varianty formirovaniya kompleksnyh promyshlennyh ob»edinenij po utilizacii i pererabotke uglekislogo gaza v produkty krupnotonnazhnoj himii [Options for the formation of complex industrial associations for the utilization and processing of carbon dioxide into products of large-scale chemistry] [Text] // Technologies of civil safety. – Vol.19. – 2022. – № 1 (71). – P. 31–35.

2 **Afanas'ev, S. V.** Uglekislyj gaz kak syr'e dlya krupnotonnazhnoj himii [Carbon dioxide as a raw material for large-scale chemistry] [Text] // Neftegaz. – 2019. – № 9 (93). – P. 94–06.

3 **Aono, T.** Studies on the reactions between gas and solid, part II: absorption of CO_2 by CaO and $Ca(OH)_2$ [Studies on the reactions between gas and solid, part II: absorption of CO_2 by CaO and $Ca(OH)_2$] [Text] // In Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 1931. – № 6. – P. 319 – 324.

4 **Lyubomirsky, N. V., Bakhtin, A. S., Bakhtina, T. A., Nikolaenko, E. Yu., Nikolaenko, V. V.** Influence of calcium hydrocarbonate on structure formation and properties of materials based on carbonation hardening lime [The effect of calcium bicarbonate on the structure formation and properties of lime-based carbonation hardening materials] [Text] // In International Scientific Research Journal. – 2016. № 11(53). – P. 86–93.

5 **Vijayraghavan, R.** Diaminoprotic ionic liquids for CO2 capture [Text] // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2013. – № 15(46). – P. 19994–19999.

6 **Blath, J.** Chemisorption of carbon dioxide in imidazolium based ionic liquids with carboxylic anions [Text] // Chemical Engineering Journal. – 2012. – № 181–182. – P. 152–158.

7 **Chaban, V. V., Andreeva, N. A., Vorontsov-Velyaminov, P. N.** A Weakly Coordinating Anion Substantially Enhances Carbon Dioxide Fixation by Calcium and Barium Salts [Text] // Energy & Fuels. – 2017. – № (9). – P. 9668–9674.

8 Pat. 36140 Respublika Kazaxstan, MPK7 C01D 7/18 (2006.01), C01D 7/02 (6). Sposob pererabotki texnologicheskix rastvorov pri proizvodstve sinteticheskogo karbonata natriya [Text] / Zhumashev K.; zayavitel` i patentoobladatel` Zhumashev K. – № 2021/0563.1; zayavl. 17.09.21; opubl. 24.03.23, Byul. № 12.

9 Evrazijskij patent 202191383, MPK7 B01D 53/14 (2006.01), B01D 53/62 (2006.01), C01D 7/06 (2006.01), C01F 11/18 (2006.01), C04 14/28 (2006.01) [Text] / Sposoby` ulavlivaniya i utilizacii dioksida ugleroda pri proizvodstve kal`cinirovannoj sody` i novoe primenenie bikarbonata kal`ciya [Tekst] / Zhumashev K.; zayavitel` i patentoobladatel` Zhumashev K. – KZ2021/023; zayavl. 21.05.2021; opubl. 30.11.2022.

10 **Ahmetov, V. R., Smirnov, O. V.** Ulavlivanie i hranenie dioksida ugleroda - problemy i perspektivy [Carbon dioxide capture and storage - problems and prospects] [Text] // In Bashkir Chemical Journal. – 2020. – Vol. 27. – № 3. – P. 103–115.

К. Ж. Жумашев[1], *А. К. Нарембекова[2], Н. Ю. Лу[3], Ф. А. Бердикулова[4], Е. В. Жинова[5]
[1,3,5]Ж. Әбішев ат.Химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[4]Қазақстан Республикасының Минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

КӨМІР ҚЫШҚЫЛ ГАЗЫН ҰСТАУДЫҢ ЖӘНЕ ПАЙДАЛАНУДЫҢ ЖАҢА ӘДІСТЕРІН ӘЗІРЛЕУ

Көмірқышқыл газының коммерциялық өнімдерін алу, сақтау және өндіру қазіргі уақытта адамзат үшін өте маңызды мәселе болып табылады. Жыл сайын өнеркәсіптік кәсіпорындар 40 миллион тоннаға жуық көмірқышқыл газын тастайды. Оның ішінде газдың ең көп үлесі табиғи газ өндіру және өңдеу кәсіпорындарына тиесілі. Газдың қалған бөлігі құрылыс материалдарын, тыңайтқыштарды, темір және оның қорытпаларын өндіруге жұмсалады.

Қысқаша талдау нәтижесінде мақала авторлары өнеркәсіптік газдарды көмірқышқыл газынан тазарту және оны тауарлық өнім ретінде жою кезінде туындайтын мәселелерді анықтады. Алынған өнімдердің, техногендік қалдықтардың және осы газды алу үшін химисорбент ретінде пайдалану үшін табиғи шикізаттың ассортиментін кеңейту қажеттілігі атап өтілді.

Көмірқышқыл газын ұстауды зерттеу баллондағы CO_2 көмегімен зертханалық жағдайларда жүргізілді. Бастапқы хемосорбент ретінде реактивті барий карбонаты қолданылды. Целлюлоза оны екі Дрексел бөтелкелерінің арасында бөлу арқылы дайындалды. Көмірқышқыл газы цилиндрден тізбекті қосылған колбаларға ротаметр арқылы белгілі бір уақыт ішінде 2 мл/сек жылдамдықпен берілді. Уақыт өткеннен кейін целлюлоза зертханалық вакуумдық сүзгіде сүзіліп, кептіріліп, ерімеген тұнбаның массасы анықталды. Бастапқы және қалдық барий карбонаты арасындағы айырмашылық негізінде оның бикарбонат түріндегі ерітіндіге өтуі есептеу арқылы анықталды.

Мақалада барий қосылыстары негізіндегі шикізат көздерін пайдалана отырып, мұндай бағытты дамыту мүмкіндігі туралы ақпарат берілген.

Кілтті сөздер: көмірқышқыл газы, барий карбонаты, хемосорбция, регенерация, аммиак, сулы қойыртпақ.

K. Zh. Zhumashev[1], *A. K. Narembekova[2], N. Y. Lu[3], F. A. Berdikulova[4], E. V. Zhinova[5]
[1,3,5]Zh.Abishev Chemical and Metallurgical Institute,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[2]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[4]National Center for Integrated Processing of Mineral
raw materials of the Republic of Kazakhstan, Almaty

SEARCHING FOR THE DEVELOPMENT OF NEW METHODS OF CARBON DIOXIDE CAPTURE AND UTILIZATION

The capture, storage and production of commercial products of carbon dioxide are an extremely important problem for humanity at the present time. Every year, industrial enterprises utilize about 40 million tons of carbon dioxide emissions. Of these, the largest part of the gas is accounted for by enterprises extracting and processing natural gas. The rest of the gas is used in the production of building materials, fertilizers, iron and its alloys.

The authors of the article, as a result of a brief analysis, identified the problems that arise in the purification of industrial gases from carbon dioxide and its removal as a commercial product. The need to expand the range of products obtained, man-made waste and natural raw materials for use as a chemisorbent for capturing this gas is noted.

The carbon dioxide capture was studied in laboratory conditions using CO_2 from a cylinder. Reactive barium carbonate was used as the initial chemisorbent. The pulp was prepared by distributing it into two Drexel flasks. Carbon dioxide was fed from the cylinder into successively connected flasks through a rotameter at a rate of 2 ml/sec for a certain time. After the time had elapsed, the pulp was filtered on a laboratory vacuum filter, dried, and the mass of the undissolved sediment was determined. Its transition into solution in the form of bicarbonate was determined by calculation based on the difference between the initial and residual barium carbonate.

The article provides information on the possibility of developing this direction using raw material sources based on barium compounds.

Keywords: carbon dioxide, barium carbonate, chemisorption, regeneration, ammonia, pulp.

МРНТИ 53.31.19
DOI

***А. А. Каменов[1], А. В. Богомолов[2], А. Н. Жакупов[3],
Т. А. Рыспаев[4], Н. К. Кулумбаев[5]**
[1,2,3,5]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[4]Ошский технологический университет, Кыргызстан, г. Ош
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0023-5419
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4926-0925
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2988-7015
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4774-3365
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4104-037X
*e-mail: almatkame@gmai.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗАЛИВОЧНОГО ЧУГУНА

Целью данной работы является экспериментальное обоснование оптимизации химического состава заливочного чугуна, применяемого при монтаже анодов алюминиевых электролизеров, с использованием сталеплавильного шлака агрегата ковш-печь (АКП) и других корректирующих добавок. Оптимизация чугуна направлена на улучшение его эксплуатационных свойств. Это включает снижение электросопротивления для уменьшения потерь напряжения и энергии при электролизе в контакте «ниппель-анод». Также критически важно достичь такого сочетания хрупкости и прочности, которое обеспечит легкое и полное удаление чугуна при демонтаже анодов.

Исследование показало, что применение только сталеплавильного шлака в качестве корректирующего компонента обладает ограниченной эффективностью, особенно в части удаления фосфора и серы. Однако разработанный комплексный подход, включающий совместное использование сталеплавильного шлака, извести для усиленной дефосфорации и десульфурации, графита для стабилизации углерода, а также ферросплавов для коррекции содержания кремния и марганца, продемонстрировал высокую эффективность.

В результате был получен чугун с оптимизированным химическим составом, мас.%: углерод 3,3–3,5; кремний 2,4–2,5; марганец 0,7–0,72; фосфор 0,15–0,18; сера 0,05–0,06. Состав обеспечивает не только эффективное удаление примесей, но и формирование целевой структуры и свойств чугуна, что приводит к значительному улучшению его эксплуатационных характеристик и подтверждено результатами испытаний.

Ключевые слова: чугун, сталеплавильный шлак, химический состав, индукционная плавка, ферросплавы, жидкотекучесть чугуна.

Введение

Качество заливочного чугуна, используемого при монтаже анодов алюминиевых электролизеров, является одним из факторов, непосредственно

влияющих на эксплуатационные характеристики электролизеров, их долговечность и общую эффективность работы [1; 2].

Существующие проблемы, связанные с неполным или затрудненным удалением чугуна при демонтаже анодов, высоким перепадом электрического напряжения в контакте «стальной ниппель – угольный блок» и, как следствие, значительными энергетическими потерями, обуславливают необходимость строгого контроля и оптимизации химического состава заливочного чугуна, а также его технологических свойств [2; 3].

Многие применяемые на сегодняшний день составы чугунов зачастую либо содержат в своем составе дорогостоящие и/или дефицитные легирующие элементы (например, молибден, тантал, галлий) [4], что существенно увеличивает их себестоимость и ограничивает широкое применение. Либо же они включают компоненты (такие как алюминий или медь в определенных концентрациях) [3], которые могут негативно влиять на электросопротивление и литейные свойства чугуна, что, в свою очередь, сказывается на общей эффективности процесса электролиза алюминия. Ранее проведенные исследования [1; 2] были направлены на изучение влияния химического состава чугуна на его эксплуатационные свойства, и по их результатам были определены основные требования к составу чугуна.

Химический состав заливочного чугуна должен комплексно отвечать целому ряду специфических требований. К ним относятся низкое содержание примесей, в первую очередь фосфора и серы, стабильные и оптимальные значения по содержанию углерода, кремния и марганца, а также высокие показатели жидкотекучести и минимальная кристаллизационная усадка [2]. Фосфор при повышенном содержании приводит к нежелательной хрупкости чугуна, в то время как недостаток углерода или кремния может вызвать существенное ухудшение механических и теплофизических свойств [2; 3; 5–6].

Одновременно с этим, современные металлургические предприятия активно стремятся к минимизации производственных затрат и повышению общей ресурсной эффективности, что диктует насущную необходимость более широкого использования вторичных материалов и промышленных отходов в технологических процессах. Шлак агрегата ковш-печь (АКП), образующийся в значительном количестве в процессе внепечной обработки стали, содержит существенное количество оксида кальция (CaO) и других компонентов, которые потенциально могут быть эффективно использованы для удаления вредных примесей из чугуна и стабилизации его химического состава [7–10]. В основном существующие подходы к переработке сталеплавильных шлаков направлены на извлечение из них металлического и оксидного железа, при этом силикатная часть шлака зачастую направляется в отвал [7–10].

Тем не менее, доступные данные об опыте использования сталеплавильного шлака непосредственно в производстве заливочного чугуна весьма ограничены, что требует проведения целенаправленных дополнительных исследований в этой области.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящего исследования является оптимизация химического состава заливочного чугуна, который используется при монтаже анодов алюминиевых электролизеров, с использованием сталеплавильного шлака и дополнительных корректирующих добавок. Предлагаемая методика направлена на достижение эффективного снижения концентрации или удаление примесей (в первую очередь, фосфора и серы) и получение чугуна с оптимальным содержанием углерода, кремния и марганца. Это, в свою очередь, должно обеспечить снижение перепада напряжения в контакте «ниппель-анод», уменьшение непроизводительных энергетических потерь при электролизе, а также достижение требуемого баланса между механическими и литейными свойствами чугуна, в частности, обеспечение оптимальной хрупкости для полного и легкого демонтажа огарков и достаточной жидкотекучести для качественного заполнения заливочных форм.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на кафедре «Металлургия» (НАО «Торайгыров университет»). Для выплавки чугуна использовалась портативная среднечастотная индукционная электропечь модели GW-MF-25 (Рисунок 1), рабочий объем плавильного тигля которой позволял получать расплав массой до 3 кг.



Рисунок 1 – Процесс плавления чугуна
в индукционной электропечи GW-MF-25

Определение оптимального количества и точного соотношения добавляемых компонентов шихты являлось ключевым этапом в выплавке заливочного чугуна с заданными эксплуатационными характеристиками. Данный процесс основывался на комплексном подходе, который включал как теоретические расчеты и анализ релевантных литературных данных, так и последующее математическое

планирование эксперимента. Изначально, на основе предварительного анализа, целевой состав чугуна для анодов алюминиевых электролизеров предполагал следующие ориентировочные параметры, мас. %: углерод 3,3–3,5; кремний 2,4–2,8; марганец 0,6–0,8; содержание фосфора и серы – менее 0,2 %.

Первоначальный выбор и обоснование каждого из компонентов шихты, их ожидаемый эффект от применения и технологические особенности использования были определены на основе стехиометрических расчетов, которые учитывали химический состав исходного чугуна и желаемый конечный состав получаемого сплава.

Для дальнейшей оптимизации соотношения ключевых добавок (сталеплавильного шлака, извести и ферросплавов), обеспечивающего достижение минимально возможного содержания фосфора в заливочном чугуне, было применено математическое планирование эксперимента, которое подробно описано в работе [12]. Такой подход позволил существенно сократить необходимое количество проводимых экспериментов, выявить наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на процесс дефосфорации, и получить адекватную математическую модель.

Следовательно, окончательный выбор оптимальных количеств и соотношений компонентов шихты стал результатом поэтапного подхода. Начиная с теоретических расчетов и предварительных экспериментальных данных, с помощью методов математического планирования был осуществлен точный подбор параметров, обеспечивающий достижение требуемого качества чугуна при одновременном снижении содержания вредных примесей.

В качестве основного материала для проведения плавок использовался исходный чугун, применяемый в анодомонтажном производстве одного из электролизных заводов, с химическим составом, представленным в Таблице 1. Для корректировки состава чугуна и удаления примесей применялся сталеплавильный шлак, химический состав которого приведен в Таблице 2.

Таблица 1 – Химический состав исходного чугуна, %

C	Si	Mn	P	S	Fe
3,2	2,8	0,7	1,5	0,12	Остальное

Таблица 2 – Химический состав сталеплавильного шлака, %

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_2	MnO
58	22	9,7	1,6	4,6	2,4	0,6

Для оперативного анализа химического состава исходных шихтовых материалов и получаемых образцов чугуна в ходе экспериментов применялся портативный рентгено-флуоресцентный анализатор (Рисунок 2).

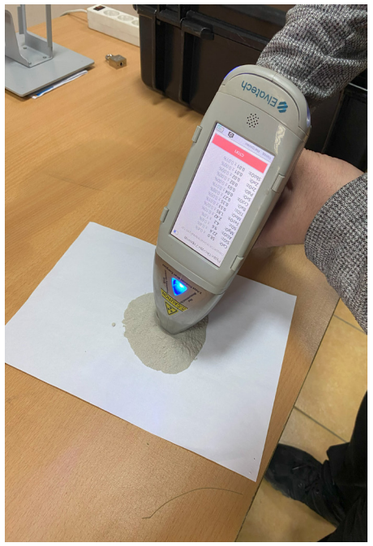


Рисунок 2 – Портативный рентгено-флуоресцентный анализатор химического состава материалов

В ходе лабораторных исследований были проведены опыты по четырем различным технологическим схемам плавки, основной целью которых была оптимизация химического состава заливочного чугуна. Каждая из этих схем включала проведение трех последовательных плавок с использованием различных комбинаций и количеств добавок и материалов. Такой подход позволил систематически оценить влияние выбранных методик обработки расплава и выявить их сравнительные преимущества и недостатки.

Алгоритм проведения экспериментальных плавок, направленных на оптимизацию химического состава заливочного чугуна, в виде обобщенной схемы представлен на Рисунке 3.

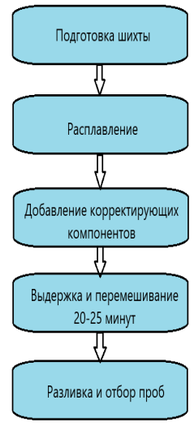


Рисунок 3 – Схема проведения эксперимента

Процедура подготовки шихты для каждой плавки включала точное взвешивание необходимого количества исходного чугуна и всех запланированных добавок (сталеплавильный шлак, известь, графит, ферросплавы) на электронных весах с точностью до 0,1 г. Затем компоненты шихты тщательно перемешивались в течение 5–10 минут для обеспечения максимально равномерного распределения добавок по всему объему.

Процесс плавки проводился при температуре 1500–1550 °C, общее время плавления составляло 20–25 минут. После полного расплавления шихты производилась выдержка полученного жидкого металла при рабочей температуре 1450–1500 °C в течение 15–20 минут. Эта операция была необходима для обеспечения гомогенизации химического состава расплава и более полного протекания реакций. Перемешивание расплава в тигле как в процессе плавки, так и во время выдержки осуществлялось периодически с помощью графитового стержня.

Контроль химического состава чугуна проводился путем отбора проб жидкого расплава непосредственно в процессе плавки (после введения корректирующих добавок и перемешивания) и после завершения периода выдержки. Отобранные пробы анализировались на содержание C, Si, Mn, P, S с использованием упомянутого портативного рентгено-флуоресцентного анализатора.

Разливка готового чугуна по окончании плавки и выдержки осуществлялась в предварительно подготовленные графитовые тигли при температуре 1400–1450 °C. Также после завершения выдержки и перед разливкой проводился отбор пробы металла для качественной оценки его жидкотекучести путем заливки в стандартную литейную форму (спиральная проба по ГОСТ 16438–70, Рисунок 4), а линейную усадку определяли на пробе Нехендзи-Купцова.



Рисунок 4 – Литейная форма для определения жидкотекучести чугуна

Для оценки эксплуатационных характеристик чугуна измеряли перепад электрического напряжения на образцах, имитирующих контакт «стальной ниппель – угольный блок», залитый исследуемым чугуном. Через контакт пропускали стабилизированный постоянный ток, фиксируя падение напряжения высокоточным мультиметром на его границах. Электрическое сопротивление рассчитывали по измеренному падению напряжения, силе тока и геометрическим размерам образца.

Для определения временного сопротивления на сжатие, исследуемый чугун заливали в металлические формы для получения стандартных образцов. Механические испытания этих образцов на сжатие проводили согласно ГОСТ 25.503–97 на гидравлическом прессе с постоянной скоростью нагружения до разрушения, после чего рассчитывали временное сопротивление по максимальному зафиксированному усилию и начальной площади образца. в момент разрушения и начальной площади поперечного сечения образца.

Результаты и обсуждение

В результате проведения первой серии плавок, где в качестве основного корректирующего компонента использовался только сталеплавильный шлак, удалось достичь следующих изменений в химическом составе чугуна:

содержание фосфора в металле снизилось с исходных 1,0 % (Таблица 4) до 0,8–0,85 %, что соответствует степени удаления фосфора на уровне 15–20 %;

содержание серы уменьшилось с 0,12 % до 0,08–0,09 %, что обусловлено взаимодействием оксида кальция (CaO) из состава шлака с серой, растворенной в металле;

наблюдалось также незначительное снижение уровня кремния в чугуне до 2,4–2,5 %, что, вероятно, объясняется его частичным окислением и переходом в шлаковую фазу.

Однако полученные результаты наглядно показали, что использование только сталеплавильного шлака обладает ограниченной эффективностью в части

удаления фосфора из расплава. Остаточный уровень содержания фосфора в чугуне оставался значительно выше целевого значения (менее 0,2 %). Это, обусловлено недостаточным содержанием активных компонентов (в частности, CaO) в использованном количестве шлака и отсутствием дополнительных флюсующих добавок, способствующих повышению активности шлака и интенсификации массообменных процессов.

Кроме того, жидкотекучесть чугуна, полученного в первой серии плавок, оказалась неудовлетворительной. Это выражалось в медленном заполнении спиральной пробы и склонности к образованию дефектов в структуре отливки (рисунок 5).



Рисунок 5 – Жидкотекучесть чугуна, полученного в первой серии плавок

Вероятной причиной этого явилась повышенная вязкость расплава, что затрудняло его протекание по узким каналам литейной формы. Отсутствие в шихте добавок, направленно снижающих вязкость металла и стабилизирующих содержание углерода на оптимальном уровне, также усугубило данную проблему.

Во второй серии плавок в состав шихты дополнительно к сталеплавильному шлаку вводился графит с целью стабилизации уровня углерода в чугуне на заданном уровне. Результаты этой серии плавок показали следующее:

содержание углерода в полученном чугуне стабилизировалось на уровне 3,4–3,6 %, что соответствует целевым требованиям для данного типа чугуна.

снижение содержания фосфора и серы было практически аналогичным результатам первой серии (содержание фосфора – до 0,8 %, серы – до 0,08 % соответственно).

однако содержание кремния в металле продолжало снижаться, достигая значений 2,1–2,2 %.

Таким образом, введение графита эффективно решило проблему дефицита углерода и позволило стабилизировать его содержание в чугуне, но не оказало существенного положительного влияния на процессы удаления примесей

(фосфора и серы). Кроме того, продолжающееся снижение содержания кремния указывало на необходимость его корректировки в последующих сериях плавок для достижения оптимального состава. С добавлением графита ситуация с жидкотекучестью чугуна несколько улучшилась, что, вероятно, связано с повышением содержания углерода. Известно, что углерод способствует снижению вязкости жидкого металла [1-3], что привело к увеличению скорости заполнения спиральной пробы.

В третьей серии плавок для интенсификации процесса удаления фосфора совместно со сталеплавильным шлаком и графитом применялась известь (CaO). Были получены следующие результаты:

содержание фосфора в чугуне снизилось до 0,4–0,5 %, что демонстрирует значительное улучшение процесса дефосфорации по сравнению с первыми двумя сериями плавок;

уровень содержания серы в металле стабилизировался на отметке 0,07–0,08 %, что в целом соответствует целевым требованиям;

содержание кремния оставалось на относительно низком уровне – 2,1–2,2 %, что, возможно, связано с высокой активностью CaO, способствующей образованию силикатов, переходящих в шлак.

В целом, третья серия плавок показала неоднозначные результаты. Применение извести продемонстрировало ее высокую эффективность в удалении фосфора, однако повышенная концентрация CaO в шлаке, вероятно, привела к увеличению его вязкости. Это, в свою очередь, негативно сказалось на жидкотекучести металла, которая, хотя и улучшилась по сравнению с первой серией, оставалась лишь на среднем, не вполне удовлетворительном уровне.

Четвертая серия плавок проводилась с использованием комплексного подхода, который включал применение сталеплавильного шлака, извести, графита, а также ферросплавов (ферросилиция и ферромарганца) для коррекции содержания кремния и марганца. Результаты этой серии оказались следующими:

содержание фосфора в чугуне достигло целевого уровня и составило 0,15–0,18 %, что указывает на высокую эффективность разработанного комплексного подхода к рафинированию;

содержание серы в металле снизилось до 0,05–0,06 %, что является наилучшим показателем среди всех проведенных серий плавок и полностью соответствует предъявляемым требованиям;

уровень содержания кремния и марганца был успешно стабилизирован на значениях 2,4–2,5 % для кремния и 0,7–0,72 % для марганца соответственно, благодаря введению ферросилиция и ферроманганца;

содержание углерода было скорректировано и находилось в оптимальном диапазоне 3,3–3,5 %.

Применение комплексного подхода позволило обеспечить достижение всех целевых параметров химического состава чугуна, который соответствует оптимальному составу [13]. Введение ферросплавов позволило эффективно компенсировать потери кремния и марганца в процессе плавки, а совместное

использование сталеплавильного шлака и извести обеспечило глубокое удаление фосфора и серы.

Жидкотекучесть чугуна, полученного в четвертой серии плавок, была на уровне исходного материала, что объясняется снижением вязкости шлака (за счет оптимизации его состава) и стабилизацией химического состава самого металла.

Быстрое и равномерное заполнение спиральной пробы, а также отсутствие видимых дефектов затвердевания (усадочных раковин, недоливов) подтверждают успешность данного подхода (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Проба на жидкотекучесть плавки 4 серии

Состав чугуна, полученный в четвертой серии, обеспечивает жидкотекучесть порядка 63–71 см (по спиральной пробе сечением 50 мм² при температуре заливки 1450°C) и линейную усадку 0,59–0,67 %, что минимизирует риск образования усадочных дефектов.

Полученные химические составы представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Химические составы исходного и экспериментального чугуна

Чугун	Химический состав, %				
	C	Si	Mn	P	S
Исходный	3,2	2,8	0,7	1,0	0,12
Первой серии (шлак)	3,0–3,1	2,4–2,5	0,4–0,44	0,8–0,85	0,08–0,09
Второй серии (шлак + графит)	3,4–3,6	2,1–2,2	0,5–0,59	0,8–0,85	0,08–0,09
Третьей серии (шлак + известь, графит)	3,4–3,6	2,1–2,2	0,55–0,63	0,4–0,5	0,07–0,08
Четвертой серии (комплексный подход)	3,3–3,5	2,4–2,5	0,7-0,72	0,15–0,18	0,05–0,06

Проведенное комплексное исследование подтвердило эффективность оптимизации химического состава заливочного чугуна, предназначенного для монтажа анодов алюминиевых электролизеров. Основной задачей было улучшение его ключевых технологических и эксплуатационных характеристик, направленных на снижение электрических потерь в контакте «ниппель-анод» и существенное упрощение процесса демонтажа анодов.

Анализ результатов четырех последовательных серий экспериментальных плавок показал, что максимальная эффективность в достижении поставленных целей достигается при реализации комплексного подхода. Этот подход сочетает использование сталеплавильного шлака для основного шлакообразования и первичного рафинирования, извести для усиленного удаления примесей (фосфора и серы), ферросплавов для точной коррекции потерь кремния и марганца и достижения их оптимального содержания, а также графита для стабилизации содержания углерода в заданном диапазоне.

Первые две серии плавок, в которых для рафинирования использовался только сталеплавильный шлак (с добавлением графита во второй серии для стабилизации содержания углерода), продемонстрировали ограниченную эффективность в удалении фосфора, хотя содержание серы и было несколько снижено. Это указывает на недостаточное количество активных рафинирующих компонентов в шлаке для глубокой очистки от фосфора при его самостоятельном применении. Третья серия, с дополнительным введением извести, значительно улучшила степень дефосфорации чугуна за счет повышения основности шлака и высокой химической активности CaO. Однако это привело к некоторому повышению вязкости шлака и, как следствие, не в полной мере решило вопрос обеспечения высокой жидкотекучести металла.

Наиболее успешной оказалась четвертая серия плавок, в которой был реализован комплексный подход, объединяющий все корректирующие компоненты. В результате был получен чугун со следующим оптимизированным химическим составом, мас.%: углерод: 3,3–3,5; кремний: 2,4–2,5; марганец: 0,7–0,72; фосфор: 0,15–0,18; сера: 0,05–0,06; железо – остальное.

Углеродный эквивалент для такого чугуна составляет CE≈4,3 %, что соответствует минимальной температуре перехода в жидкое состояние (эвтектика)

около 1150 °C, способствуя хорошей жидкотекучести. Достигнутые низкие уровни содержания фосфора и серы отвечают современным требованиям, предъявляемым к качеству заливочных чугунов.

Данные математического моделирования процесса и термодинамического анализа [12] подтвердили результаты, полученные в ходе экспериментальных плавок, и позволили глубже проанализировать влияние дозировок используемых компонентов на конечный химический состав и свойства чугуна. Установлено, что:

эффективность сталеплавильного шлака при самостоятельном применении для удаления P и S ограничена. Избыток шлака может привести к увеличению его объема, ухудшению жидкотекучести металла и увеличению потерь кремния. Недостаточное количество шлака неэффективно для удаления примесей;

графит необходим для достижения целевого содержания углерода. Его избыток может привести к ухудшению механических свойств и потенциальному снижению электропроводности из-за выделения избыточного графита. Недостаток углерода ухудшает жидкотекучесть, увеличивает усадку и препятствует формированию желаемой структуры чугуна;

известь (CaO) значительно увеличивает щелочность шлака и эффективность процесса дефосфорации. Однако ее избыток может повысить вязкость шлака, замедляя процессы массообмена между металлом и шлаком. Недостаток извести приводит к неполной и неэффективной дефосфорации;

ферросплавы (FeSi, FeMn) критически важны для компенсации потерь кремния и марганца и достижения их целевых концентраций. Их избыток ведет к перелегированию, изменению структуры и свойств чугуна, а также к неоправданному увеличению затрат. Недостаток приводит к недолегированию и, как следствие, ухудшению физико-механических и литейных свойств. Кремний важен для процесса графитизации и снижения усадки, а марганец – для связывания серы в более тугоплавкие сульфиды и повышения прочности чугуна.

Сравнение свойств полученного чугуна с исходным чугуном, показывает значительные преимущества предложенного состава. Данные испытаний, представленные в Таблице 4, свидетельствуют о существенном улучшении характеристик [13].

Таблица 4 – Свойства чугуна по данным опытных плавок 4 серии в сравнении с исходным

Номер плавки	Перепад напряжений, мВ	Электрическое сопротивление, мкОм·м	Временное сопротивление, МПа	Жидкотекучесть, см	Линейная усадка, %
1	41	1,87	163	69	0,59
2	27	2,91	144	71	0,63
3	35	1,66	151	63	0,67
Исходный чугун	79	5,63	195	60	0,74

Выводы

Анализ данных выявил значительные преимущества предложенного состава чугуна по сравнению с базовым. В частности, перепад напряжений в контакте «ниппель-анод» для нового состава снижен в среднем на 56,5 %. Электрическое сопротивление предложенного чугуна также существенно улучшилось, оказавшись в среднем на 61,8 % ниже. Несмотря на некоторое снижение временного сопротивления, в среднем на 21 %, предложенный состав сохраняет достаточную прочность для своего целевого применения, при этом его хрупкость оптимизирована для облегчения демонтажа. Кроме того, жидкотекучесть нового чугуна в среднем на 12 % выше, что положительно сказывается на технологичности процесса заливки и качестве заполнения формы. Линейная усадка также демонстрирует улучшение, будучи в среднем на 21 % ниже, что минимизирует риск образования усадочных дефектов и способствует лучшему контакту.

Выбранный элементный состав чугуна обеспечивает оптимальный комплекс свойств:

углерод (3,3–3,5 %) и кремний (2,4–2,5 %) в указанных диапазонах критичны для обеспечения оптимальной жидкотекучести и минимизации усадочных дефектов. Сниженное содержание кремния при оптимальном содержании углерода положительно сказывается на снижении электросопротивления чугуна;

марганец (0,7–0,72 %) обеспечивает достаточную прочность чугуна без существенного ущерба для его электропроводности. Он также способствует формированию требуемой микроструктуры и связыванию серы.

фосфор (0,15–0,18 %) необходим для обеспечения высокой жидкотекучести чугуна на стадии заливки анода. Кроме того, он обеспечивает оптимальную хрупкость застывшего чугуна, что критически важно для облегчения полного его удаления при демонтаже огарков, несмотря на некоторое теоретическое увеличение удельного электросопротивления чистой металлической матрицы;

сера (0,05–0,06 %) в данных пределах целенаправленно вводится для получения серого чугуна с равномерно-пластинчатой формой графита. Такая структура обеспечивает высокие литейные свойства и способствует снижению общего электрического сопротивления чугуна за счет особенностей металлической основы.

Полученные результаты соответствуют мировым тенденциям по снижению содержания примесей в чугунах и оптимизации их свойств для конкретных применений [14–18]. Предложенный состав с содержанием фосфора 0,15–0,18 % находится в оптимальном балансе между требованиями к жидкотекучести, необходимой хрупкости для демонтажа и электропроводности. Подтверждено, что содержание серы менее 0,1 % является оптимальным, а достигнутые в работе значения 0,05–0,06 % способствуют формированию благоприятной структуры графита.

Реализованная оптимизация химического состава заливочного чугуна является эффективной и позволяет получать материал с улучшенными эксплуатационными

свойствами, полностью отвечающий требованиям современного производства алюминия, имеющий преимущества перед существующими аналогами и поддерживающий актуальные тенденции ресурсосбережения и повышения энергоэффективности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Kamenov, A. A., Bogomolov, A. V., Bykov, P. O., Zhunusov, A. K., Suyundikov, M. M.** Determination properties of cast iron used in the installation of anodes [Текст] // Metalurgija. – 2023. – Vol. 62, № 1. – P. 107–110.

2 **Каменов, А. А., Богомолов, А. В., Быков, П. О., Суюндиков, М. М., Жунусов, А. К.** Современные составы чугуна, применяемого для заливки анодов алюминиевых электролизеров [Текст] // Труды университета. – 2023. – № 1 (90). – С. 37–38.

3 **Савина, А. Н., Ланьшин, А. В., Бабкин, В. Г., Черепанов, А. И., Кукарцев, В. А.** Чугун для заливки анодов с оптимизированным составом без добавления фосфора [Текст] // Материалы межд. Конгресса «Цветные металлы и минералы – 2017». – Красноярск, 2017. – С. 496–503.

4 **Щепочкина, Ю. А.** Чугун : пат. на изобретение № 2327772 С2 Рос. Федерация : МПК С22С 37/08 (2006.01) [Текст] – № 2006114931/02 ; заявл. 02.05.2006 ; опубл. 27.06.2008, Бюл. № 18.

5 **Hil, I. B., Oye, B. A., Onsoien, M. I., Nordmark, A.** Optimization of the anode-stub contact: material properties of cast iron [Текст] // Light Metals 2010. – 2010. – P. 1073–1078.

6 **Mohamed, M. A., et al.** Characterization of new cast iron alloys for the stub-anode connection in the aluminium reduction cells [Текст] // Journal of Engineering Research and Application. – 2013. – Volume 3, Issue 5. – P. 414–419.

7 **Jacob, L.** Ladle furnace slag: synthesis, properties, and applications [Текст] // ChemBioEng Reviews. – 2024. – Vol. 11, №. 1. – P. 60–78.

8 **Шешуков, О. Ю., Михеенков, М. А., Лобанов, Д. А., Некрасов, И. В., Егиазарьян, Д. К.** Определение возможности получения товарных силикатных продуктов и выплавки чугуна из шлаковых техногенных образований [Текст] // Теория и технология металлургического производства. – 2017. – № 1 (20). – С. 82–87.

9 **Егиазарьян, Д. К.** Разработка энерго- и ресурсосберегающей технологии обработки стали на агрегате «ковш-печь» на основе анализа физико-химических и электрических характеристик шлака : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов. [Текст] – Екатеринбург, 2016. – 23 с.

10 **Mikheenkov, M. A., Sheshukov, O. Yu., Egiazar'yan, D. K., Nekrasov, I. V., Lobanov, D. A., Zuev, M. V.** Unit ladle-furnace: slag forming conditions and stabilization [Текст] // KnE Materials Science. – 2017. – Vol. 2, № 1. – P. 345–352.

11 **Мурысёв, В. А., Шешуков, О. Ю., Сафонов, В. М., Сомов, С. А., Метелкин, А. А., Егиазарьян, Д. К.** Оценка гомогенности рафинировочного шлака акп расчетным и экспериментальным методами [Текст] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2024. – № 2. – Т. 67. – С. 140–147.

12 **Каменов, А. А., Богомолов, А. В.** Математическое моделирование оптимизации химического состава заливочного чугуна для алюминиевых электролизеров [Текст] // Торайғыров университетінің 65 жылдығына арналған «XXV Сәтбаев оқулары» атты Халықаралық ғылыми конференцияның материалдары. – Павлодар : Торайғыров университеті. Т. 15 «Жас ғалымдар». – 2025. – С. 262–266.

13 **Каменов, А. А., Богомолов, А. В., Жакупов, А. Н., Суюндиков, М. М., Жунусов, А. К., Быков, П. О.** Чугун : пат. на полез. модель № 10455 U Респ. Казахстан : МПК C22C 37/10 (2006.01) [Текст] – № 2025/0371.2 ; заявл. 07.03.2025 ; опубл. 25.04.2025, Бюл. № 17.

14 **Liu, X., Ma, S., Wang, L., Nan, Z., Tan, X., Diop, M. A.** Thermo-mechanical studies of thimble geometry and stub materials for voltage drop across the anode-rod connection in aluminum electrolysis cell [Текст]// Journal of Sustainable Metallurgy. – 2022. – Vol. 8. – P. 1785–1802.

15 **Fortin, H., Kandev, N., Fafard, M.** Fem analysis of voltage drop in the anode connector induced by steel stub diameter reduction [Текст] // Finite Elements in Analysis and Design. – 2012. – Vol. 52. – P. 71–82.

16 **Li, T., Tao, W., Wang, Z., Liu, X., Hou, J.** Numerical simulation on the transient temperature feld of anode rodding in aluminium reduction cells [Текст] // Metals. – 2018. – Vol. 8(12). – P. 1026–1048.

17 **Li, Y., Martín, D. S., Wang, J.** A review of the thermal stability of metastable austenite in steels: martensite formation [Текст] // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 91. – P. 200–214.

18 **Wilkening, S., Cote, J.** Problem of the stub-anode connection [Текст]. Proceedings of the TMS Light Metals. – 2007. – P. 865–873.

19 **Фризоргер, В. К., Козьмин, Г. Д., Шпаков, В. И., Непомнящий, В. Н., Абрамов, А. А., Можаев, В. М., Громов, Б. С., Поляков, П. В., Кулинич, Г. Г., Куничкин, С. М.** Чугун : А. с. № 1073318 А1 СССР : МПК C22C 37/10 (2006.01) [Текст] – № 3515161/22-02 ; заявл. 28.09.1982 ; опубл. 15.02.1984, Бюл. № 6.

20 **Бобро, Ю. Г.** Легированные чугуны [Текст]. – М. : Металлургия, 1978. – С. 145.

REFERENCES

1 **Kamenov, A. A., Bogomolov, A. V., Bykov, P. O., Zhunusov, A. K., Suyundikov, M. M.** Determination properties of cast iron used in the installation of anodes [Text] // Metalurgija. – 2023. – Vol. 62, № 1. – P. 107–110.

2 **Kamenov, A. A., Bogomolov, A. V., Bykov, P. O., Suyundikov, M. M., Zhunusov, A. K.** Sovremennye sostavy chuguna, primenyaemogo dlya zalivki anodov alyuminievyx elektrolizerov [Modern compositions of cast iron used for pouring anodes of aluminum electrolytic cells] [Text] // Trudy universiteta. – 2023. – № 1 (90). – P. 37–38.

3 **Savina, A. N., Lanshin, A. V., Babkin, V. G., Cherepanov, A. I., Kukarcev, V. A.** Chugun dlya zalivki anodov s optimizirovannym sostavom bez dobavleniya fosfora [Cast iron for pouring anodes with an optimized composition without phosphorus addition.] [Text] // Materialy mezhd. Kongressa «Czvetnye metally i mineraly – 2017». – Krasnoyarsk, 2017. – P. 496–503.

4 **Shhepochkina, Yu. A.** Chugun : pat. na izobretenie № 2327772 C2 Ros. Federaciya : MPK C22C 37/08 (2006.01) [Cast Iron : Patent for invention No. 2327772 C2 Russian Federation : IPC C22C 37/08 (2006.01)] [Text] – № 2006114931/02 ; zayavl. 02.05.2006 ; opubl. 27.06.2008, Byul. № 18.

5 **Hil, I. B., Oye, B. A., Onsoien, M. I., Nordmark, A.** Optimization of the anode-stub contact: material properties of cast iron [Text] // Light Metals 2010. – 2010. – P. 1073–1078.

6 **Mohamed, M. A., et al.** Characterization of new cast iron alloys for the stub-anode connection in the aluminium reduction cells [Text] // Journal of Engineering Research and Application. – 2013. – Volume 3, Issue 5. – P. 414–419.

7 **Jacob, L.** Ladle furnace slag: synthesis, properties, and applications [Text] // ChemBioEng Reviews. – 2024. – Vol. 11, № 1. – P. 60–78.

8 **Sheshukov, O. Yu., Mixeenkov, M. A., Lobanov, D. A., Nekrasov, I. V., Egiazaryan, D. K.** Opredelenie vozmozhnosti polucheniya tovarnyx silikatnyx produktov i vyplavki chuguna iz shlakovyx texnogennyx obrazovanij [Determination of the possibility of obtaining commercial silicate products and smelting cast iron from slag technogenic formations] [Text] // Teoriya i texnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. – 2017. – № 1 (20). – P. 82–87.

9 **Egiazaryan, D. K.** Razrabotka energo- i resursosberegayushhej texnologii obrabotki stali na agregate «kovsh-pech» na osnove analiza fiziko-ximicheskix i elektricheskix xarakteristik shlaka : avtoref. dis. ... kand. texn. nauk : 05.16.02 – Metallurgiya chernyx, czvetnyx i redkix metallov [Development of an energy- and resource-saving technology for steel treatment in a ladle furnace unit based on the analysis of physicochemical and electrical characteristics of slag: Author's abstract of Cand. Sc. (Eng.) dissertation] [Text] – Ekaterinburg, 2016. – 23 P.

10 **Mikheenkov, M. A., Sheshukov, O. Yu., Egiazar'yan, D. K., Nekrasov, I. V., Lobanov, D. A., Zuev, M. V.** Unit ladle-furnace: slag forming conditions and stabilization [Text] // KnE Materials Science. – 2017. – Vol. 2, № 1. – P. 345–352.

11 **Murysyov, V. A., Sheshukov, O. Yu., Safonov, V. M., Somov, S. A., Metelkin, A. A., Egiazaryan, D. K.** Ocenka gomogennosti rafinirovochnogo shlaka akp raschetnym i eksperimentalnym metodami [Assessment of the homogeneity of refining slag in a ladle furnace unit by calculation and experimental methods] [Text] // Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. – 2024. – № 2. – T. 67. – P. 140–147.

12 **Kamenov, A. A., Bogomolov, A. V.** Matematicheskoe modelirovanie optimizacii ximicheskogo sostava zalivochnogo chuguna dlya alyuminievyx elektrolizerov [Mathematical modeling of the optimization of the chemical composition of cast iron for aluminum electrolytic cells] [Text] // Torajgyrov universitetinin 65 zhyldygyna arnalgan «XXV Satbaev oqulary» atty Halyqaralyq gylymi konferenciyanyn materialdary. – Pavlodar : Torajgyrov universiteti. T. 15 «Zhas galymdar». – 2025. – P. 262–266.

13 **Kamenov, A. A., Bogomolov, A. V., Zhakupov, A. N., Suyundikov, M. M., Zhunusov, A. K., Bykov, P. O.** Chugun : pat. na polez. model № 10455U Resp. Kazaxstan : MPK C22C 37/10 (2006.01) [Cast Iron: Utility Model Patent No. 10455U Republic of Kazakhstan: IPC C22C 37/10 (2006.01).] [Text] – № 2025/0371.2 ; zayavl. 07.03.2025 ; opubl. 25.04.2025, Byul. № 17.

14 **Liu, X., Ma, S., Wang, L., Nan, Z., Tan, X., Diop, M. A.** Thermo-mechanical studies of thimble geometry and stub materials for voltage drop across the anode-rod connection in aluminum electrolysis cell [Text] // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2022. – Vol. 8. – P. 1785–1802.

15 **Fortin, H., Kandev, N., Fafard, M.** Fem analysis of voltage drop in the anode connector induced by steel stub diameter reduction [Text] // Finite Elements in Analysis and Design. – 2012. – Vol. 52. – P. 71–82.

16 **Li, T., Tao, W., Wang, Z., Liu, X., Hou, J.** Numerical simulation on the transient temperature feld of anode rodding in aluminium reduction cells [Text] // Metals. – 2018. – Vol. 8(12). – P. 1026–1048.

17 **Li, Y., Martín, D. S., Wang, J.** A review of the thermal stability of metastable austenite in steels: martensite formation [Text] // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 91. – P. 200–214.

18 **Wilkening, S., Cote, J.** Problem of the stub-anode connection [Text]. Proceedings of the TMS Light Metals. – 2007. – P. 865–873.

19 **Frizorger, V. K., Kozmin, G. D., Shpakov, V. I., Nepomnyashhij, V. N., Abramov, A. A., Mozhaev, V. M., Gromov, B. S., Polyakov, P. V., Kulinich, G. G., Kunichkin, S. M.** Chugun : A. s. № 1073318 A1 SSSR : MPK C22C 37/10 (2006.01) [Cast Iron : Author's Certificate No. 1073318 A1 USSR : IPC C22C 37/10 (2006.01)] [Text] – № 3515161/22-02 ; zayavl. 28.09.1982 ; opubl. 15.02.1984, Byul. № 6.

20 **Bobro, Yu. G.** Legirovannye chuguny [Alloyed Cast Irons] [Text]. – M. : Metallurgiya, 1978. – P. 145.

А. А. Каменов[1], А. В. Богомолов[2], А. Н. Жакупов[3],
Т. А. Рыспаев[4], Н. К. Кулумбаев[5]
[1,2,3,5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[4]Ош технологиялық университеті, Қырғызстан, Ош қ.

ҚҰЙМА ШОЙЫННЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұл жұмыстың мақсаты – алюминий электролизерлерінің анодтарын монтаждауда қолданылатын құйма шойынның химиялық құрамын ожау-пеш агрегатының (ОПА) болат балқыту қожын және басқа да түзеткіш қоспаларды пайдалана отырып, оңтайландыруды эксперименттік негіздеу. Шойынды оңтайландыру оның пайдалану қасиеттерін жақсартуға бағытталған. Бұл «ниппель-анод» түйіспесінде электролиз кезіндегі кернеу мен энергия шығынын азайту үшін электрлік кедергіні төмендетуді қамтиды. Сондай-ақ, анодтарды бөлшектеу кезінде шойынның оңай әрі толық жойылуын қамтамасыз ететін сыну мен беріктіктің үйлесіміне қол жеткізу өте маңызды.

Зерттеу көрсеткендей, тек болат балқыту қожын түзеткіш компонент ретінде пайдалану, әсіресе фосфор мен күкіртті жою бөлігінде, шектеулі тиімділікке ие. Алайда, болат балқыту қожын, күшейтілген дефосфорация мен десульфурация үшін әкті, көміртекті тұрақтандыру үшін графитті, сондай-ақ кремний мен марганец мөлшерін түзету үшін ферроқорытпаларды бірлесіп пайдалануды қамтитын әзірленген кешенді тәсіл жоғары тиімділік көрсетті.

Нәтижесінде оңтайландырылған химиялық құрамы бар шойын алынды (салм.%): көміртек 3,3–3,5; кремний 2,4–2,5; марганец 0,7–0,72; фосфор 0,15–0,18; күкірт 0,05–0,06. Бұл құрам қоспаларды тиімді жойып қана қоймай, сонымен қатар шойынның мақсатты құрылымы мен қасиеттерінің қалыптасуын қамтамасыз етеді, бұл оның пайдалану сипаттамаларының едәуір жақсаруына әкеледі және сынақ нәтижелерімен расталды.

Кілтті сөздер: шойын, болат балқыту қожы, химиялық құрам, индукциялық балқыту, ферроқорытпалар, шойынның аққыштығы.

A. A. Kamenov[1], A. V. Bogomolov[2], A. N. Zhakupov[3],
T. A. Ryspayev[4], N. K. Kulumbayev[5]
[1,2,3,5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
[4]Osh Technological University, Kyrgyzstan, Osh

OPTIMIZATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF POURING CAST IRON

The aim of this work is the experimental substantiation for optimizing the chemical composition of pouring cast iron used in the assembly of anodes for aluminum electrolysis cells, utilizing steelmaking slag from a ladle furnace (LF) and other corrective additives. The optimization of the cast iron is focused on improving its operational properties. This includes reducing electrical resistivity to decrease voltage and energy losses during electrolysis in the "nipple-anode" contact. It is also critically important to achieve a combination of brittleness and strength that ensures easy and complete removal of the cast iron during anode dismantling.

The study showed that using only steelmaking slag as a corrective component has limited effectiveness, especially in terms of phosphorus and sulfur removal. However, a developed comprehensive approach, involving the combined use of steelmaking slag, lime for enhanced dephosphorization and desulfurization, graphite for carbon stabilization, and ferroalloys for correcting silicon and manganese content, demonstrated high efficiency.

As a result, cast iron with an optimized chemical composition was obtained (wt.%): carbon 3.3–3.5; silicon 2.4–2.5; manganese 0.7–0.72; phosphorus 0.15–0.18; sulfur 0.05–0.06. This composition ensures not only the effective removal of impurities but also the formation of the target structure and properties of the cast iron, leading to a significant improvement in its operational characteristics, as confirmed by test results.

Keywords: cast iron, steelmaking slag, chemical composition, induction melting, ferroalloys, cast iron fluidity.

МРНТИ 53.37.35
DOI

В. Ю. Куликов[1], Е. А. *Байсеитова[2], П. В. Ковалев[3],
Ш. Н. Тулегенова[4], Е. И. Малашкевичуте-Брийан[5]
[1,2,4,5]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Республика Казахстан, г. Караганда
[3]НИУ Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6191-8569
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8412-6627
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-3812
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0750-1233
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0368-0788
*e-mail: aglanovna@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА СВЯЗУЮЩЕГО НА СВОЙСТВА БРИКЕТА, ИЗГОТАВЛИВАЕМОГО В ЦЕЛЯХ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

В данной работе исследуется влияние состава связующего на свойства брикетов, предназначенных для вторичной переработки стружковых отходов шарикоподшипниковой стали. Важность данного исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных методов переработки металлических отходов с целью снижения воздействия на окружающую среду и увеличения ресурсоэффективности производства.

В ходе эксперимента получены брикеты путем прессовки на лабораторном гидравлическом прессе, путем отработки режимов прессования. Были изучены связующие элементы, а также их влияние на прочность брикетов, которые влияют на процессы плавления и восстановления металла. Результаты показали, что состав связующего существенно влияет на прочность и газопроницаемость брикетов и их устойчивость к термическим воздействиям, что, в свою очередь, определяет эффективность переработки отходов.

Работа имеет практическую значимость для разработки новых технологий переработки металлических отходов, улучшения качества продукции и повышения экономической эффективности переработки шарикоподшипниковой стали.

Кроме того, исследование позволяет оптимизировать выбор связующих материалов, что может снизить затраты на производство брикетов и улучшить их характеристики. Разработка более устойчивых и прочных брикетов способствует повышению долговечности оборудования, используемого для плавки и восстановления металла. В дальнейшем, результаты могут быть использованы для масштабирования технологии переработки на промышленные предприятия, что откроет новые возможности для вторичной переработки и сокращения образования отходов. Технологии, разработанные

в рамках данного исследования, могут стать основой для более широкого применения в металлургической промышленности.

Ключевые слова. промышленные отходы, брикеты, стружка, металлическая стружка, компонент, сушка, комплексные составы.

Введение

Вопрос рециклинга промышленных отходов на сегодняшний день является одной из наиболее главенствующих проблем в Казахстане. Источниками образования металлургических отходов в Казахстане являются предприятия металлургических и машиностроительных комплексов. Учитывая огромную значимость развития этих отраслей в экономике страны, можно смело судить о больших объемах производственных отходов. Следовательно, при плавке одной тонны стали образуется около 650–700 кг различных отходов, шламов. Часть этих отходов зачастую используются для изготовления строительных материалов. Также большие объемы отходов образуются на металлообрабатывающих на предприятиях. При механической обработке на современных станках образуется до 100 кг стружки и шлифовальных шламов в час. Стружковые отходы несмотря на то, что являются источником вторичных ресурсов, в частности особо нигде не используются и, следовательно, загрязняют окружающую среду. Они могут иметь в своем составе около 65–70 % металла в виде стружек различных размеров. Несмотря на это, на сегодняшний день разработка технологии переработки металлических отходов в целях ее повторной реализации в производстве является одной из недоработанных проблем [1,2,3,4].

В этой связи ставим цель получения брикетов из металлических стружек образующихся после механической обработки деталей на предприятии ТОО «Карагандинский машиностроительный завод имени Пархоменко» (г. Караганда).

Материалы исследования

В качестве исходного материала использовали металлическую стружку стали ШХ15, который образуется после механической обработки колец и роликов подшипников в условиях ТОО «КМЗ им. Пархоменко».

Исходный материал для проведения исследований – металлическая стружка стали ШХ15 имеет химический состав, приведенный в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали ШХ15, %

Материал	Содержание элементов						
	Fe	C	S	Si	Mn	Cr	O
Стружка ШХ15	94,58	1,29	0,07	0,3	0,3	2,0	1,46
Сталь ШХ15 ГОСТ 801–78	94,51…97,38	0,95…1,05	до 0,02	0,17…0,37	0,20…0,40	1,30…1,65	до 2

В практике существуют различные виды связующих веществ при брикетировании отходов, такие как жидкое стекло, бентонитовая глина, органический полимер, полистирол и т.д..

В данном исследовании в качестве связующего сравниваются бентонитовая глина и жидкое стекло. Можно заметить, что зачастую как связующее используется жидкое стекло, однако, имеется ряд исследований по применению других компонентов в качестве связующих веществ.

Химический состав образца изучался на спектрометре СПАС-05. Газопроницаемость образцов провели на приборе компрессионного типа 04315М. Микроструктуру брикетов изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). На напольной машине Instron 5982 провели определение предела прочности на сжатие [5].

Методика исследования

Изначально детали из стали ШХ15 проходят механическую обработку на шлифовальных станках, вследствие чего образуется стружка, который затем подается в колодцы отстаивания, а оттуда отводится в инженерные сети для утилизации через трубопроводы. В инженерной сети стружка проходит фильтрацию, далее собирается в емкости и вывозится в участок отстаивания для дальнейшего хранения. Далее из мест хранения берем образцы для брикетирования и дальнейшей отработки режимов плавки с целью получения качественных слитков [6,7].

Содержание углерода и серы в порошке значительно выше, чем у стали ШХ15. Это связано с наличием загрязнений в металлической стружке остатков смазочно-охлаждающей жидкости. Химический состав определяли на спектрометре.

Анализ фракционного состава металлической стружки определяли с использованием аналитической просеивающей машины Retsch (Германия). Данный анализ показал, что основная масса частиц (≈ 70 %) относится к фракции 0-0,6 мм. Фракция 0,7-1,0 мм составила ≈ 25 % всех частиц. Содержание частиц> 1 мм составили менее 5 %.

Далее смешивание компонентов, в состав которых входили бентонитовая глина и жидкое стекло, осуществлялось на лабораторных бегунах каткового типа. Комплексные составы исследуемых образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Комплексные составы образцов брикетов

Компонент	Содержание компонента в образце					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Металлическая стружка стали ШХ15	80	80	80	85	85	85
Вода	5	5	5	5	5	5
Жидкое стекло	10	8	6	7	5	3
Глина бентонитовая	5	7	9	3	5	7

Основополагающими факторами при проведении исследований были различные соотношения этих добавок. Затем полученные составы прессовались с помощью пресс-формы диаметром 20 мм с использованием лабораторного

гидравлического пресса РП-50 давлением до 500кН. Последующее спекание образцов провели в сушильном шкафу Snol-67/350.

Режимы изготовления брикетов проводились по двум режимам с применением одинаковых температурных режимов с различной величиной давления на прессе (таблица 4).

С целью определения оптимального режима сушки брикетов, была проведена сушка брикетов – по 3 брикета при каждой выбранной температуре в печи Snol-67/350, при этом через каждые полчаса определяли массу брикетов для определения количества испарения воды. Наиболее оптимальным режимом сушки брикетов оказались параметры образца №4 (таблица 3), где при начальной температуре 600С нагретом до 60 минут брикет высушен до 90^{O}С в течении 90 минут.

Таблица 3 – Подбор оптимальных режимов времени и сушки брикетов

Образцы брикета	Время сушки, мин		Температура сушки, ^{0}С		Испарение воды, г	
	нач.	конеч.	нач.	конеч.	нач.	конеч.
Образец № 1	40	80	50	100	0,3	0,39
Образец № 2	45	75	65	80	0,26	0,3
Образец № 3	50	75	55	90	0,3	0,35
Образец № 4	60	90	60	80	0,2	0,25
Образец № 5	45	65	65	85	0,27	0,32
Образец № 6	40	70	60	80	0,28	0,31

Скорость сушки брикетов зависит от площади поверхности, а также температуры сушки брикетов. В том числе за счет испарения воды во время сушки меняется время сушки. То есть время сушки уменьшается при более высокой температуре. Из этого делаем вывод, что оптимальным временем для сушки брикетов является 90 мин, а температура сушки 80 ^{O}С (таблица 3). Так как при этих режимах наблюдается более оптимальные прочностные свойства брикетов, которые способствуют безопасной транспортировке и дальнейшей лояльной плавке брикетов в индукционных печах.



Рисунок 1 – Образцы брикетов после сушки

Таблица 4 – Режимы прессования брикетов из металлической стружки стали ШХ15

Вид связующей добавки	Режим	Температура сушки, ^{0}С	Продолжительность сушки, мин	Давление прессования, кН
Образец № 1	A	80	90	40
	B	80	90	50
	C	80	90	60
Образец № 2	A	80	90	40
	B	80	90	50
	C	80	90	60
Образец № 3	A	80	90	40
	B	80	90	50
	C	80	90	60
Образец № 4	A	80	90	40
	B	80	90	50
	C	80	90	60
Образец № 5	A	80	90	40
	B	80	90	50
	C	80	90	60
Образец № 6	A	80	90	40
	B	80	90	50
	C	80	90	60

Результаты исследований

По результатам исследований определены характеристики прочности (таблица 5) полученных брикетов (рисунок 1).

Оптимальные прочностные свойства дают возможность избежать хрупкого разрушения брикетов. Для улучшения прочности брикетов необходимо уменьшение пористости, чего можно добиться уменьшением газопроницаемости.

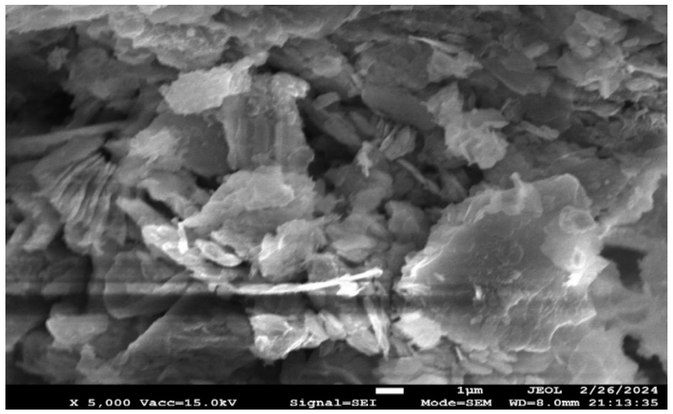
Таблица 5 – Механические и технологические свойства образцов

Образец/режим	Характеристика	
	Предел прочности на сжатие, МПа	Газопроницаемость, ед.
№ 1 А	80	78
№ 1 В	83	77
№ 1 С	84	71
№ 2 А	77	85
№ 2 В	79	84
№ 2 С	83	85
№ 3 А	73	90
№ 3 В	77	89
№ 3 С	78	84
№ 4 А	91	90
№ 4 В	96	89
№ 4 С	97	84
№ 5 А	86	92
№ 5 В	82	87
№ 5 С	90	85
№ 6 А	85	91
№ 6 В	87	90
№ 6 С	91	86

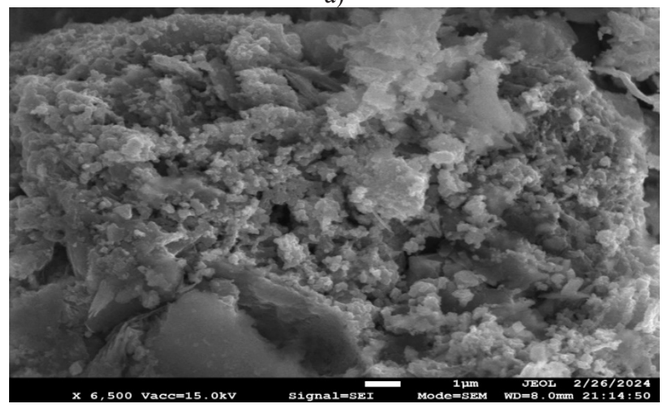
При брикетировании металлургических отходов важнейшим показателем качества выступает прочность полученных брикетов. Факторы, обеспечивающие наиболее лучшие прочностные характеристики брикетов – оптимальный режим прессования и спекания, а также выбор связующего вещества, обеспечивающего наилучшую связку смешиваемых компонентов.

В этой связи касательно подбора оптимального связующего для конечных брикетов, можем заявить, что замещение жидкого стекла бентонитовой глиной при соблюдении тех же режимов прессования и спекания способствует увеличению прочности полученного брикета. Упрочнение брикетов достигается за счет хорошей адгезионной способности в среде жидкого стекла, а также хороших обволакивающих способностей дисперсных частиц металлической стружки глиной [8,9,10].

Во избежание хрупкого разрушения в результате вероятных нагрузок на брикеты оптимальное содержание связующего вещества составляет порядка 10 %. Так как при условии превышения данного соотношения будет наблюдаться более толстая прослойка между частицами, что приведет к хрупкому разрушению (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Структура брикета, полученного на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) с содержанием в составе связующего вещества: а) более 10%; б) менее 10%

Оптимальным давлением для брикетов с комплексным составом связующего вещества является величина 50 кН, так как дальнейшее увеличение давления на брикеты является нецелесообразным в виду повышенных энергозатрат при почти отсутствии увеличения прочности брикетов.

Заключение

Металлическая стружка в качестве компонента металлошихты в целях внедрения дальнейшего плавильного процесса требует предварительной подготовки за счет низкой прочности. Вследствие этого, для улучшения технологических свойств применяли окускование методом холодного брикетирования со связующими компонентами.

По результатам экспериментальных исследований определено, что наиболее оптимальным составом полученных брикетов является: металлическая стружка из отходов стали ШХ15 – 85%, жидкое стекло – 5%, глина бентонитовая – 3 %. Режимы изготовления брикетов: температура сушки – 80 0С в течение 90 мин, давление прессования – 50 кН.

На основании проведенных исследований можно заключить, что получение качественных брикетов из металлической стружки из отходов стали ШХ15 является начальной стадией на пути к получению качественного стального слитка.

Исследование дает начало к рациональной утилизации стружковых отходов и повторное ее использование в производстве, что позволяет актуализировать комплексные мероприятия, направленные на снижение потерь материала и в том числе вовлечение его в новый технологический цикл, а также закладывает пути для уменьшения загрязнения окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Курунов И. Ф., Титов В. Н. Большакова О. Г.** Анализ эффективности альтернативных путей рециклинга железосодержащих металлургических отходов./ Металлург, 2006. – № 11. – С. 39–42.

2 **Валицкая О. М.** Технологические характеристики металлической стружки/ О.М. Валицкая, М.П. Селицкая // Машиностроение и машиноведение/ Вестник ГГТУ ИМ. П.О. СУХОГО. – № 1. – 2010. – С. 23–32.

3 **Дьяконов О. М.** Получение металлургических брикетов на основе стружко-порошковых композиций горячим прессованием. // Литьё и металлургия. – 2011. – № 4. – С. 129–137.

4 **Злотников Е. Г.** Современные технологии переработки и брикетирования металлической стружки в автоматизированных производствах/ Е.Г. Злотников, В.В. Максаров // Записки Горного Института СПБ. – 2014. – С. 37–40.

5 **Бижанов А. М., Курунов И. Ф., Дуров Н. М. и др.** Исследование механической прочности брэкса. Ч. 2 // Металлург. – 2012. – № 10. – С. 36.

6 **Маймур Б. Н.** Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода / Б. Н. Маймур, В. И. Петренко//Черная металлургия. – 2016. – № 3. – С. 74–80.

7 **Ожогин В. В.** Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья: монография. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. 442 с.

8 **Далмиа Й. К., Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бажанов А. М.** Производство и применение в доменной печи брикетов нового поколения / // Металлург. – 2012. – № 3. – С. 39–41.

9 **Бабанин В. И., Еремин А. Я.** Брикетирование мелкозернистых материалов в ферросплавном производстве: опыт и возможности / // Металлург. – 2006. – № 5. – С. 45–49.

10 **Равич Б. М.** Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б.М. Равич. – М.: Металлургия, 2011. – 232 с.

REFERENCES

1 **Kurunov I. F., Titov V. N. and Bolshakova O. G.** Analysis of the efficiency of alternative ways of recycling iron-bearing metallurgical waste. / Metallurgy, 2006, 11. – P. 39–42.

2 **Valica O. M.** Technological characteristics of metal shavings / O.M. Valica, M.P. Selycka // Mechanical engineering and machine science / The Herald of GSTU IM. P.O. DRY 1. – 2010. – C. 23–32.

3 **Diakonov O. M.** Production of metallurgical briquettes based on particle-powder compositions by hot pressing. // Casting and metallurgy. – 2011. – 4. – C. 129–137.

4 **Zlotnikov E. G.** Modern technologies of processing and briquetting of metal chips in automated production / E. G. G. Zlotnikov, V. V. Makarov // Notes of the Mining Institute of the Russian Federation - Russian Federation, 2014. – C. 37–40.

5 **Bizhanov A. M., Kurunov I. F., Durov N. M. et al.** Research of mechanical strength of the crack. Ch. 2 // Metallurg. – 2012. – № 10. – P. 36., 74–80.

6 **Maymur B. N.** Metallurgical raw material briquetting. Relevance and development of the method / B. N. Maymur, V. I. Petrenko // Ferrous metallurgy. – 2016. – C. 3.

7 **Ozhogin V. V.** Basic theory and technology of briquetting Ground metallurgical raw material: monograph. -C. Mariupol: PGTU, 2010. – 442 p.

8 **Dalmia J. K., Kurunov I. F., Steel R. B., Bazhanov A. M.** Production and application in the new generation briquettes furnace // Metallurgy. – 2012. – № 3. – C. 39–41.

9 **Babanin V. I., Yeremin A. Y.** Briquetting of fine-grained materials in ferroalloy production: experience and opportunities // Metallurgy. – 2006. – № 5. – P. 45–49.

10 **Ravich B. M.** Briquetting in the Color and Iron Metallurgy / B. M. Ravich. – M. : Metallurgy, 2011. – 232 c.

В. Ю. Куликов[1], *Е. А. Байсеитова[1], П. В. Ковалев[2],
Ш. Н. Тулегенова[1], Е. И. Малашкевичуте-Брийан[1]
[1]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[2]ҰЗУ Санкт-Петербург Ұлы Петр политехникалық университеті,
Санкт-Петербург қ.

ШАРЛЫ ПОДШИПНИКТІ БОЛАТ ҚАЛДЫҚТАРЫН ҚАЙТА ӨҢДЕУ МАҚСАТЫНДА ӨНДІРІЛЕТІН БРИКЕТТЕРДІҢ ҚАСИЕТТЕРІНЕ БАЙЛАНЫСТЫРҒЫШ ҚҰРАМЫНЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста байланыстырушы құрамның шарикті болат чиптерінің қалдықтарын қайта өңдеуге арналған брикеттердің қасиеттеріне әсері зерттелген. Бұл зерттеудің маңыздылығы қоршаған ортаға әсерді азайту және өндірістің ресурстық тиімділігін арттыру мақсатында металл қалдықтарын қайта өңдеудің тиімді әдістерін жасау қажеттілігімен байланысты.

Тәжірибе барысында брикеттер зертханалық гидравликалық престі басу арқылы, престеу режимдерін сынау арқылы алынды. Байланыстырушы элементтер, сондай-ақ олардың металдың балқу және тотықсыздану процестеріне әсер ететін брикеттердің беріктігіне әсері зерттелді. Нәтижелер байланыстырғыштың құрамы брикеттердің беріктігі мен газ өткізгіштігіне және олардың жылу әсерлеріне төзімділігіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті, бұл өз кезегінде қалдықтарды өңдеудің тиімділігін анықтайды.

Жұмыстың металл қалдықтарын қайта өңдеудің жаңа технологияларын әзірлеу, өнімнің сапасын жақсарту және шарикті болатты қайта өңдеудің экономикалық тиімділігін арттыру үшін практикалық маңызы бар.

Бұдан басқа, зерттеу байланыстырушы материалдарды таңдауды оңтайландыруға мүмкіндік береді, бұл брикеттер өндірісіне жұмсалатын шығындарды азайтады және олардың сипаттамаларын жақсартады. Негұрлым орнықты және берік брикеттерді әзірлеу металды балқыту және қалпына келтіру үшін пайдаланылатын жабдықтың ұзақтығын арттыруға ықпал етеді. Кейіннен, нәтижелер қайта өңдеу технологиясын өнеркәсіптік кәсіпорындарға масштабтау үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл қайта өңдеу және қалдықтардың түзілуін қысқарту үшін жаңа мүмкіндіктер ашады. Осы зерттеу шеңберінде әзірленген технологиялар металлургия өнеркәсібінде кеңінен қолдануға негіз бола алады.

Кілтті сөздер: өнеркәсіптік қалдықтар, брикеттер, жоңқалар, металл жоңқалары, компоненттер, кептіру, күрделі композициялар.

V. Y. Kulikov[1], *Y. A. Baiseitova[1], P. V. Kovalev[2],
Sh. N. Tulegenova[1], Y. I. Malashkevichute-Brillant[1]
[1]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
[2]NRU Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

STUDY OF THE INFLUENCE OF A BINDER COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF A BRIQUETTE MANUFACTURED FOR THE RECYCLING OF BALL-BEARING STEEL WASTE

In this paper the influence of the binder composition on the properties of briquettes intended for recycling of ball bearing steel chip waste is investigated. The importance of this study is due to the need to develop efficient methods for recycling metal waste in order to reduce environmental impact and increase the resource efficiency of production.

During the experiment, briquettes were obtained by pressing on a laboratory hydraulic press, by testing of the pressing modes. The binding elements were studied, as well as their influence on the strength of briquettes that affect the melting and recovery processes of the metal. The results showed that the binder composition significantly affects the strength and gas permeability of the briquettes and their resistance to thermal effects, which in turn determines the efficiency of waste treatment.

The work has practical significance for developing new technologies of metal waste recycling, improving product quality and increasing economic efficiency of ball bearing steel recycling.

In addition, the study allows to optimize the choice of binding materials, which can reduce the cost of production of briquettes and improve their performance. Developing more durable and durable briquettes helps to increase the durability of equipment used for metal smelting and recovery. The results can be used to scale recycling technology into industrial facilities, opening up new opportunities for recycling and reducing waste generation. The technologies developed in this study could be used to develop a wider application in the metallurgical industry.

Keywords. industrial waste, briquettes, chips, metal chips, components, drying, complex compositions.

SRSTI 53.01.04
DOI

S. A. Laikhan[1], B. Zh. Salkynbayev[2], N. A. Ulmaganbetov[3], M. K. Jundibayev[4], R. M. Zhdanov[5]
[1,2,3,4,5]ERG Research and Engineering Center LLP,
Republic of Kazakhstan, Aktobe
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6847-4075
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1296-899X
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4747-9381
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2915-378X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0037-0856
*e-mail: Salamat.laikhan@erg.kz

PELLETIZING OF FINE CHROME RAW MATERIALS WITH POLYMER BINDERS

The article presents the results of laboratory studies on agglomeration of gas cleaning sludge mixed with rich dust from inertial collectors and dust after drying chrome ore. The technological process of pelletizing, which consists of: preparation of raw materials for pelletizing (crushing, classification, drying and mixing of components), pellet processing operations for the purpose of separating fines and strengthening. In this work, polymeric binders act as binders: cement, clay powder for chrome pellets, organic binder ligno and polymer binder, which is a polymer based on acrylic acid amide and an inorganic binder. Different types of binders, each of which has specific requirements. Several types of basic materials and binders, to determine the optimal recipe for pelletizing fine-grade ore raw materials, humidity and cold agglomeration modes.

Qualitative and quantitative indicators of the obtained agglomerated products are estimated. The optimal composition of the mixture for agglomeration has been formulated. The results of measuring the mechanical properties have been obtained, tables for drop, impact and abrasion are provided, as well as drawings of the results of pelletized materials. The factors influencing the quality of pellets have been determined.

Keywords: Pelletization, binder, wet dust, drying, pellets, sludge, granulator.

Introduction

At present, many metallurgical enterprises pay special attention to ecology. The main wastes are slag, dust and sludge. The resulting slag is used as crushed stone for road construction, and the dust captured by gas cleaning systems is partially returned to the technological chain [4].

Pelletization is a clean and essential method of producing materials for iron-making due to its low energy consumption and minimal pollutant emissions [1; 2; 3].

Up to 80 % of particles with less than 10 mm size are generated during mining and processing of chromite ores, about 30 % of ore is in powder and even dusty form [4].

The necessity of fines pelletization is obvious. Extensive research works on pelletization has been performed for Kazakhstan ores [5]. Pelletizing is actively practiced abroad, but information about these technologies is not distributed and is quite strictly protected. Dust pelletizing is quite widely developed in foreign countries.

The feeding of materials in a compact form into the metallurgical unit prevents their removal with the exhaust gases, and in the case of reduction smelting ensures the gas permeability of the column of charge materials. In addition, the pelletizing process reduces material losses during transportation [6]

Wet dust from gas treatment plant in the form of slime is used as feed material in this study. In most cases, metallurgical slime is finely dispersed concentrates with high moisture content (40–50 %) and requires pelletizing for ease of further use in metallurgical processes.

Studies to develop cold agglomeration technology for gas treatment plant slime (hereinafter referred to as material No.1) mixed with rich dust from inertia-type catchers (hereinafter referred to as material No.2) and dust after chromium ore drying (hereinafter referred to as material No.3) were implemented in the laboratory of ERG Research and Engineering Center. The following materials are used as binders: cement of M400/B22.5 grade, clay powder for chrome pellets (hereinafter referred to as bentonite), organic binder of calcium lignosulfonate and polymeric binder, which is acrylamide-based polymer (hereinafter referred to as PAA) and inorganic binder EB. There are specific requirements for binders [7; 8; 9; 10; 11; 12]:

– high surface activity and good wetting of the material surface;
– presence of plastic properties;
– resistance to precipitation, temperature;
– absence of substances that pollute the finished product;
– high curing rate;
– cheapness and availability;
– ease of use;
– stability during storage and transportation;

Materials and methods

The quality of the final pellets in ore pelletisation is assessed on the basis of various properties including wet or green strength, dry strength and drop number. The values obtainable at any particular plant tend to vary from one plant to another because of variations in the materials used (for instance the ore quality) and the processing conditions but, as a generality, it is desirable to try to maximise the dry strength while maintaining satisfactory results for the drop number and other properties.

The ratio of materials in the blend under laboratory conditions is as follows:

– Composition №1 (materials №1 – 48 %, № 2 – 8 %, № 3 – 44 %, bentonite)
– Composition № 2 (materials № 1 – 48 %, № 2 – 8 %, № 3 – 44 %, lignosulfonate)
– Composition № 3 (materials № 1 – 48 %, № 2 – 8 %, № 3 – 44 %, bentonite and lignosulfonate)
– Composition № 4 (materials № 1 – 48 %, № 2 – 8 %, № 3 – 44 %, PAA)

– Composition № 5 (materials № 1 – 48 %, № 2 – 8 %, № 3 – 44 %, PAA and bentonite)

– Composition № 6 (materials № 1 – 48 %, № 2 – 8 %, № 3 – 44 %, EB)

– Composition № 7 (materials № 1 – 48 %, № 2 – 8 %, № 3 – 44 %, EB and bentonite).

Given ratio of materials corresponds to their formation volumes. Before starting the works, material № 1 was dried to residual moisture content of 0.5 % with further grinding at rod mill to initial fraction.

The goal of the study is to define the best recipe for pelletizing of fine-size ore materials with the selection of binder material, moisture and cold agglomeration methods.

To begin with, the binder and pelletizing materials (materials #1, #2 and #3) were weighed separately. Chemical composition of the materials and pelletizing parameters are given in the table 1–2.

Table 1 – Chemical composition of the materials

Material	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO	C	S	P	Cr met.
Slime from Gas Treatment Plant	40,79	11,96	0,6	16,29	6,66	11,02	12,36	0,1	0,014	5,64
Dust from inertia-type catchers	28,78	18,65	1,05	34,6	4,21	9,04	3,37	0,45	0,013	1,38
Dust after ore drying	48,81	7,80	0,51	19,71	7,13	12,24	0,49	0,024	0,002	3,79

Table 2 – Agglomeration parameters

Composition №	Binder consumption, %	
1	1	2
2	3	4
3	3	1
4	1	2
5	1	2
6	1	2
7	1	2

The process of blend preparation consisted of two stages. At the first stage, the mix of dry feed materials with binder was stirred for 5 minutes. At the second stage, little water was added to the mix, the amount was selected separately for each type of binder, and then the moistened blend was screened through the sieve with 1×1 mm mesh size to break formed lumps and obtain a homogeneous consistency.

Pelletizing process was performed upon preparatory works completion. The angle of the pelletizer disc inclination in the working position was 45º, the rotation speed

was maintained at the level of 25-30 rpm. Prepared blend pelletizing was started after adjustment of the equipment-preset parameters. For this purpose, the ready moistened mix was charged into the pelletizer in batches. It was allowed to make additional moistening of the mix with the sprayer if it was required during the pelletizing process. The volume of additional moisture was taken into consideration upon the experiment completion.

Obtained pellets fractions were screened through sieves with mesh sizes of 12×12mm and 14×14mm. 12-14 mm pellets (Fig. 1) were unloaded and placed on metal pallets in one layer. Part of the finished pellets was dried in the drying furnace under 120°C temperature until complete moisture removal with subsequent determination of their breaking strength. The other half of the ready pellets was dried under natural conditions with measurement of breaking strength after the 1st and 3rd day. Automatic test press RB-1000 and IPG-1M were used to define the strength of pellets depending on pellets breaking strength.

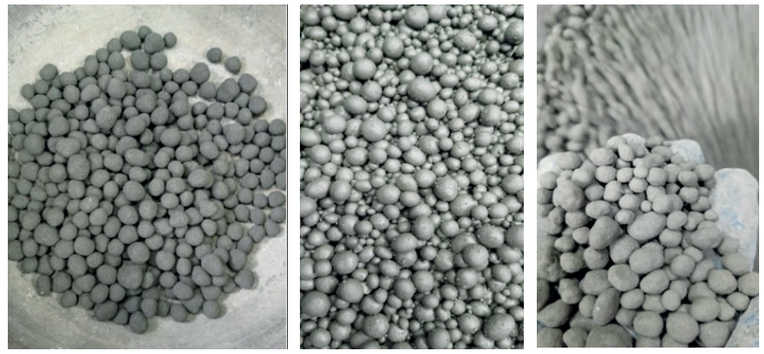


Figure 1 – Ready pellets of 12-14 mm fraction

Result and discussion

10 samples of 12–14 mm pellets were taken from each series of experiments to define pellets strength characteristics. The results of pellets strength characteristics are given in Table 3 and Figure 2.

Table 3 – Breaking Strength Tests Results

Composition №	Binder consumption, %		Strength, kg/pellet		
			1 day	3 days	120°C 3hours
1	1	2	3.00/4.24	6.89/7.60	7.03/7.86
2	3	4	9.40/11.38	41.80/44,89	49.00/49.30
3	3	1	9.24	9.38.	9.86
4	1	2	-	-	-
5	1	2	8.62	9.74	11.54
6	1	2	-	-	-
7	1	2	-	4.21	4.63

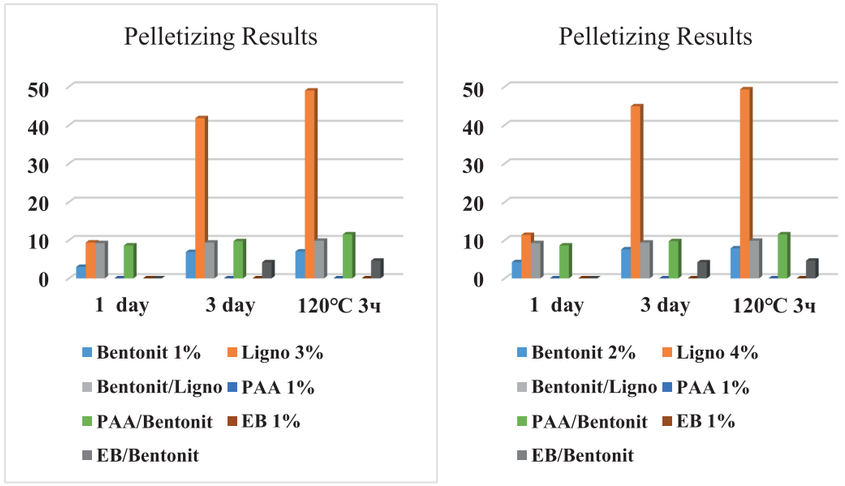


Figure 2 – Pelletizing Results for Materials № 1, № 2 and № 3

Based on the test results, we can make the conclusion that the highest breaking strength values can be achieved with the use of 3–4 % lignosulfonate binder. The strength of pellets dried under natural conditions for 3 days and dried forcedly in the drying furnace reaches 45–50 kgf/pellet. Pellets containing all other types of binders were less strong, and broke down under force that did not reach ~10 kgf/pellet on average. Except for high strength of pellets produced with lignosulfonate, the use of this type of binder differs from other types of binders by its high degree of pelletizing ability, which is one of the main indicators characterizing the pelletizing process. Thus, when using this type of binder, the weight of produced pellets of 12–14 mm commercial fraction was 1300 g and 1750 g with binder addition of 2 and 3%, respectively (Table 4).

Table 4 – Weight of produced 12-14 mm commercial fraction pellets

Composition №	Consumption, %		Weight, g	
1	1	2	850	820
2	3	4	1300	1750
3	3	1	650	
4	1	2	-	
5	1	2	578	
6	1	2	-	
7	1	2	780	

It should be noted that despite the same conditions for all types of binders, the pelletizing process was not always successful. When PAA and EB binders were used,

there was no pelletization of the blend at all (Fig. 3). These types of binding materials were characterized by adhesion of the charge to the surface of the pelletizer and thereby created an obstacle for adhesion of added charge to forming pellet nucleus. It was required to clean discs from sticking material regularly, thus pellets of the required fraction could not be obtained despite pelletizing parameters changes. A series of experiments using such binders as Bentonite, EB, and combination of Bentonite/ Lignosulfonate, PAA/Bentonite and EB/Bentonite binders despite stable pelletizing conditions result in pellet strength much lower than that of pellets with lignosulfonate.

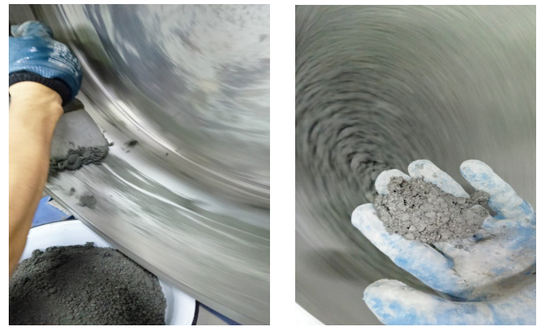


Figure 3: Pelletizing process with PAA and EB binders in the quantity of 1–2 %

Based on the results of test series, lignosulfonate binder was selected as the main binder with an addition of 3% of the dry charge weight. According to the program of laboratory tests, it was required to make a batch of pellets in the amount of 20 kg with further forced and natural drying. Pellets were tested for strength after producing a batch of pellets using lignosulfonate. The procedure of pellet batch production was the same as for identification of the best binder type. 20 kg batch production is required by GOST standards to test for drop, impact and abrasion resistance. Except for the listed strength parameters, we also defined the breaking strength of raw pellets, and after their drying in natural conditions for 1 and 3 days, as well as after complete removal of moisture in the drying oven. Residual moisture of pellets after drying in the furnace under 120˚C was 8.05% at initial moisture of 9%. Parameters and results of testing strength characteristics of the pilot batch with 3% lignosulfonate binder are given in Tables 5 and 6.

Table 5 – Breaking strength of raw and dried pellets

Composition	Consumption, %		Strength, kg/pellet			
	Binder	W, %	Raw	1 day	3 days	120°C
№2	3	6+3	6.51	18.49	53.00	66.20

Table 6 – Breaking strength of raw and dried pellets

Composition	Consumption, %	W, %	Impact and abrasion strength of dried pellets under 120°C, %		Drop strength of dried pellets under 120°C, %	
			+5 mm	-0.5 mm	+ 5 mm	- 5 mm
№2	3	6+3	96,95	1,89	100	-

Based on the results of Tables 5 and 6, raw pellets have 6.51 kg/pellet strength, and dried pellets have 66.20 kg/pellet strength. Drop strength test according to GOST 25471-82 was 100%, impact strength according to GOST 15137-77 was 96.95% and abrasion strength (GOST 15137-77) was 1.89%.

Conclusions

A series of pelletizing method tests were performed to select the best type of binder using 5 types of binders in different ratios and combinations. Strength characteristics of raw and dried pellets with addition of lignosulfonate in the quantity of 3% of dry blend weight were much higher than for all other types of binders. Upon completion of the best binder type selection, a batch of pellets was produced with further measurement of strength characteristics on drop, impact and crushing with this type of binder. The obtained mechanical strength results fully comply with the results of the first stage tests and meet GOST 15137-77 requirements.

REFERENCES

1 Wong, G., Fan, X., Gan, M., Ji, Z., Chen, X., Tian, Z. et al. Improvement on the thermal cracking performance of pellets prepared from ultrafine iron ore // Powder Technol. – 2019, – P. 873–879.

2 Lv, W., Sun, Z., Su, Z. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of iron pelletizing process in China, a case study // J Clean Prod. – 2019, – P. 1314–1321

3 **Zhang, Y., Zhou, Y., Liu, B., Li, G., Jiang, T.** Roasting characteristics of specularite pellets with modified humic acid based (MHA) binder under different oxygen atmospheres // Powder Technol. – 2014, –P. 279–287

4 **Koloyartsev, V. L., Pupyshev, N. V., Belogurov, V. Ya. et al.** Use of fine chrome ores in the production of carbon and conversion ferrochrome [Ispol'zovaniye melkikh khromovykh rud v proizvodstve uglerodistogo i peredel'nogo ferrokhroma] // Review information. Institute of Chermetinformation. Series: Ferroalloy production. – 1979. – № 1. – P. 1–2.

6 **Prikhodko, T. I., Tsalapova, N.M., Pupyshev, N. V.** Agglomeration of chromite raw materials of Kazakhstan for ferroalloy production [Okuskovaniye khromitovogo syr'ya Kazakhstana dlya ferrosplavnogo proizvodstva] // Complex use of mineral raw materials. – 1991. – № 2. – P. 58–63.

7 **Aksenova, V. V., Alimbaev, S. A., Pavlov, A. V., Mustafin, R. M.** Briquetting of porous alumina-containing materials on organic binders // Metallurgical technologies / Metallurgical technologies, Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2021. – № 64. – № 5. – P. 323–329.

8 **Danilova, Yu. S., Peristy, M. M.** The production of iron ore briquettes is a promising method for the preparation of metallurgical waste // Donetsk: DonNTU, DonNU. – 2011. – № 1. – P. 67–68.

9 **Ravich, B. M.** Briquetting in non-ferrous and ferrous metallurgy // Moscow: Metallurgy. – 1975. – P. 232.

10 **Ravich, B. M.** Briquetting of ores // M. : Nedra. – 1982. – P. 183.

11 **Ushakov, K. I., Felman, R. I., Sadykov, V. I.** Briquetting in color metallurgy // Overview information of the Institute of Central Scientific Research Institute of Economics and information. – 1979. – № 11. – P. 83.

12 **Ryvkin, I. Yu., Eremin, A. Ya., Litvin, E. M., Babanin, V. I.** Briquetting fine-grained and finely dispersed materials with a binder // Coke and Chemistry. – 2000. – № 10. – P. 36–43.

13 **Noskov, V. A., Maimur, B. N., Petrenko, V. I., Vashchenko, S. V., Kryukov, V. V., Lebed, A. T.** Development and research of binding additives for briquetting screenings of silicomanganese // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Sat. scientific tr. – Dnepropetrovsk: HMI NAS of Ukraine. – 2005. – № 10. – P. 321–327.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Wong, G., Fan, X., Gan, M., Ji, Z., Chen, X., Tian, Z. et al. Improvement on the thermal cracking performance of pellets prepared from ultrafine iron ore // Powder Technol. – 2019, – P. 873–879.

2 Lv, W., Sun, Z., Su, Z. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of iron pelletizing process in China, a case study // J Clean Prod. – 2019. – P. 1314–1321.

3 **Zhang, Y., Zhou, Y., Liu, B., Li, G., Jiang, T.** Roasting characteristics of specularite pellets with modified humic acid based (MHA) binder under different oxygen atmospheres // Powder Technol. – 2014. –P. 279–287.

4 **Колоярцев, В. Л., Пупышев, Н. В., Белогуров, В. Я. и др.** Использование мелких хромовых руд в производстве углеродистого и передельного феррохрома // Обзорная информация. Ин-т «Черметинформация». Сер. Ферросплавное производство. – 1979. – № 1. – С. 1–2.

5 **Приходько, Т. И., Цалапова, Н. М., Пупыщев, Н. В.** Окускование хромитового сырья Казахстана для ферросплавного производства // Комплексное использование минерального сырья. – 1991. – № 2. – С. 58–63.

6 **Aksenova, V. V., Alimbaev, S. A., Pavlov, A. V., Mustafin, R. M.** Briquetting of porous alumina-containing materials on organic binders // Metallurgical technologies / Metallurgical technologies, Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2021. – № 64, № 5. – P. 323–329.

7 **Danilova, Yu. S., Peristy, M. M.** The production of iron ore briquettes is a promising method for the preparation of metallurgical waste // Donetsk: DonNTU, DonNU. – 2011. – № 1. – P. 67–68.

8 **Ravich, B. M.** Briquetting in non-ferrous and ferrous metallurgy // - Moscow : Metallurgy. – 1975. – P. 232.

9 **Ravich, B. M.** Briquetting of ores. – Moscow : Nedra - 1982. – P. 183.

10 **Ushakov, K. I., Felman, R. I., Sadykov, V. I.** Briquetting in color metallurgy // Overview information of the Institute of Central Scientific Research Institute of Economics and information. – 1979. – № 11. – P. 83.

11 **Ryvkin, I. Yu., Eremin, A. Ya., Litvin, E. M., Babanin, V. I.** Briquetting fine-grained and finely dispersed materials with a binder // Coke and Chemistry. – 2000. – № 10. – P. 36–43.

12 **Noskov V. A., Maimur B. N., Petrenko V. I., Vashchenko S. V., Kryukov V. V., Lebed A. T.** Development and research of binding additives for briquetting screenings of silicomanganese // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Sat. scientific tr. – Dnepropetrovsk: HMI NAS of Ukraine. – 2005. – № 10. – P. 321–327.

С. А. Лайхан[1], Б. Ж. Салқынбаев[2], Н. А. Ұлмағанбетов[3], М. Джундібаев[4], Р. М. Жданов[5]

[1,2,3,4,5]ERG ғылыми-зерттеу инжинирингтік орталығы ЖШС,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ.

ПОЛИМЕРЛІ БАЙЛАНЫСТЫРҒЫШТАРДЫ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ҰСАҚ ДИСПЕРСТІ ХРОМ ШИКІЗАТЫН БІРІКТІРУ

Бұл мақалада окомкование әдістері сипатталған. Олардың негізгі әдістері мен механизмдері қарастырылады. Түйіршіктерді қалыптастыру технологиялары егжей-тегжейлі сипатталған. Жұмыста зерттелетін материалдар ретінде инерциялық ұстағыштардың бай шаңымен және хром кенін кептіргеннен кейін шаңмен араласқан газ тазарту шламын суық батыру технологиясын өңдеу бойынша материалдар пайдаланылды. Материал – хром кенін кептіргеннен кейін алынған сусымалы құрғақ зат. Ұсақ шикізаттың химиялық құрамы келтірілген. Байланыстырушы материал - органикалық заттар, қатты және аморфты материал полиакриламид бұл акрил қышқылы амидіне негізделген полимер, иіссіз, ұнтағы 1 мм-ден аз, М400/В22. 5 маркалы цемент, хром түйіршіктеріне арналған Саз ұнтағы және бейорганикалық байланыстырушы ЕВ. Салыстырмалы талдау және байланыстырушы материалдар арасындағы айырмашылықтар жасалды. сондай-ақ, шағу бойынша зертханалық зерттеулердің нәтижелері алынды. Түйіршіктер төгуге, төгу беріктігін анықтау қондырғысында, соққыға және тозуға сыналды. Графикте келтірілген беріктікке арналған түйіршіктерді сынау нәтижелері келтірілген. Алынған өнімдердің сапалық көрсеткіштері және тасымалдауға және көптеген қайта толтыруға төзімділік бағаланды. Шұңқырға арналған қоспаның оңтайлы құрамының рецепті таңдалды.

Кілтті сөздер: түйіршіктеу, түйіршіктеу процесі, түйіршіктеу құрылғы, кептіру, шаң.

С. А. Лайхан[1], Б. Ж. Салқынбаев[2], Н. А. Ұлмағанбетов[3], М. Джундібаев[4], Р. М. Жданов[5]

[1,2,3,4,5]ТОО Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG,
Республика Казахстан, г. Актобе

ОКОМКОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ХРОМОВОГО СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

В статье представлены результаты лабораторных исследований по окомковании шлама газоочистки в смеси с пылью инерционных и после сушки хромовой руды. Технологический процесс окомкования, который состоит из: подготовки сырья к окомкованию (дробление, классификация, сушка и смешивание компонентов), процессы по обработке окатышей с целью отделения мелочи и укрепления. В данной работе в качестве связующих выступают полимерные связующие: цемент, глинопорошок для хромовых окатышей, органическое связующее лигно и полимерное связующее, представляющее собой полимер на основе амида акриловой кислоты и неорганическое связующее. Различные виды связующих, к каждому из которых предъявляются определенные требования. Несколько видов базовых материалов и связующих, для определения оптимальной рецептуры окомкования тонкосортного рудного сырья, влажности и режимов холодной агломерации.

Оценены качественные и количественные показатели получаемых окомкованных материалов. Сформулирован оптимальный состав смеси для окускования. Получены результаты измерения механических свойств, приведены таблицы на сброс, на удар и истирания, а также рисунки результатов гранулированных материалов. Определены факторы, влияющие на качество гранул.

Ключевые слова: окатывание, связующее, пыль, сушка, шлам, гранулятор, окатыш.

МРНТИ 53.03.01
DOI

А. М. Макашева[1], В. П. Малышев[2], Л. А. Бекбаева[3]
[1,3]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда
[2]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2249-3435
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3996-1533
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2543-6380
*e-mail: astra-makasheva@mail.ru

МОДИФИКАЦИЯ АКТИВАЦИОННОГО ФАКТОРА В ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОМОРФИЗМА

Измельчение материалов является самым затратным переделом металлургического комплекса, и создание математического аппарата, позволяющего осуществлять рациональную реализацию технологии измельчения различных материалов при снижении себестоимости процесса является актуальной задачей. Цель данной работы заключается в модификации вероятностной модели измельчения рудных материалов по активационному фактору.

Методология проведения работы состоит в использовании нового направления в математике – изоморфизма, на основе которого при разработке активационного фактора измельчения впервые найдена величина статистической суммы в дискретном ее выражении с любой заданной ее точностью по шагу варьирования энергии Δε через сходящийся несобственный интеграл и установленный инвариант.

В результате работы был установлен изоморфизм активационного фактора измельчения по вероятности разрушения зерен руды мелющими шарами через прямую связь с энергией активации и вследствие изоморфизма различных видов энергии – тепловой и механической, кинетической и потенциальной – в противодействии с энергией активации.

Было выявлено подчинение закономерностям неравновесной термодинамики изменение энтропии смешения фракций в сторону ее снижения по мере протекания процесса, то есть в проявлении самоорганизации и устойчивости соответствующей структуры.

Ключевые слова: измельчение, изоморфизм, концентрационный, стерический, активационный, частотный факторы.

Введение

Известно, что измельчение материалов является самым затратным переделом металлургического комплекса [1, с. 127; 2; 3], и создание математического аппарата, позволяющего осуществлять рациональную реализацию технологии

измельчения различных материалов [4; 5; 6] при снижении себестоимости процесса является актуальной задачей [7; 8; 9].

Металлургические переделы измельчаемой руды по показателям содержания и извлечения целевого металла однозначно определяются избыточностью шламистой фракции (при переизмельчении и снижении селективности) и крупной фракции (при недостаточном ее измельчении и сохранении в исходном состоянии) с ухудшением показателей в обоих случаях. Это вскрывается при постоянном сопоставлении результатов извлечения вероятностной модели, самой близкой к природе этого процесса.

Цель данной работы заключается в модификации вероятностной модели измельчения рудных материалов по активационному фактору для последующей адаптации ее в реальных условиях работы мельниц.

Вероятностная модель измельчения рудных материалов, разработанная применительно к работе барабанных мельниц, была создана более тридцати лет назад [10] по образу и подобию с молекулярной теорией соударений на основе воздействия концентрационного ($P_{конц}$), стерического ($P_{ст}$), активационного (P_a) и частотного (Z) факторов на скорость измельчения фракций рудных зерен со средним диаметром d_j. Общая форма этой модели осталась без изменений: получена и подчинена выражению последовательных случайных событий через произведение вероятностей элементарных событий

$$P = -\frac{\partial P_j}{\partial \tau} = ZP_aP_{\text{ст}}P_{\text{конц}}P_j = k_jP_j. \quad (1)$$

Выражение элементарных вероятностей через параметры работы мельницы вскрыло довольно сложную константу скорости k_j разрушения зерен, которая была несколько преобразована [11]

$$k_j = \frac{8bj^{\chi}\left[(d_j/d_{\text{ш}})-(d_j/d_{\text{ш}})^2\right]\omega G_{\text{ш}}G_{\text{з}}}{(1+2\omega\sqrt{2D/g})(G_{\text{ш}}/\gamma_{\text{ш}}+G_{\text{з}}/\gamma_{\text{з}}+G_{\text{в}}/\gamma_{\text{в}})^2\gamma_{\text{ш}}\gamma_{\text{з}}}\,exp\left(-\frac{E_a}{RT+MgD(\gamma_{\text{ш}}/\gamma_{\text{з}})(d_{\text{ш}}/d_j)^3}\right) \quad (2)$$

и затем путем решения системы линейных дифференциальных уравнений n-го порядка позволила получить еще более сложную, но также прямую зависимость содержания (выхода) любой фракции P_n в любой момент времени от начала процесса τ не только разрушения, но и накопления каждой фракции за счет частичного измельчения предыдущей более крупной фракции

$$P_n = P_{0n}e^{-k_n\tau} + \sum_{j=1}^{n-1}P_{0j}\left(\prod_{i=j}^{n-1}k_i\right)\sum_{m=j}^{n}\frac{e^{-k_m\tau}}{\prod_{\substack{i=1\\i\neq m}}^{n}(k_i-k_m)}, \quad (3)$$

где P_n – выход рассчитываемой n-й фракции, доли ед. (номер стадии разрушения); j − номер предыдущих (более крупных) фракций; P_{0j} − исходное содержание фракции, доли ед.; d_j − средний размер зерен j-й фракции, м; $d_{\text{ш}}$ – диаметр мелющего шара, м; $\gamma_{\text{ш}}$ – плотность шара, кг/м^3; $G_{\text{в}}$ – масса воды в

мельнице, кг; $\gamma_в$ – плотность воды, кг/м^3; $G_ш$ – масса шаровой нагрузки мельницы, кг; $\gamma_з$ – плотность рудных зерен, кг/м^3; $G_з$ – масса руды в мельнице, кг; ω – угловая скорость вращения мельницы, с$^{-1}$; D – внутренний диаметр мельницы, м; g – ускорение силы тяжести, м/с^2; $E_б$ – энергетический барьер разрушения зерна, Дж/моль; M – молекулярная масса измельчаемого материала, кг/моль; R – газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К; b и χ – постоянные, учитывающие агломерацию мелочи в зажатом их слое перед ударом и крепость руды, безразмерные.

Анализ внутренней структуры и применение такой модели к работе лабораторных, укрупненных и промышленных мельниц позволил разрешить практически все парадоксы измельчения, не имевшие ранее единого теоретического объяснения, а именно: стремление к логарифмические нормальному распределению фракций из любого исходного их соотношения ввиду взаимного противодействующего влияния стерического фактора, определяющего вероятность попадания шара в зерно, и активационного фактора, учитывающего вероятность разрушения зерна при попадании в него шара; практическая «неизмельчаемость» тонких фракций вследствие преобладания стерического фактора над активационным из-за ничтожной зоны зажатия шаром зерен такой фракции несмотря на полную их разрушаемость в этой зоне; «крутой спад» в сторону тонких фракций, деформирующий нормальное распределение их по размеру и ведущий к предыдущим парадоксам; непреодолимо низкой энергетический КПД процесса измельчения, не более 5-10 %, соответствующий слабо выраженному максимуму произведения $P_{ст}P_а$; появление двойных максимумов во фракционном составе измельчаемого материала вызывается уменьшением содержания крупных шаров, ввиду недостаточной энергии удара мелких шаров в крупные зерна, что ведет к формированию дополнительного накопительного максимума крупных фракций и может послужить сигналом к добавлению к истертым шарам более крупной замены и т.д.

Перечень разрешенных проблем измельчения материалов не исчерпывает возможностей их более полного понимания, устранения недостатков и использования достоинств. Более того, интегральная вероятностная модель этого широко распространенного процесса порождает новые проблемы адекватного отображения как константы скорости разрушения зерен в составе фракций, так и каждого вероятностного фактора в отдельности, а также другие вопросы, открытые для развития предпринятого подхода, который авторами сознается в качестве нулевого приближения к общей теории измельчения [1]. Первое обобщение накопившихся результатов разработки приведено в монографии [11].

С этой точки зрения необходимо убедиться в доказательности используемых аргументов при решении многих вопросов нулевого приближении по подобию, аналогии, сходству и т.п., которые современная математика решает с использованием такого метода как изоморфизм [12].

Материалы и методы

Покажем применение математических объектов изоморфизма в вероятностной теории измельчения. Согласно исторически новому направлению математики, возникшему в середине 19-го века и получившему определенность, признание и широкое применение в начале 20-го века благодаря теоремам Эмили Нётер [13]: два объекта X/ и X// считаются изоморфными, если два произвольно выбранных элемента этих объектов, x/ и x//, связаны взаимно полностью и однозначно обратимыми функциями $x/ = \phi(x//)$ и $x// = \Psi(x/)$, обеспечивающими их задаваемое отношение эквивалентности A, которое может быть распространено на другие элементы и на математические объекты X/ и X// в целом. При этом невыполнимость хотя бы одного из названных условий доказывает неизоморфизм сравниваемых объектов, а выполнение – доказательную связь и взаимную переносимость изменения в одном объекте на другой.

Покажем применение изоморфизма для доказательного обоснования математической формы вероятности разрушения зерен при ударе, то есть активационного фактора $P_а$. В основу его положено подобие распределению Больцмана по тепловой энергии для идеального одноатомного газа [14], но с возможностью распространения этого распределения на конденсированное состояние вещества как сохраняющего тепловое хаотизирующее воздействие в той же зависимости от температуры [15]:

$$P_i = N_i/N = \exp(-\varepsilon_i/kT)/\sum_{i=1}^{m}\exp(-\varepsilon_i/kT), \quad (4)$$

где P_i и N_i – соответственно доля и число частиц с энергией εi; N – общее число частиц; k – константа Больцмана; m – число учитываемых энергетических уровней. Величину Pi можно трактовать как вероятность обнаружения или присутствия частиц с энергией εi во множестве, отображаемом статистической суммой $\sum_{i=1}^{m}\exp(-\varepsilon_i/kT)$.

Индексом i подчеркивается принадлежность этого множества к дискретному распределению. Более того, непрерывное распределение вообще не имеет смысла в данном случае, поскольку теряются границы между уровнями, а значит, исчезают и сами уровни. Чтобы выразить это в явном виде, необходимо ввести в распределение Δε – шаг варьирования энергии, своеобразный энергетический «квант», имеющий фундаментальное значение в физике, а в математике это учитывается следующим образом:

$$P_i = N_i/N = exp[-(i-1)\Delta\varepsilon/kT]/\sum_{i=1}^{m} exp[-(i-1)\Delta\varepsilon/kT]. \quad (5)$$

Однако в дискретном выражении сумма ряда не известна, и тогда ряд преобразуется в непрерывную интегральную форму путем эволюции $\Delta\varepsilon \to d\varepsilon$, $m \to \infty$, $i = 1 \to 0$:

$$\sum_{i=1}^{\infty} exp[-(i-1)\Delta\varepsilon/kT] = \int_0^{\infty} exp(-\Delta\varepsilon/kT) = kT? \quad (6)$$

Этим приближением пользуются до сих пор, не обращая внимания на явную некорректность отождествления дискретного и непрерывного множеств, а также на энергетическую размерность интеграла и безразмерность суммы. Между тем есть возможность определить изоморфизм дискретной статистической суммы и несобственного интеграла (6), строго придерживаясь принятой математической процедуры.

В данном случае, поскольку речь идет о совместимости ряда и несобственного интеграла, следует воспользоваться интегральным признаком Коши, Маклорена сходимости ряда. Согласно этому признаку, если есть функция $f(x)$, которая принимает в точках x = n значения членов ряда, $f_n(n) = a_n^{/}$ (a_n-образная функция), и несобственный интеграл этой функции сходится, то сходится и соответствующий этой сумме ряд.

a_n-образная функция повторяет все детали выражения общего члена ряда, то есть в нем заменяются все n на x:

$$a_n = exp[-(n-1)\Delta\varepsilon/kT] \Rightarrow a_n^{/} = f_n(n) = exp[-(x-1)\Delta\varepsilon/kT]. \quad (7)$$

Несобственный интеграл этой функции равен

$$\int_0^{\infty} f_n(x)dx = \int_0^{\infty} exp[-(x-1)\Delta\varepsilon/kT]\,dx = -\frac{kT}{\Delta\varepsilon}\left|e^{-\frac{(x-1)\Delta\varepsilon}{kT}}\right|_0^{\infty} = \frac{kT}{\Delta\varepsilon}e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}. \quad (8)$$

Интеграл сходится, значит, сходится и ряд

$$\sum_{i=1}^{\infty} a_n = \sum_{i=1}^{\infty} exp[-(i-1)\Delta\varepsilon/kT].$$

Но сумма его остается не известной. Далее начинаются процедуры установления изоморфизма, а именно, выделение произвольных элементов ряда и несобственного интеграла. Таковыми являются для любого единичного интервала, (n – 1)÷n, общий член ряда a_n и среднее значение несобственного интеграла в этом интервале $\int_{n-1}^{n} f_n(x)dx = \int_{n-1}^{n} exp[-(x-1)\Delta\varepsilon/kT]\,dx$. Их задаваемое отношение эквивалентности A должно выражаться условием: если это отношение не будет зависеть от n, A ≠ f(n), то оно будет соблюдаться и во всех других единичных интервалах, а значит для отношения несобственного интеграла к сумме ряда в целом:

$$A = \frac{\int_{x=n-1}^{x=n} f_n(x)dx}{a_n} = \frac{\int_{x=n-1}^{x=n} exp[-(x-1)\Delta\varepsilon/kT]}{a_n} = \frac{kT}{\Delta\varepsilon}\left(e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}} - 1\right). \quad (9)$$

A не зависит от n, и статистическая сумма может быть определена через (8) и (9):

$$\sum_{i=1}^{\infty} a_n = \frac{1}{A}\int_0^{\infty} f_n(x)dx = \frac{\frac{kT}{\Delta\varepsilon}e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}}{\frac{kT}{\Delta\varepsilon}\left(e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}-1\right)} = \frac{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}}{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}-1}. \quad (10)$$

Вместе с этим определенным результатом получается соответствующее лаконичное распределение Больцмана

$$P_i = N_i/N = exp[-(i-1)\Delta\varepsilon/kT]/\frac{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}}{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}-1} = e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}\left(e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}} - 1\right). \quad (11)$$

Нет необходимости рассчитывать сотни и тысячи значений a_n, прежде чем набирающаяся сумма ряда не достигнет необходимой для исследователя точности с ограничением по заданной значащейся цифре в младшем разряде суммы. Гораздо важнее то, что установленный изоморфизм статистической суммы и несобственного интеграла по полной и однозначной взаимной обратимости элементов ряда и несобственного интеграла

$$\int_{x=n-1}^{x=n} a_n^{/}dx = Aa_n,\ a_n = \frac{1}{A}\int_{n-1}^{n} a^{/}dx \quad (12)$$

относится к любым фрагментам ряда и соответствующего интеграла, то есть к полной сумме s (10), конечной

$$s_n = \frac{1}{A}\int_0^{x=n} a_n^{/}dx = \left(e^{-\frac{n\Delta\varepsilon}{kT}} - 1\right)/\left(e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}} - 1\right) \quad (13)$$

и остаточной

$$R_n = \frac{1}{A}\int_{x=n}^{\infty} a_n^{/}dx = s - s_n = e^{\frac{(1-n)\Delta\varepsilon}{kT}}/\left(e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}} - 1\right). \quad (14)$$

Отношение остаточной суммы к полной имеет смысл доли частиц, имеющих энергию выше некоторого барьера, например, теплового барьера активации

$$\frac{R_n}{S} = \frac{e^{\frac{(1-n)\Delta\varepsilon}{kT}}}{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}-1} \cdot \frac{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}-1}{e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}} = e^{-\frac{n\Delta\varepsilon}{kT}} \Rightarrow e^{-\frac{\varepsilon_a}{kT}} = e^{-\frac{E_a}{kT}} = P_a. \quad (15)$$

Таков математически строгий вывод фактора активации, что отличает его от произвольного установления равенства (6), в котором статистическая сумма закреплена в виде kT. На самом деле в нем скрыто присутствует значение Δε = 1 Дж·частица$^{-1}$ (8), что сохраняет безразмерность суммы, но не ее величину, поскольку из строгого выражения отношения эквивалентности A (9) следует, что при Δε = 1 Дж·частица$^{-1}$ и T → ∞ возможно приближение $e^x - 1 \approx x$ и тогда

$$\lim_{T\to\infty} A = \lim_{T\to\infty} \frac{kT}{\Delta\varepsilon}\left(e^{\frac{\Delta\varepsilon}{kT}} - 1\right) = \frac{kT}{\Delta\varepsilon}\cdot\frac{\Delta\varepsilon}{kT} = 1. \quad (16)$$

Это означает, что $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \int_0^{\infty} a_n^{/}\, dx$, хотя в общем случае A ≠ 1 и $\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sim \int_0^{\infty} a_n^{/}\, dx$ (≈ и ~ – знаки изоморфизма [13]).

Подобная строгость нулевого приближения позволяет в данном случае использовать установленный изоморфизм статистической суммы и несобственного интеграла, а вместе с этим и распределения Больцмана для расширенного модифицированного варианта вероятности разрушения зерен при ударе (14) за счет выражения разрушающей энергии в виде суммы теплового и механического воздействия, вместо первоначального стандартного

$$P_a = exp\left(-\frac{H_m}{RT+E_{mec}}\right), \quad (17)$$

модифицированного уравнения

$$P_a = exp\left(-\frac{R(T_m-T)}{RT+E_{mec}}\right), \quad (18)$$

которое приобрело в дальнейшем более общий смысл в единой вероятностной форме определения энергии активации в химических, физических (вязкость) и механических процессах [16].

Результаты и обсуждение

При комнатной температуре (T = 298 K) и Δε = kT отношения эквивалентности A (9) составит завышение непрерывной (интегральной) суммы против дискретной в 1,718 раза, а при T = 1 K и Δε = 10kT – в 2203 раза, устремляясь к бесконечности при T → 0 и вступая в противоречие с третьим началом термодинамики.

В таблице 1 представлены результаты расчета статистической суммы s (10) и отношения эквивалентности A (9) при различных температурах, а также при физически наименьшем значении Δε = k·1K= = k = $1{,}381\cdot10^{-23}$ Дж·частица-1 и при произвольном шаге Δε = $7{,}560\cdot10^{-22}$ Дж·частица$^{-1}$.

Таблица 1 – Зависимость статистической суммы s (10) и отношения эквивалентности A (9) от температуры

T, K	при Δε = $1{,}381\cdot10^{-23}$ Дж·частица$^{-1}$		при Δε = $7{,}560\cdot10^{-22}$ Дж·частица$^{-1}$	
	s	*A*	*s*	*A*
0	1	∞	1	∞
1	1,582	1,718	1	$1{,}100\cdot10^{22}$
10	10,51	1,052	1,004	43,42
50	50,50	1,010	1,503	1,807
100	100,5	1,005	2,372	1,331
200	200,5	1,002	4,175	1,150
300	300,5	1,002	5,994	1,097
400	400,5	1,000	7,817	1,072
500	500,5	1,000	9,641	1,057
1000	1000	1,000	18,768	1,028
10^4	10^4	1,000	183,13	1,003
10^5	10^5	1,000	1827,8	1,000
10^6	10^6	1,000	$1852\cdot10^4$	1,000

Из данных таблицы следует, что с точностью до 5 % и лучше, начиная с 10 K статистической сумма сопоставима по отношению эквивалентности с соответствующей интегральной величиной. При более широком интервале варьирования Δε подобная сопоставимость сдвигается в область более высоких температур и замена дискретной суммы на интеграл, а тем более их отождествление рискованно и недопустимо. Вследствие ограничения дискретной суммы фундаментальной величиной Δε = k·1 Дж·частица$^{-1}$ и соответственно на мольную величину kNA = R, Дж·К-1·моль$^{-1}$, и с умножением на 1 К следует ориентироваться на такое же ограничение шага варьирования, при котором для комнатной температуры (300 К) точность расчета с использованием интегрального значения суммы RT составит порядка 0,2 % (см. табл.), что вполне приемлемо для отображения процесса измельчения в теории и практике.

На рисунке 1 приведено сравнение двух моделей, исходной P_a (17) и модифицированной P_a (18) в зависимости от размера измельчаемых зерен применительно к промышленным условиям для $d_ш$ = 0,06 м и D = 3 м.

Оказалось возможным модифицировать не только знаменатель, но и числитель экспоненты, определяя значение E_a не по подобию с отдаленными от измельчения энергетическими характеристиками вещества – теплотой плавления, полиморфных превращений, а непосредственно по результатам измельчения самой крупной (первой) фракции, фактически по уравнению аррениусовского типа, но со строгим соблюдением экспоненциального выражения энергии активации как вероятности преодоления соответствующих энергетических барьеров. Для этого потребовалось

провести тождественное преобразование уравнения Френкеля-Андраде для вязкости на уравнение текучести и определять не энергию активации вязкости, а текучести [16]. Там же обоснована независимая характеристика измельчаемости – период полуизмельчения в тождественно равной форме уравнения для периода полураспада ядер атомов, которое может быть дополнительным параметром к величине энергии активации.

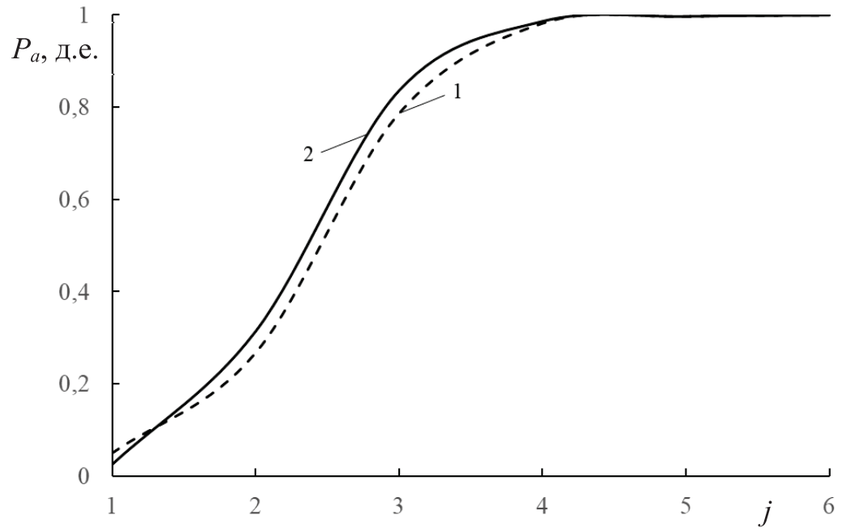


Рисунок 1 – Зависимость вероятности разрушения зерен от их размера по исходной P_a (17) – 1 и модифицированной P_a (18) – 2 моделям

Высокий коэффициент корреляции R = 0,996, t_R = 520 >> 2 модифицированной модели свидетельствует о возможности использования температуры плавления материала.

Следует иметь в виду, что понятие изоморфизма в математике зарождалось тогда, когда уже был сформулирован первый закон термодинамики, утверждающий эквивалентность различных форм движения материи (энергии). Во всяком случае, и в термодинамике, и в математике процедуры отождествления подобных объектов малоотличимы.

Несколько особняком стоит задача контроля процесса измельчения по энтропии смешения долевого распределения фракцией, хотя и оно восходит к распределению Больцмана, но гораздо ближе к его же математической энтропии, выраженной как

$$H = -\sum_1^N P_i \, lnP_i, \qquad (18)$$

в качестве безразмерного прототипа всех размерных форм энтропии – физической, информационной, Шеннона-Хартли, комбинаторной и др.

Различия исчезают, если привести «элемент» множества $P_i lnP_i$ к виду $P_i ln\frac{1}{P_i}$,, в котором это множество представляет собой средневзвешенное по Pi ключевое значение $ln(1/P_i)$, имеющее смысл степени различимости элементов [10] и одновременно отношения их эквивалентности при умножении на размерный эквивалент. Бриллюэн первым установил эквивалент информационной и физической энтропии в виде $kln2$ Дж/бит, тем самым подчинив его изоморфизму физической и информационной энтропии [17].

Вычисление математической энтропии смешения фракций, образующихся во времени согласно интегральной модели (3) для изменения монофракции кварцевого песка может послужить достаточно наглядной иллюстрацией [18] возникновения порядка из хаоса в духе идей о возникновении диссипативных структур по законам неравновесной термодинамики И. Пригожина [19] (рис. 2 и 3).

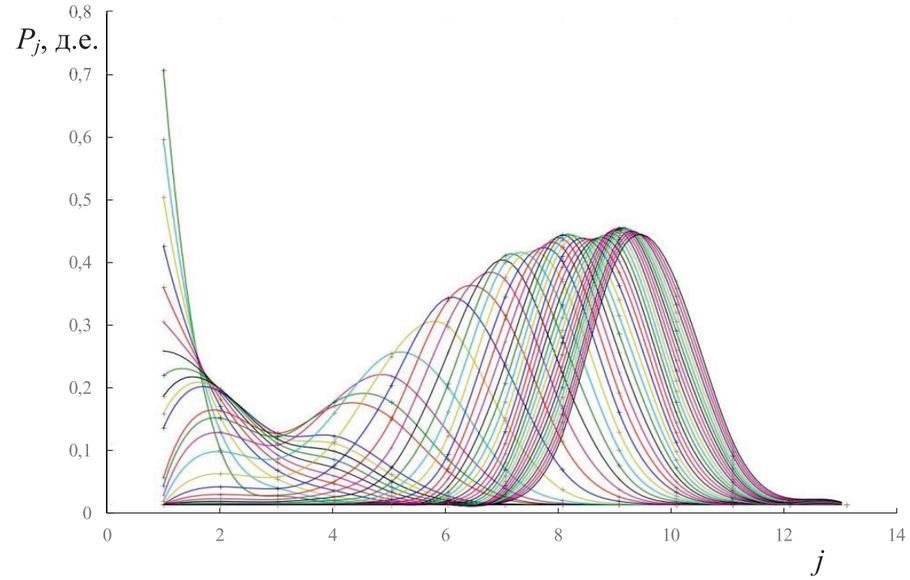


Рисунок 2 – Зависимость фракционного состава от кратности и продолжительности измельчения по интегральной модели (3). Кривые смещаются вправо по мере протекания процесса в соответствии с точечными координатами τ на рис. 3

В нулевой момент времени кварцевый песок представлен одной крупной фракцией, чему соответствует энтропия H = 0. По мере измельчения происходит убыль крупных фракций и накопление мелких, и в какой-то момент наступает

наименьшая контрастность в содержании фракции (в идеале – равенство), и здесь проявляется максимум хаотизации системы. В дальнейшем формируется «перекос» – крутой спад фракционного состава в сторону «неизмельчаемых» частиц из-за действия стерического фактора – уменьшения вероятности попадания шара в зерно. Одновременно с этим и поэтому, а также в результате прохождения через многостадийную интегральную модель разрушения и накопления каждой фракции (кроме первой – только разрушения) возникает структура, включающая оторванный от начала координат состав, хотелось бы сказать изоморфный логарифмически нормальному закону распределения «на зрелых стадиях развития», как заметил ещё в 1941 г. академик А. Н. Колмогоров [20].

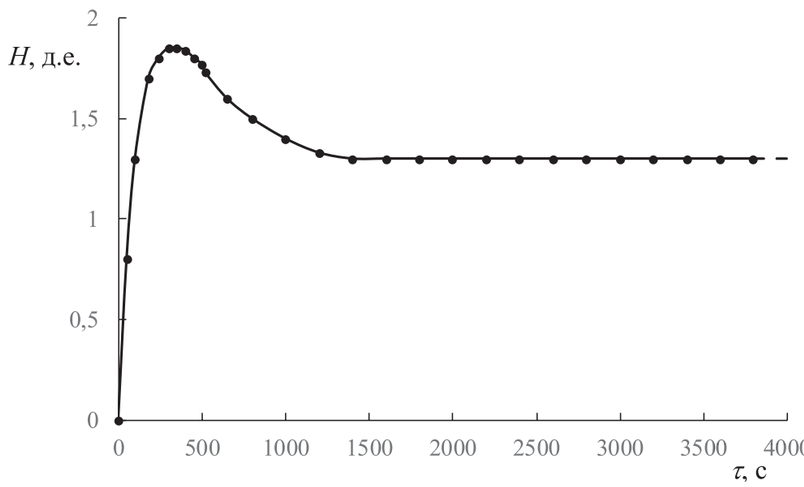


Рисунок 3 – Зависимость энтропии смешения фракций от продолжительности измельчения

В действительности эта структура образуется в результате постоянного подвода и рассеяния энергии в хаотизированную систему для поддержания ее устойчивости. Она, как правило, скрыта для глаз и относится к самой сути взаимосвязи разрозненных, да ещё и хаотизированных объектов. Лишь в редких случаях изоморфные структуры проявляют себя так, как это демонстрируется в кольцах Бенара, реакциях Белоусова-Жаботинского, торнадо и др. Непременным условием и следствием подобной стабильности является понижение энтропии системы ее стабилизация, как это иллюстрируется на рис. 2. Определенно торнадо в мельницах есть!

Таким образом, предпринятый поиск оптимального выражения фактора активации измельчения основан на доказательности изоморфизма распределения Больцмана по отношению к комбинированию различных видов энергии в качестве

разрушающей суммы тепловой и ударной нагрузок и сохраняющего целостность энергетического барьера измельчаемого материала, степень преодоления которого определяет последовательность изменения выхода фракций с учетом их накопления и разрушения в рамках вероятностной интегральной модели измельчения.

Информация о финансировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ № BR23991563)».

Выводы

Для разработки модели измельчения рудных материалов были привлечены вероятностные понятия и соответствующий математический аппарат в разной степени приближения к точности и доказательности использования каждого действующего фактора. Для усиления доказательности модели измельчения используется теория изоморфизма, согласно которой для соответствия структурного единства математических объектов их физическая природа исключается и заменяется четкой процедурой установления определенных отношений эквивалентности.

Распространение распределения (энергетического спектра) Больцмана с одноатомного идеального газа на конденсированное состояние вещества с физической точки зрения обосновывается единым показателем степени хаотизации вещества, то есть его кинетической (тепловой) энергией, а именно температурой и соответствующим уровнем энергии RT. В математическом отношении это единство должно выражаться в изоморфизме дискретной статистической суммы, неотъемлемой основы распределения Больцмана, и несобственного интеграла, которым отображалась эта сумма в целом, несмотря на противопоставление непрерывности интеграла дискретному характеру суммы.

Их изоморфизм был установлен на основании отношения эквивалентности аналогии выбранных «элементов» этих математических объектов в произвольном единичном интервале статистической суммы $(n - 1) \div n$ по независимости A от n, чем определяется переносимость этого отношения единичного интеграла и общего члена суммы на любой единичный интервал и на всю статистическую сумму и несобственный интеграл в целом.

Обнаруженная независимость A позволила впервые найти величину статистической суммы в дискретном ее выражении с любой заданной ей точностью по шагу варьирования энергии $\Delta\varepsilon$ через сходящийся несобственный интеграл и установленный инвариант A. Самым важным оказалась возможность выделения фрагментов этой суммы, например, остаточной ее верхней части Rn по отношению к сумме s в целом в виде относительной доли, полностью адекватной выражению, получаемому по распределению Больцмана для фактора активации, то есть вероятности разрушения зерен. Этим же определяется единство экспоненциального выражения данного фактора для химических и физических

(вязкость) процессов и для самого распределения Больцмана в целом ввиду его прямого (без пошагового) расчета через найденную дискретную сумму.

Было выявлено подчинение закономерностям неравновесной термодинамики изменение энтропии смешения фракций в сторону ее снижения по мере протекания процесса, то есть в проявлении самоорганизации и устойчивости соответствующей структуры. В данном случае это выражается в формировании своеобразного «торнадо» – вращающегося горизонтального пустотелого неправильного цилиндра, заполненного смесью шаров, руды и воды.

Использование модифицированного уравнения активационного фактора в общей вероятностной модели измельчения позволяет адаптировать ее для реальных условий и указывает на возможность модификации других действующих факторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Авдохин, В. М.** Основы обогащения полезных ископаемых: Учебник для вузов. – 2-е изд.: В 2 т. [Текст] – М.: Изд. МГТУ, «Горная книга», 2008. – Т. 2. Технология обогащения полезных ископаемых. – 310 с.

2 **Абрамов, А. А.** Собрание сочинений. Т. 1: Обогатительные процессы и аппараты: Учебник для вузов [Текст]. – М.: Изд. МГТУ, Изд. «Горная книга», 2010. – 470 с.

3 **Федотов, К. В., Никольская, Н. И.** Проектирование обогатительных фабрик: Учебник для вузов [Текст]. – М.: Изд. «Горная книга», 2012. – 536 с.

4 **Арестова, А. В.** Теоретические основы автоматизированного управления. Автоматизация обогатительных фабрик [Текст]. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», 2005. – 316 с.

5 **Foszcz, D., Krawczykowski, D., Gawenda, T., Kasinska-Pilut, E., Pawlos W.** Analysis of process of grinding efficiency in ball and rod mills with various feed parameters [Text] // Book of Mineral Engineering Conference, Zawiercie, Poland. – 2018. – Vol. 427. – P. 012031. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/427/1/012031

6 **Nava, J. V., Coello-Velazquez, A. L., Menendez-Aguado, J. M.** Grinding Kinetics Study of Tungsten Ore [Text] // Metals. – 2021. – Vol.11, Iss. 1. – P. 71. – https://doi.org/10.3390/met11010071

7 **Эль-Мофти, С. Е., Эльбендари, А. М., Абухазел, К. А., Эль-Мидани, А. А.** Сверхтонкое сухое измельчение талька в планетарной мельнице: влияние рабочих условий [Текст] // Обогащение руд. – 2020. – № 6. – С. 21–25. – https://doi.org/10.17580/or.2020.06.04

8 **Маляров, П. В., Ковалев, П. А., Бочкарев, А. В., Долгов, А. М.** Исследование механизмов разрушения минерального сырья в шаровых мельницах [Текст] // Обогащение руд. – 2018. – № 3. – С. 3–8. – https://doi.org/10.17580/or.2018.03.01

9 **de Jong, Tako P. R.** A prediction of blend grinding result based on individual ore size measurements and grinding tests // Minerals Engineering. – 2023. – Vol. 191. – https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107950

10 **Малышев, В. П.** Новый аспект в теории измельчения руд и управления этим процессом [Текст] // Обогащение руд. – 1995. – № 4–5. – С. 4–14.

11 **Малышев, В. П., Макашева, А. М., Кайкенов, Д. А., Зубрина, Ю. С.** Случайная природа и вероятностная модель измельчения материалов [Текст]. – М.: Научный мир, 2017. – 260 с.

12 **Битюцков, В. И., Колмогоров, А. Н.** Изоморфизм / Математический энциклопедический словарь. Под ред. Прохорова Ю.В. [Текст]. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – С. 224–225.

13 **Noether, E.** Abstrakter Aufbau der Idealtheorie in algebraischen Zahl- und Funktionenkörpern [Text] // Mathematische Annalen. – 1927. – Vol. 96. – P. 26–61.

14 **Больцман, Л.** Избранные труды. Молекулярно-кинетическая теория газов. Термодинамика. Статистическая механика. Теория излучения. Общие вопросы физики [Текст]. – М. : Наука, 1984. – 590 с.

15 **Леонтович, М. А.** Введение в термодинамику. Статистическая физика [Текст]. – М. : Высш. школа, 1983. – 416 с.

16 **Малышев В. П., Макашева А. М.** Распределение Больцмана как основа универсального выражения энергии активации вязкого течения, химических реакций и механического разрушения [Текст] // Цветные металлы. – 2018. – № 10. – С. 6–12. – https://doi.org/10.17580/tsm.2018.10.01

17 **Бриллюэн, Л.** Научная неопределенность и информация [Текст]. – М. : Мир, 1966. – 272 с.

18 **Oskembekov, I. M., Katkeeva, G. L.** Silica production from heat-and-power facilities waste materials [Text] // Obogashchenie Rud. – 2014. – № 5. – P. 51–54.

19 **Пригожин, И., Стенгерс, И.** Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой [Текст]. – М.: Прогресс, 1986. – 462 с.

20 **Колмогоров, А. Н.** Основные понятия теории вероятностей [Текст]. – М. : Либроком, 2013. – 120 с.

REFERENCES

1 **Avdoxin, V. M.** Osnovy` obogashheniya polezny`x iskopaemy`x : Uchebnik dlya vuzov. – 2-e izd.: V 2 t. [Fundamentals of mineral processing : Textbook for universities] [Text] – Moscow : Izd. MGTU, «Gornaya kniga», 2008. – Vol. 2. Texnologiya obogashheniya polezny`x iskopaemy`x. – 310 p.

2 **Abramov, A. A.** Sobranie sochinenij. T. 1 : Obogatitel`ny`e processy` i apparaty`: Uchebnik dlya vuzov [Collected Works. Vol. 1: Mineral Processes and Apparatus: Textbook for Universities] [Text]. – Moscow : Izd. MGTU, «Gornaya kniga», 2010. – 470 p.

3 **Fedotov, K. V., Nikol`skaya, N. I.** Proektirovanie obogatitel`ny`x fabrik: Uchebnik dlya vuzov [Design of enrichment plants: Textbook for universities] [Text]. – Moscow : Izd. «Gornaya kniga», 2012. – 536 p.

4 **Arestova, A. V.** Teoreticheskie osnovy` avtomatizirovannogo upravleniya. Avtomatizaciya obogatitel`ny`x fabrik [Theoretical foundations of automated control. Automation of enrichment plants] [Text]. – Ekaterinburg : GOU VPO «Ural`skij gosudarstvenny`j gorny`j universitet», 2005. – 316 p.

5 **Foszcz, D., Krawczykowski, D., Gawenda, T., Kasinska-Pilut, E., Pawlos W.** Analysis of process of grinding efficiency in ball and rod mills with various feed parameters [Text] // Book of Mineral Engineering Conference, Zawiercie, Poland. – 2018. – Vol. 427. – P. 012031. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/427/1/012031

6 **Nava, J. V., Coello-Velazquez, A. L., Menendez-Aguado, J. M.** Grinding Kinetics Study of Tungsten Ore [Text] // Metals. – 2021. – Vol.11, Iss. 1. – P. 71. – https://doi.org/10.3390/met11010071

7 **E`l`-Mofti, S. E., E`l`bendari, A. M., Abuxazel, K. A., E`l`-Midani, A. A.** Sverxtonkoe suxoe izmel`chenie tal`ka v planetarnoj mel`nice : vliyanie rabochix uslovij [Ultrafine dry grinding of talc in a planetary mill: influence of operating conditions] [Text] // Obogashhenie rud. – 2020. – № 6. – P. 21–25. – https://doi.org/10.17580/or.2020.06.04

8 **Malyarov, P. V., Kovalev, P. A., Bochkarev, A. V., Dolgov, A. M.** Issledovanie mexanizmov razrusheniya mineral`nogo sy`r`ya v sharovy`x mel`niczax [Study of the mechanisms of destruction of mineral raw materials in ball mills] [Text] // Obogashhenie rud. – 2018. – № 3. – P. 3–8. – https://doi.org/10.17580/or.2018.03.01

9 **de Jong, Tako P. R.** A prediction of blend grinding result based on individual ore size measurements and grinding tests // Minerals Engineering. – 2023. – Vol. 191. – https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107950

10 **Maly`shev, V. P.** Novy`j aspekt v teorii izmel`cheniya rud i upravleniya e`tim processom [New aspect in the theory of ore grinding and control of this process] [Text] // Obogashhenie rud. – 1995. – № 4–5. – P. 4–14.

11 **Maly`shev, V. P., Makasheva, A. M., Kajkenov, D. A., Zubrina, Yu. S.** Sluchajnaya priroda i veroyatnostnaya model` izmel`cheniya materialov [Random nature and probabilistic model of material grinding] [Text]. – Moscow : Nauchny`j mir, 2017. – 260 p.

12 **Bityuczkov, V. I., Kolmogorov, A. N.** Izomorfizm / Matematicheskij e`nciklopedicheskij slovar`. Pod red. Proxorova Yu.V. [Isomorphism / Mathematical Encyclopedic Dictionary] [Text]. – Moscow : Sovetskaya e`nciklopediya, 1988. – P. 224–225.

13 **Noether, E.** Abstrakter Aufbau der Idealtheorie in algebraischen Zahl- und Funktionenkörpern [Text] // Mathematische Annalen. – 1927. – Vol. 96. – P. 26–61.

14 **Bol`czman, L.** Izbranny`e trudy`. Molekulyarno-kineticheskaya teoriya gazov. Termodinamika. Statisticheskaya mexanika. Teoriya izlucheniya. Obshhie voprosy` fiziki [Selected Works. Molecular-kinetic theory of gases. Thermodynamics. Statistical mechanics. Theory of radiation. General questions of physics] [Text]. – Moscow : Nauka, 1984. – 590 p.

15 **Leontovich, M. A.** Vvedenie v termodinamiku. Statisticheskaya fizika [Introduction to Thermodynamics. Statistical Physics] [Text]. – Moscow : Vy`sshaya shkola, 1983. – 416 p.

16 **Maly`shev V. P., Makasheva A. M.** Raspredelenie Bol`czmana kak osnova universal`nogo vy`razheniya e`nergii aktivacii vyazkogo techeniya, ximicheskix reakcij i mexanicheskogo razrusheniya [Boltzmann distribution as a basis for universal expression of the activation energy of viscous flow, chemical reactions and mechanical destruction] [Text] // Czvetny`e metally`. – 2018. – № 10. – P. 6–12. – https://doi.org/10.17580/tsm.2018.10.01

17 **Brillyue`n, L.** Nauchnaya neopredelennost` i informaciya [Scientific uncertainty and information] [Text]. – Moscow : Mir, 1966. – 272 p.

18 **Oskembekov, I. M., Katkeeva, G. L.** Silica production from heat-and-power facilities waste materials [Text] // Obogashchenie Rud. – 2014. – № 5. – P. 51–54.

19 **Prigozhin, I., Stengers, I.** Poryadok iz xaosa. Novy`j dialog cheloveka s prirodoj [Order from chaos. New dialogue between man and nature] [Text]. – Moscow : Progress, 1986. – 462 p.

20 **Kolmogorov, A. N.** Osnovny`e ponyatiya teorii veroyatnostej [Basic concepts of probability theory] [Text]. – Moscow : Librokom, 2013. – 120 p.

***А. М. Мақашева[1], В. П. Малышев[2], Л. А. Бекбаева[3]**
[1,3]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[2]Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургиялық институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

ИЗОМОРФИЗМНІ ПАЙДАЛАНАТЫН ЫҚТИМАЛДЫ ЖАҚТАУ МОДЕЛІНДЕГІ БЕЛСЕНДІРУ ФАКТОРЫН ӨЗГЕРТУ

Материалдарды ұнтақтау металлургиялық кешеннің ең қымбат үрдіс түрі болып табылады және процестің өзіндік құнын төмендету кезінде әртүрлі материалдарды ұнтақтау технологиясын ұтымды жүзеге асыруға мүмкіндік беретін математикалық аппарат құру өзекті міндет болып табылады. Бұл жұмыстың мақсаты – белсендіру коэффициентіне үшін кенді материалдарды ұнтақтаудың ықтималдық моделін модификациялауда болып табылады.

Жұмысты жүргізу әдістемесі математикада жаңа бағытты – изоморфизмді қолданудан тұрады, оның негізінде ұсақтаудың активтендіру факторын жасау кезінде статистикалық қосындының шамасы алғаш рет дискретті өрнекте, конвергентті дұрыс емес интеграл және белгіленген инвариант арқылы Δε энергияның өзгеру қадамы бойынша кез-келген дәлдікпен табылды.

Жұмыс нәтижесінде активтендіру энергиясымен тікелей байланыс арқылы және активтендіру энергиясына қарсылықта – энергияның әртүрлі түрлерінің – жылу және механикалық, кинетикалық және потенциалдық изоморфизмі салдарынан кенді ұнтақтайтын шарлармен бөлшектеу ықтималдығы бойынша ұсақтаудың активтендіру факторының изоморфизмі анықталды.

Тепе-теңдіксіз термодинамика заңдарына бағыну анықталды: аралас фракциялардың энтропиясының процестің жүруіне қарай оның азаюына қарай өзгеруі, ягни сәйкес құрылымның өздігінен ұйымдастырылуы мен тұрақтылығының көрінісі.

Кілтті сөздер: ұсақтау, изоморфизм, концентрациялық, стерикалық, активациялық, жиілік факторлары.

A. M. Makasheva[1], V. P. Malyshev[2], L. A. Bekbayeva[3]
[1,3]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
[2]Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute,
Republic of Kazakhstan, Karaganda

MODIFICATION OF THE ACTIVATION FACTOR IN A PROBABILISTIC MODEL OF GRINDING USING ISOMORPHISM

Material grinding is the most expensive process of the metallurgical complex, and the creation of a mathematical apparatus that allows for the rational implementation of the technology of grinding various materials while reducing the cost of the process is an urgent task. The purpose of this work is to modify the probabilistic model of grinding ore materials according to the activation factor.

The methodology of the work consists of using a new direction in mathematics – isomorphism, on the basis of which, during the development of the activation factor of grinding, the value of the statistical sum was found for the first time in its discrete expression with any given accuracy for the step of variation of energy Δε through a convergent improper integral and an established invariant.

As a result of the work, isomorphism of the activation factor of grinding was established by the probability of destruction of ore grains by grinding balls through a direct connection with the activation energy and due to the isomorphism of various types of energy - thermal and mechanical, kinetic and potential - in counteraction with the activation energy.

It was revealed that the entropy of mixing fractions is subject to the laws of nonequilibrium thermodynamics in the direction of its decrease as the process proceeds, that is, in the manifestation of self-organization and stability of the corresponding structure.

Keywords: grinding, isomorphism, concentration, steric, activation, frequency factors.

SRSTI 53.01.91
DOI

S. S. Maussumbayev[1], M. A. Yelubay[2], *D. T. Tolegenov[3], G. S. Aitkalieva[4], O. Shtyka[5]
[1,2,3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
[4]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty
[5]Lodz University of Technology, Republic of Poland, Lodz
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2010-9227
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6209-5215
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8242-0655
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9872-6317
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9593-8971
*e-mail: www.dika-92@mail.ru

PROSPECTS AND APPROACHES FOR THE USE OF METALLURGICAL SLAGS IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS

In the context of growing industrial production and increasing focus on sustainable development, the recycling of technological waste is gaining strategic importance. Metallurgical slags, formed as by-products in the steelmaking industry, represent valuable mineral resources suitable for reuse.

This article examines current and emerging methods for the utilization and recycling of blast furnace, open-hearth, and electric arc furnace slags as components in binders and construction materials. Special attention is given to innovative approaches for the activation and modification of slags aimed at enhancing their hydraulic activity and performance properties. A classification of slags based on the type of metallurgical production is provided, and the directions for their rational use are systematized according to their chemical and mineralogical composition.

Based on a comprehensive analysis of literature sources and experimental data as well as technology strategies are proposed to minimize the environmental impact of slags and to increase the efficiency of their industrial utilization.

Keywords: metallurgical slags, steelmaking slag, blast furnace slag, electric steelmaking slag, recycling.

Introduction

Accelerated urbanization, population growth, and industrial development in the 21st century are accompanied by an increase in the volume of technogenic waste, which places an ever-growing burden on the environment and resource security. Similar to municipal solid waste (MSW), a significant share of anthropogenic waste is comprised of metallurgical slags – by-products of ferrous and non-ferrous metal smelting processes. Their uncontrolled accumulation can lead to soil, water bodies, and air pollution due to the presence of harmful compounds and heavy metals [1].

According to data from the World Steel Association (Worldsteel), approximately 15.7 million tonnes of steel slag are generated annually in Europe alone, of which only

11.5 million tonnes are recycled. The main categories of metallurgical slags include blast furnace slags, steelmaking slags, ferroalloy slags, and slags formed during steel rolling processes [1]. Despite their considerable resource potential, the recycling rate remains insufficient, and the majority of these materials continue to be landfilled or stockpiled in dumps.

Steelmaking enterprises are also actively exploring the potential for reusing slags in construction. It is estimated that around 50 % of the generated slags are already used in road construction, sintering, pig iron production, and as secondary raw materials [2]. However, their potential is significantly broader—they can serve as a basis for efficient construction, binder, and ceramic materials, making them a crucial component in the development of a circular economy.

Steelmaking enterprises are also actively exploring the potential for reusing slags in construction. It is estimated that around 50% of the generated slags are already used in road construction, sintering, pig iron production, and as secondary raw materials [2]. However, their potential is significantly broader—they can serve as a basis for efficient construction, binder, and ceramic materials, making them a crucial component in the development of a circular economy.

Thus, the rational processing of metallurgical slags is regarded as a key element of environmentally oriented industrial policy. It contributes to reducing environmental pollution, expanding the mineral resource base, and integrating the principles of sustainable development into the metallurgical sector.

Materials and methods

Classification of metallurgical slags. Metallurgical slags formed during the smelting and processing of metals are classified into blast furnaces and steelmaking slags. Their designation depends on the type of furnaces used and the technologies applied in production [3]. The classification of the main types of metallurgical slags is shown in figure 1.

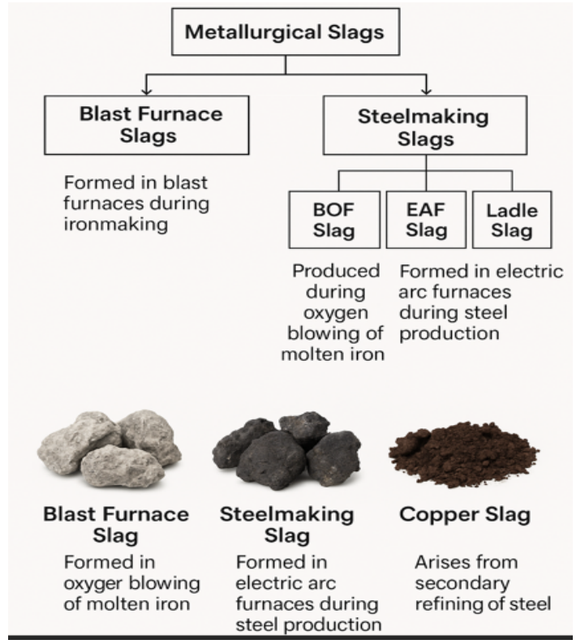


Figure 1 – Classification of Metallurgical Production Waste

Due to the high complexity and diversity of metallurgical processes, numerous types of steelmaking slags vary significantly in composition and properties [3]. In general, slags predominantly contain oxides of alkaline earth and transition metals, as well as compounds of phosphorus, sulfur, and residual metallic phases.

Chemical and Mineralogical Characteristics of Metallurgical Slags.

This section focuses on the analysis of the chemical and phase composition of various types of metallurgical slags—steelmaking, blast furnaces, and copper smelting slags. The chemical composition depends on the type of ore feedstock and the smelting technology used. For example, slags from copper smelting processes typically contain FeO (30–40 %), SiO_2 (35–40%), Al_2O_3 (0–10%), CaO (0–10%), and residual Cu (0.5–2.1%) [4]. Steelmaking slags (SFS) exhibit a more diverse composition, most commonly including CaO, MgO, FeO, and SiO_2. Table 1 illustrates the compositional ranges of open-hearth and electric arc furnace slags [5].

Table 1 – Chemical Composition of Open-Hearth and Electric Arc Furnace Slags

Slag	Content, %						
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	FeO	$FeO+Fe_2O_3$
Open-Hearth							
Primary	24-28	24-25	4-5	8-11	6-7	1-2	13-27
Secondary	36-43	14-18	5-7	11-18	5-28	0,4-0,7	11-22
Electric arc							
Primary	32-35	19-20	2-3	11-17	1-5	1-2	11-25
Secondary	42-55	17-22	4-9	14-16	1-4	0,2-0,2	1-3

Slags form various compounds, including calcium, iron, and manganese silicates; in the presence of TiO_2, V_2O_5, and Cr_2O_3, titanates, vanadates, and other phase inclusions are generated. Open-hearth slags are characterized by a high iron content, including metallic inclusions. Iron losses in current slags reach 8–16%, while in stockpiled slags they range from 2–6%.

Mechanical Processing and Preparation of Slags. To enhance the efficiency of secondary resource utilization at metallurgical enterprises, the intensification of processing accumulated slag dumps is becoming increasingly relevant. This approach not only frees up storage areas but also enables the extraction of metallic inclusions and refractory scrap for reuse in internal production, as well as the separation of slag fractions suitable for construction applications. Such a strategy contributes to a closed-loop resource cycle, reduces waste, and improves the environmental conditions at industrial sites [6].

To release metallic inclusions and sort slag by particle size, a three-stage crushing process is employed using jaw and roll crushers. The results of the sieve analysis are presented in table 2 [7].

Table 2 – Sieve Characteristics of Samples after Crushing [7]

Particle Size Class, mm	Yield, %		
	Stage 1	Stage 2	Stage 3
+ 50	10,01	-	-
50-25	13,56	-	-
25-13	7,06	6,85	-
13-6	8,23	11,08	-
6-3	14,62	18,48	-
1-3	12,89	18,01	-
1-0,5	4,81	10,52	4,86
0,5-0,25	3,35	7,08	14,78
0,25-0,125	5,48	5,67	12,12
0,125-0,063	11,35	12,70	26,55
-0,063	8,64	9,61	19,82
Total	100,00	100,00	100,00

Slag beneficiation includes several stages, which are presented in figure 2.

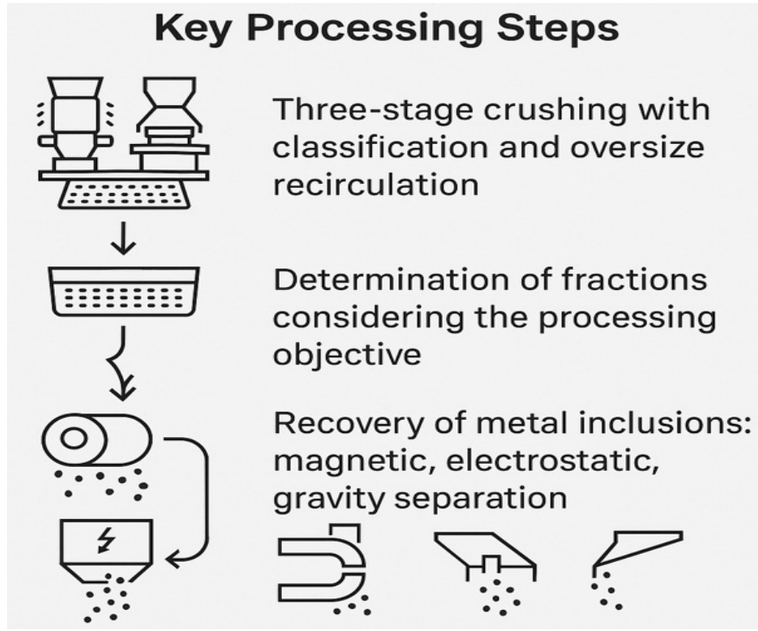


Figure 2 – Flowchart of Mechanical Processing of Metallurgical Slags Highlighting Key Stages and Equipment

Metallurgical slags serve as excellent raw materials for producing high-performance construction products – slag ceramics. To manufacture slag-sital ceramics, the slags must be ground to a particle size of less than 1 mm and, together with other components (such as sand and additives), heated to temperatures around 1500 °C. In this context, the use of molten slags is considered the most practical approach, although it complicates the process of mixing with additives [8].

Blast furnace slag possesses excellent hydraulic properties, making it suitable for use in products such as blast furnace slag Portland cement, which exhibits similar properties to ordinary Portland cement. Approximately 70% of the total blast furnace slag production is used solely as a substitute for Portland cement. The advantages of blast furnace slag cement include its low heat evolution upon hydration, high chemical resistance, and increasing strength over time. As a result, this slag is widely utilized in various fields, particularly in the construction industry [9].

Moreover, the use of stockpiled slags in the production of binder materials is limited, as such slags are a by-product complexly generated within metallurgical operations and require thorough study to determine the most efficient and economically viable recycling strategies in construction. Therefore, to optimize the use of industrial waste as a technogenic raw material, a comprehensive techno-economic assessment is essential, taking into account all relevant factors. These include the chemical and mineralogical composition of the slag (Table 3), where, in certain fractions, minerals containing Mn and Ti are absent. Except for the >10 mm dark gray fraction, the morphological characteristics of the slag particle surfaces indicate the potential for sorption processes [10].

Table 3 – X-ray Phase Analysis Results of Stockpiled Blast Furnace Slag Fractions [10]

Mineral Phases	Mass Fraction of Minerals (%) by Particle Size, mm				
	<0,63	2,5-5,0	> 10, colour		Average Sample
			Light Gray	Dark Gray	
Gehlenite $Ca_2Al_2SiO_7$	43	40,8	41	50	33
Pseudowollastonite $CaSiO_3$	13,3	14,7	16,7	12,9	16,5
Merwinite $Ca_3Mg(Si_2O_8)$	11,1	7,5	13,7	-	24
Rankinite $Ca_3Si_2O_7$	10,7	12,2	1,9	28	5,5
Åkermanite $Ca_2MgSi_2O_7$	6,2	5,7	6,0	4,9	4,2
Dellaite $Ca(SiO_7)(SiO_4)(OH)_2$	10	12,4	13,6	-	8,9
Bredigite $Ca_{14}Mg_2(SiO_4)_8$	5,2	6,7	7,1	-	7,8
Potassium Ferrate $KFeO_2$	-	-	-	1,5	-
Marcasite FeS_2	-	-	-	2,6	-
Hydraulically Active Minerals					
Hydraulically Inactive Minerals					

Stockpiled blast furnace slags can be utilized in the production of binder materials through two main approaches:

– as a raw material component in the production of Portland cement clinker;

– in the production of slag Portland cement by co-grinding cement clinker with slag.

The selection of the first method for utilizing blast furnace slags is primarily determined by their oxide composition, which should be similar to that of the raw materials used in Portland cement clinker production—in particular, the clay component of the raw mix. Based on X-ray phase analysis, the oxide content in the crystalline portion of the slag has been calculated, and the mass fractions of elemental oxides in the entire slag, including its amorphous constituents, have been determined.

The second method of using blast furnace slags in the production of binders requires the presence of minerals with hydraulic properties.

Hydraulic activity refers to the ability of finely ground materials to react with water and harden, forming a solid and durable mass [10]. During the hardening of slag Portland cement, the presence of crystalline calcium silicates enables hydration reactions, resulting in the formation of calcium hydrosilicates, as well as reactions between the silica and alumina in the slag glass and the released calcium hydroxide.

Blast furnace slags can therefore be considered as material components—active mineral additives that exhibit hydraulic properties [10].

Figure 3 presents a flowchart of the processing and utilization of blast furnace slags [10].

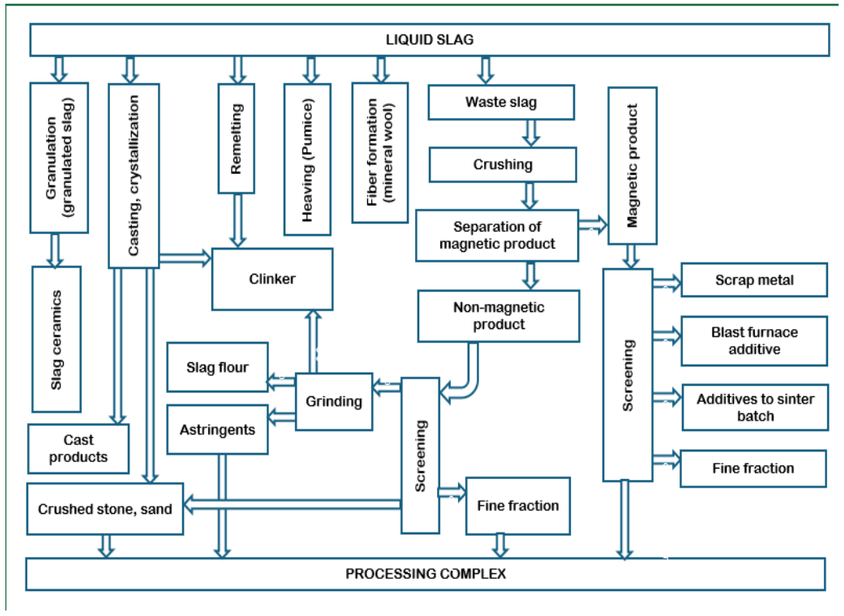


Figure 3 – Flowchart of Blast Furnace Slag Processing

Dry granulation (air-based), considered the most promising method, is distinguished by its ability to utilize the thermal energy of the slag while exerting significantly less environmental impact. Figure 2 presents the schematic of a dry granulation system: molten slag is fed through a closed trough into the granulation container. The slag falls directly onto a rotating disc positioned at the center of the container. Due to the rapid spinning of the disc and a counterflow of air, the molten slag is shattered into fine particles—up to 2 mm in size. These slag particles are thrown outward and come into contact with the cooled walls of the container. They then fall into zones with fluidized beds, where they undergo further cooling. The cooling rate is sufficient to form glassy GBS (granulated blast furnace slag) [10].

The use of blast furnace slags as additives in concrete is regulated. An additive is considered effective if it reduces cement consumption by at least 5%.

Steel fibers incorporated into the concrete mix must be coated with cement paste, as confirmed by the presence of cement paste on the surface of the fibers. Steel fibers bear external loads due to the bond strength created by the cement paste and the hoop effect generated by the spacing between the fibers. When cracks propagate through the hardened cement matrix, the steel fibers crossing the cracks act as reinforcement and absorb a significant amount of energy, which contributes to increased concrete strength [11].

Open-hearth slags primarily consist of oxides formed during the oxidation of iron and various impurities in steel—such as silicon, manganese, phosphorus, chromium, and others—as well as oxides of calcium, iron, silicon, and aluminum introduced into the furnace with lime or limestone, fluxes, iron ore, sinter, and bauxite. Additionally, magnesium and chromium oxides enter the slag due to the wear of basic refractory linings, while silica originates from the linings of acid-process furnaces.

For processing into crushed stone and artificial sand, the use of slags with a crystalline structure is recommended. When the degree of lime decomposition is 3–4%, the slag can be used for base layers in road construction. If the lime decomposition degree is below 1–2%, it can be applied in the production of cement and asphalt concrete mixtures, and in finely ground form (particle size less than (60–70) $\cdot 10^{-6}$ m), as mineral powder and filler for mortar and concrete production [12].

The performance of road surfaces constructed with asphalt-slag mixtures demonstrates high shear resistance and surface roughness of the pavement layers. The coefficient of friction between a vehicle tire and a wet surface reaches 0.6 for a passenger car weighing up to 1.5 tons, based on braking distance measurements. Observations have shown that after five years of operation, asphalt-slag concrete surfaces exhibit half as many thermal cracks, and the width of those cracks is also 2–3 times smaller compared to road sections of the same length constructed using conventional asphalt concrete mixtures with natural crushed stone and sand.

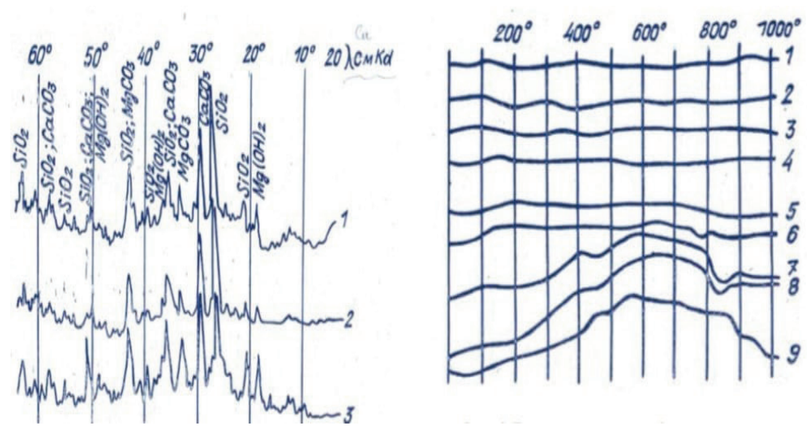
Inspection of pavement structures built with the use of open-hearth slags revealed a deformation modulus of 45 MPa. Over time, a decrease in elastic deflections was observed, indicating an increase in the load-bearing capacity of asphalt-slag concrete pavements [12].

At many plants, slag dumps from open-hearth furnaces are processed using crushing and screening facilities that produce crushed stone and mixtures for road base construction according to specially developed technologies.

Slag crushed stone, being a highly valuable material for road construction, significantly enhances the strength, durability, frost resistance, and heat resistance of roads. Its use, as a substitute for scarce gravel aggregates, is 4–5 times more cost-effective. Estimates suggest that savings of approximately 100,000–110,000 units (in local currency) can be achieved per kilometer of road construction. Additionally, slag crushed stone is an excellent material for producing fine- and coarse-grained asphalt concrete, reinforced crushed stone bases, and various precast concrete products such as channel covers and more [13].

X-ray diffraction patterns of the initial sample (after one day of curing) and the final sample (after two years of curing) of the slag stone show no significant changes in reflection positions (d/n) or intensity (figure 4).

The increase in carbonate content during slag hydration is also confirmed by the growing intensity of endothermic effects with extrema in the range of 810–850 °C (figure 4).



A B

Figure 3 – A –X-ray Diffraction Patterns of Hydrated Fines from Crushed Stockpiled Open-Hearth Slag at the Ages of: 1 – 1 day; 2 – 1 year; 3 – 2 years [14].

Figure 4 – B – Derivatograms of Hydrated Fines from Crushed Stockpiled Open-Hearth Slag at the Ages of: 1 – 1 day; 2 – 3 days; 3 – 7 days; 4 – 14 days; 5 – 1 month; 6 – 3 months; 7 – 6 months; 8 – 1 year; 9 – 2 years [14].

The strengthening of open-hearth slag during hydration can be conventionally divided into six stages, three of which (60–90 days, 180 days to 1 year, and 2 years or more) can be considered syneresis stages, while the preceding three represent the stages of hydrolysis and hydration of the slag. As a result, the coagulation structure forms and develops under conditions of solution supersaturation. The increase in coagulation contacts within the pore space of unhydrated slag particles leads to their densification [14].

Consequently, open-hearth slag can be used in the following forms: – as ordinary crushed stone with a particle size of (5–120) $\cdot 10^{-3}$ m for the construction of lower and subbase layers of road foundations for I–III category highways; – as fractionated crushed stone with particle sizes of (5–10) $\cdot 10^{-3}$ m, (10–20) $\cdot 10^{-3}$ m, and (20–40) $\cdot 10^{-3}$ m for the construction of base layers, surfaces, and wearing courses of I–III category roads. There is another important aspect of using metallurgical waste: open-hearth slags contain more than 5% residual ferrous metal. Therefore, during slag processing, hundreds of tons of valuable raw material can be recovered and returned to the main production cycle [15]. Slag samples were analyzed using X-ray fluorescence spectroscopy on a CPM-35 spectrometer. The chemical composition of the steelmaking slag is presented in table 4, and its mineralogical composition – determined using an Empyrean diffractometer – is shown in table 5.

There is another important aspect of utilizing metallurgical waste. The fact is that open-hearth slags contain more than 5% residual ferrous metal, and therefore, through waste processing, hundreds of tons of valuable raw material can be returned to the main production cycle [15]. Slag samples were analyzed by X-ray fluorescence spectroscopy using a CPM-35 spectrometer. The chemical composition of the steelmaking slag is presented in table 4, and its mineralogical composition was determined using an Empyrean diffractometer and is shown in table 5.

Table 4 – Chemical Composition of Primary Slag, % [16]

Total Fe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	S	P_2O_5
23,4445	15,4259	3,8932	27,7137	4,9844	5,8785	0,0340	0,3972

Table 5 – Mineralogical Composition of Steelmaking Slag [16]

Compound Name	Chemical Formula	%
Wuestite	FeO	29
Magnetite	Fe_3O_4	3
Gehlenite	$Ca_2Al(Al,Si)_2O_7$	29
Merwinite	$Ca_3Mg(SiO4)_2$	19
Oxide of Magnesium and Manganese in Contact with Iron	(MgO)0.43% (MnO)0.57%	20

Processing of primary electric arc furnace slags results in the production of additional charge materials in the form of an iron-carbon alloy, as well as induction melting slag suitable for use as a filler in concrete production [16]. Electron microscopy studies have shown that the degree of crystallization in electric arc furnace slag is quite high (figure 5) [16].

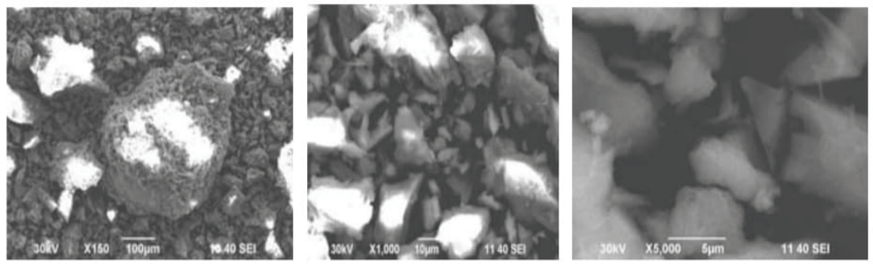


Figure 5 – Structure of Electric Arc Furnace Slag under a Scanning Electron Microscope

The micrograph shows crystals in the form of quadrangular pyramids and small rounded cubic crystals. The irregular linearity and varying curvature of their boundaries are indicative of collective recrystallization. Calcium orthosilicate appears in the micrograph as colorless, very fine needle-like crystals with a more regular crystal structure, though lacking in orderliness.

It is well known that preliminary activation of slag significantly influences the strength and performance characteristics of slag-based materials. Common activators used to accelerate the hardening of slag compositions include building lime, gypsum, alkaline solutions, and cement. Finely dispersed fillers such as cement dust, limestone, loam, burnt rocks, and others are also used [17].

Electric arc furnace slags are currently the least in demand within the construction materials industry. However, with the implementation of new processing technologies, electric arc furnace slags have the potential to become an inexhaustible source of low-cost raw materials for the construction sector. It has been established that both freshly produced slags and those stored for extended periods in dumps can be effectively used in road construction. The addition of finely ground electric arc furnace slag enhances the mechanical strength of asphalt concrete, improves its capacity for elastic and plastic deformation, and contributes to longer service life and superior transport-operational performance of road surfaces [18].

Results and discussion

Thus, at present, the metallurgical industry is one of the major sources of environmental pollution. Metallurgical enterprises generate around 3 million tons of waste, of which only 34 % is recycled. Metallurgical production waste is classified into:

– solid (slags, beneficiation tailings, sublimates, cakes);

– liquid (slurries, pulps, wash water, salt solutions, effluents from wet dust and gas collection, etc.);

– gaseous (process gases, vapors, dust, aerosols, etc.).

An important objective of the metallurgical industry is to reduce carbon dioxide emissions and heat loss to the environment. The use of converter slag as a charge material, along with blast furnace, open-hearth, and electric furnace slags, contributes to a reduction in CO_2 emissions by approximately 0.4 kg per 1 kg of limestone saved [19].

The effective integration of metallurgical slags into industrial processing creates conditions for expanding the mineral resource base of any country, reducing dust generation and pollution of water and air bodies, and overall helps to alleviate environmental stress in major metallurgical cities [20].

The environmental aspects of processing metallurgical slags into construction ceramics represent a significant advantage of this technology. It reduces the volume of metallurgical waste and lessens the burden on landfills.

Eco-friendly and efficient processing of metallurgical slags has in recent years become a priority on the global sustainable development agenda. Several studies have examined modern technologies for the treatment of steel slag (SS) and ladle furnace slag (LFS), including methods based on the application of electric fields for the selective extraction of harmful and valuable impurity elements. One such innovative approach is electric-field activation, which enables the migration of phosphorus and sulfur within a short period of time: phosphorus extraction from SS exceeds 80 %, while sulfur extraction from LFS reaches up to 85 %. This method is particularly relevant for neutralizing the harmful effects of sulfur, which is characteristic of LFS, and for increasing the value of slag processing [20]. These technologies offer promising prospects for the development of low-cost and highly efficient slag recycling schemes in metallurgy.

Funding information

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23486826).

Conclusion

Metallurgical slags formed during the smelting of ferrous and non-ferrous metals represent a significant technogenic resource in terms of both volume and composition, with a high potential for reuse in the construction sector. Based on the conducted analysis, it has been established that both blast furnace and steelmaking slags (including open-hearth and electric arc furnace slags) can be effectively used as components in cement systems, aggregates for asphalt concrete mixtures, mineral additives, and as raw materials for the production of slag-sital products and construction ceramics. Particular attention should be given to methods of mechanical and chemical activation of slags, including three-stage crushing, magnetic and electrostatic separation, as well as advanced approaches based on electric field treatment.

These technologies not only enhance the technical and operational properties of the resulting materials but also contribute to reducing environmental impact, freeing up industrial land, and fostering the principles of a circular economy. Thus, the processing and rational utilization of metallurgical slags is a multifaceted task that encompasses

materials science, engineering technology, environmental protection, and economic considerations. The implementation of a systematic approach to the recycling of such waste can become a key direction for the sustainable development of metallurgical regions and the efficient management of technogenic resources.

REFERENCES

1 **Liu, Y.; Su, Y., Xu, G., Chen, Y., You, G.** Research Progress on Controlled Low-Strength Materials: Metallurgical Waste Slag as Cementitious Materials // Materials. – 2022. – 15. P. 727.

2 **Marjaana, K. B., Tallin, Patrycja, P., Alba, M. A., Abirami, S., Elina, H.S., Aldo, R.** Boccaccini Pertti Lintunen. Ferrochrome Slag Feasibility as a Raw Material in Refractories: Evaluation of Thermophysical and High Temperature Mechanical Properties. – 2020. – Volume 11, P. 7147–7157.

3 **Шаповалов, Н. А., Загороднюк, Л. Х., Тикунова, И. В., Шекина, А. Ю.** Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1–2. – С. 439–443.

4 **Patrick N. L., Juho, Y., Elijah, A., Pekka, T., Paivo, K., Juha, R., Mirja, I.** Reuse of copper slag in high-strength building ceramics containing spodumene tailings as fluxing agent // Minerals Engineering. – 2020. – Volume 155.

5 **Kursová, K., Maierová, P., Slamová, K.** Determination of sulphur contents in metallurgical slags. – Metal 2022. – Technical University of Ostrava. – 2022.

6 **Прохоров, И., Кочержинская, Ю. В., Дюльдина, Э. В.** Анализ технологии доменной плавки с использованием расчета вязкости конечных доменных шлаков / Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов : Труды VIII Российского семинара, Курган, 16–19 октября 2006 года // Под общей редакцией Б. С. Воронцова. – Курган: Курганский государственный университет, 2006. – С. 71–72.

7 **Созонтов, А. В., Лопатин, Л. А.** Исследование и оптимизация рабочего процесса дробилки зерна ударного // Вестник НГИЭИ. – 2018. – №6(85). – С. 27-36.

8 **Валуев, Д. В., Гизатулин, Р. А.** Технологии переработки металлургических отходов: учебное пособие // Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 2012. – 196 с.

9 **Sakhvadze, D. Jandieri, G., Jangveladze, G., Sakhvadze, G.** A new technological approach to the granulation of slag melts of ferrous metallurgy: obtaining glassy fine-grained granules of improved quality // Journal of Enginee ring and Applied Science. – 2021. – № 22.

10 **Калмыкова, Ю. С., Хоботова, Э. Б., Толмачев, С. Н., Уханева М. И.** Отвальный доменный шлак как техногенное сырье для производства вяжущих материалов // Экология и промышленность. – 2011. – № 4 (29). – С. 102–109.

11 **Li, Chen, Xiaoyu, Wang, Qingming Zhao.** Study on the modification effect and mechanism of composite solid waste and steel fiber on the mechanical properties of concrete / Mechanics of Materials. – 2024. – № 11.

12 **Жеванов, В. В., Ромасюк, Е. А., Кротинова, В. Н., Колесникова А. А.** Отсев дробления отвального мартеновского шлака - гидравлически активного структурообразующего компонента асфальтобетонной смеси // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2020. – Т. 1. – С. 284–288.

13 **Гасанлы, Г. Г.** Пути и возможности использования природных ресурсов и отходов в отраслях промышленности строительных материалов // Экономические аспекты управления строительным комплексом в современных условиях : Сборник статей / Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – Самара : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный архитектурно-строительный университет», 2015. – С. 89–100.

14 **Братчун, В. И., Беспалов, В. Л., Жеванов В. В., [и др.]** О гидравлической активности отсева дробления отвального мартеновского шлака // Строитель Донбасса. – 2023. – № 3(24). – С. 31–36.

15 **Погромский, А. С., Духовный, Г. С., Аниканова, Т. В., Рахимбаев, Ш. М.** Применение электросталеплавильных шлаков в конструкциях нежестких дорожных одежд. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова. – 2018. – 100 с.

16 **Ларичкин, В. В.** Исследование первичных шлаков электросталеплавильного производства // Наука и техника Казахстана. – 2021. – № 3. – С. 64–71.

17 **Корнеева, Е. В., Корнеев, В. А.** Использование электросталеплавильного шлака в производстве строительных материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 45(64). – С. 45–53.

18 **Картушина, Ю. Н., Желтобрюхов, В. Ф., Севрюкова, Г. А.** Обращение с твердыми отходами : учебное пособие – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, – 2016. – 96 с.

19 **Остроушко, А. В., Алешин, А. А., Алешина, В. А.** К вопросу рециклинга металлургических шлаков как одного из направлений эколого-экономического и инновационного развития предприятий ГМК // Экология и промышленность. – 2012. – № 4(33). – С. 103–108.

20 **Шадрунова, И. В., Горлова, О. Е., Колодежная, Е. В., Кутлубаев, И. М.** Механизм дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 2. – С. 149–155.

REFERENCES

1 **Liu, Y.; Su, Y., Xu, G., Chen, Y., You, G.** Research Progress on Controlled Low-Strength Materials : Metallurgical Waste Slag as Cementitious Materials // Materials. – 2022. – 15. P. 727.

2 **Marjaana, K. B., Tallin, Patrycja, P., Alba, M. A., Abirami, S., Elina, H.S., Aldo, R.** Boccaccini Pertti Lintunen. Ferrochrome Slag Feasibility as a Raw Material in Refractories : Evaluation of Thermophysical and High Temperature Mechanical Properties. – 2020. – Volume 11, P. 7147–7157

3 **Shapovalov, N. A., Zagorodnyuk, L. X., Tikunova, I. V., Shekina, A. Yu.** Racional`ny`e puti ispol`zovaniya staleplavil`ny`x shlakov [Rational ways of using steelmaking slags] // Fundamental`ny`e issledovaniya. – 2013. – № 1–2. – P. 439–443.

4 **Patrick N. L., Juho, Y., Elijah, A., Pekka, T., Paivo, K., Juha, R., Mirja, I.** Reuse of copper slag in high-strength building ceramics containing spodumene tailings as fluxing agent // Minerals Engineering. – 2020. – Volume 155.

5 **Kursová, K., Maierová, P., Slamová, K.** Determination of sulphur contents in metallurgical slags. – Metal 2022. – Technical University of Ostrava. – 2022.

6 **Proxorov, I., Kocherzhinskaya, Yu. V., Dyul`dina, E`. V.** Analiz texnologii domennoj plavki s ispol`zovaniem rascheta vyazkosti konechny`x domenny`x shlakov [Analysis of blast furnace smelting technology using calculation of final blast furnace slag viscosity] / Komp`yuternoe modelirovanie fiziko-ximicheskix svojstv stekol i rasplavov : Trudy` VIII Rossijskogo seminara, Kurgan, 16–19 oktyabrya 2006 goda // Pod obshhej redakciej B.S. Voronczova. – Kurgan : Kurganskij gosudarstvenny`j universitet, 2006. – P. 71–72.

7 **Sozontov, A. V., Lopatin, L. A.** Issledovanie i optimizaciya rabochego processa drobilki zerna udarnogo [Research and optimization of the working process of impact grain crusher] // Vestnik NGIE`I. – 2018. – №6(85). – P. 27–36.

8 **Valuev, D. V., Gizatulin, R. A.** Texnologii pererabotki metallurgicheskix otxodov: uchebnoe posobie [Technologies for processing metallurgical waste] // Yurginskij texnologicheskij institut. – Tomsk : Izd-vo Tomskogo politexnicheskogo universiteta, – 2012. – 196 p.

9 **Sakhvadze, D. Jandieri, G., Jangveladze, G., Sakhvadze, G.** A new technological approach to the granulation of slag melts of ferrous metallurgy : obtaining glassy fine-grained granules of improved quality // Journal of Enginee ring and Applied Science. – 2021. – № 22.

10 **Kalmy`kova, Yu. S., Xobotova, E`. B., Tolmachev, S. N., Uxaneva M. I.** Otval`ny`j domenny`j shlak kak texnogennoe sy`r`e dlya proizvodstva vyazhushhix materialov [Waste blast furnace slag as a man-made raw material for the production of binders] // E`kologiya i promy`shlennost`. – 2011. – № 4 (29). – P. 102–109.

11 **Li, Chen, Xiaoyu, Wang, Qingming Zhao.** Study on the modification effect and mechanism of composite solid waste and steel fiber on the mechanical properties of concrete / Mechanics of Materials. – 2024. – № 11.

12 **Zhevanov, V. V., Romasyuk, E. A., Krotinova, V. N., Kolesnikova A. A.** Otsev drobleniya otval`nogo martenovskogo shlaka - gidravlicheski aktivnogo strukturoobrazuyushhego komponenta asfal`tobetonnoj smesi [Screening of crushed waste open-hearth slag - a hydraulically active structure-forming component of asphalt concrete mixture] // Modernizaciya i nauchny`e issledovaniya v transportnom komplekse. – 2020. – T. 1. – P. 284–288.

13 **Gasanly`, G. G.** Puti i vozmozhnosti ispol`zovaniya prirodny`x resursov i otxodov v otraslyax promy`shlennosti stroitel`ny`x materialov [Ways and possibilities of using natural resources and waste in the building materials industry] // E`konomicheskie aspekty` upravleniya stroitel`ny`m kompleksom v sovremenny`x usloviyax : Sbornik statej / Samarskij gosudarstvenny`j arxitekturno-stroitel`ny`j universitet. – Samara : Federal`noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego professional`nogo obrazovaniya «Samarskij gosudarstvenny`j arxitekturno-stroitel`ny`j universitet», 2015. – P. 89–100.

14 **Bratchun, V. I., Bespalov, V. L., Zhevanov V. V., [i dr.]** O gidravlicheskoj aktivnosti otseva drobleniya otval`nogo martenovskogo shlaka [On the hydraulic activity of screening crushing of waste open-hearth slag] // Stroitel` Donbassa. – 2023. – № 3(24). – P. 31–36.

15 **Pogromskij, A. S., Duxovny`j, G. S., Anikanova, T. V., Raximbaev, Sh. M.** Primenenie e`lektrostaleplavil`ny`x shlakov v konstrukciyax nezhestkix dorozhny`x odezhd [Application of electric steelmaking slags in flexible road pavement structures]. – Belgorod : Belgorodskij gosudarstvenny`j texnologicheskij universitet im. V. G. Shuxova, – 2018. – 100 p.

16 **Larichkin, V. V.** Issledovanie pervichny`x shlakov e`lektrostaleplavil`nogo proizvodstva [Study of primary slags from electric steelmaking] // Nauka i texnika Kazaxstana. – 2021. – № 3. – P. 64–71.

17 **Korneeva, E. V., Korneev, V. A.** Ispol`zovanie e`lektrostaleplavil`nogo shlaka v proizvodstve stroitel`ny`x materialov [Use of electric steelmaking slag in the production of building materials] // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. – 2016. – № 45(64). – P. 45–53.

18 **Kartushina, Yu. N., Zheltobryuxov, V. F., Sevryukova, G. A.** Obrashhenie s tverdy`mi otxodami [Solid Waste Management] : uchebnoe posobie – Volgograd: Volgogradskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet. – 2016. – 96 p.

19 **Ostroushko, A. V., Aleshin, A. A., Aleshina, V. A.** K voprosu reciklinga metallurgicheskix shlakov kak odnogo iz napravlenij e`kologo-e`konomicheskogo i innovacionnogo razvitiya predpriyatij GMK [On the issue of recycling metallurgical slags as one of the directions of ecological-economic and innovative development of mining and metallurgical enterprises] // E`kologiya i promy`shlennost`. – 2012. – № 4(33). – P. 103–108.

20 **Shadrunova, I. V., Gorlova, O. E., Kolodezhnaya, E. V., Kutlubaev, I. M.** Mexanizm dezintegracii metallurgicheskix shlakov v apparatax centrobezhno-udarnogo drobleniya [The mechanism of disintegration of metallurgical slags in centrifugal impact

crushing devices] // Fiziko-texnicheskie problemy` razrabotki polezny`x iskopaemy`x. – 2015. – № 2. – P. 149–155.

С. С. Маусумбаев[1], М. А. Елубай[2], *Д. Т. Толегенов[3], Г. С. Айткалиева[4], О. Штыка[5]

[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, Павлодар;

[4]Сатпаев университет, Республика Казахстан, Алматы;

[5]Лодзинский технологический университет, Республика Польша, Лодзь.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В современных условиях переработка техногенных отходов приобретает особую значимость в связи с ростом объемов промышленного производства и повышенным вниманием к вопросам устойчивого развития. Техногенные отходы, образующиеся в результате деятельности промышленных предприятий, содержат ценные компоненты, которые могут быть использованы в качестве вторичного сырья. В данной статье рассматриваются методы утилизации и вторичной переработки отходов металлургических шлаков в качестве компонентов вяжущих материалов с акцентом на инновационные подходы к их трансформации в ценные вторичные ресурсы.

Кроме того, представлена классификация отходов металлургического производства: доменные шлаки, мартеновские шлаки и электросталеплавильный шлак. Подробно рассмотрены наиболее распространённые пути применения шлаков в соответствии с их химическим составом. На основании изученной литературы выполнена классификация направлений по рациональному применению шлаков металлургического производства.

На основе комплексного анализа существующих технологий и методик предлагаются перспективные и рациональные пути решения, направленные на минимизацию негативного воздействия отходов на окружающую среду и повышение эффективности ресурсопользования.

Ключевые слова: шлаки металлургического производства, сталеплавильный шлак, доменный шлак, электросталеплавильный шлак, вторичная переработка.

С. С. Маусумбаев[1], М. А. Елубай[2], *Д. Т. Толегенов[3], Г. С. Айткалиева[4], О. Штыка[5]
[1,2,3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[4]Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[5]Лодзь технологиялық университеті, Польша Республикасы, Лодзь қ.

ҚҰРЫЛЫС МАТЕРИАЛДАРЫН ӨНДІРУДЕ МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ШЛАКТЫ ПАЙДАЛАНУДЫҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ ЖӘНЕ ЖОЛДАРЫ

Қазіргі жағдайда техногендік қалдықтарды қайта өңдеу өнеркәсіптік өндіріс көлемінің өсуіне және орнықты даму мәселелеріне назардың артуына байланысты ерекше маңызға ие болады. Өнеркәсіптік кәсіпорындардың қызметі нәтижесінде пайда болатын техногендік қалдықтардың құрамында қайталама шикізат ретінде пайдалануға болатын құнды компоненттер бар. Бұл мақалада металлургиялық шлактардың қалдықтарын бағалы қайталама ресурстарға айналдырудың инновациялық тәсілдеріне баса назар аудара отырып, оларды қайта өңдеу және қайта өңдеу әдістері тұтқыр материалдардың құрамдас бөлігі ретінде қарастырылады.

Сонымен қатар, металлургиялық өндіріс қалдықтарының жіктелуі ұсынылған: Домна шлактары, Мартен шлактары және электрлік балқыту шлактары. Токсиндерді химиялық құрамына сәйкес қолданудың кең таралған жолдары егжей-тегжейлі қарастырылған. Зерттелген әдебиеттер негізінде металлургия өндірісінің токсиндерін ұтымды пайдалану бойынша бағыттардың жіктелуі орындалды.

Қолданыстағы технологиялар мен әдістемелерді кешенді талдау негізінде қалдықтардың қоршаған ортаға теріс әсерін азайтуға және ресурстарды пайдалану тиімділігін арттыруға бағытталған перспективалы және ұтымды шешімдер ұсынылады.

Кілтті сөздер: металлургиялық өндірістегі қождар, болат балқыту қожы, домна қожы, электр балқыту қожы, қайта өңдеу.

МРНТИ 53.37.91
DOI

Р. В. Сапинов[1], *М. Е. Утегенова[2], М. А. Саденова[3], P. S. Varbanov[4]
[1]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[2,3]ВКТУ имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск
[4]Széchenyi István University, Венгрия, г. Дьёр
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9334-5806
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0206-4799
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2870-6668
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5261-1645
*e-mail: MUtegenova@ektu.kz

ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ШЛАКОВ СВИНЦОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Техногенное сырьё имеет значительную экономическую ценность и представляет собой один из ключевых резервов для увеличения ресурсов без необходимости крупных капиталовложений в разработку новых месторождений. В Казахстане металлургические шлаки остаются малоизученными, поэтому необходимо провести исследования металлургических шлаков для оценки их свойств и потенциала переработки, что может способствовать более эффективному использованию ресурсов и решению актуальных задач, стоящих перед промышленностью страны в контексте перехода к круговой экономике и устойчивому развитию. В работе изучены химический и минералогический состав, морфология и структура свинцового шлака ТОО «Казцинк». Показано что шлак содержит ценные компоненты Pb, Cu и Zn в виде оксидов в количествах представляющем коммерческий интерес для их извлечения. Представлены результаты технологии переработки шлака свинцового производства, выявлены эффективные реагенты и изучено влияние температуры на выщелачивание свинца, цинка и меди с использованием соляной кислоты. В продуктивный раствор были переведены Zn-89,2%; Pb-31,8%; Cu-76,8%, а также Mg и Fe в количестве 81% и 83,4% соответственно. Кажущаяся энергия активации для Pb, Cu и Zn составила 62 кДж/моль, 103,4 кДж/моль. и 91,07 кДж/моль соотвественно.

Ключевые слова: металлургия, свинцовый шлак, выщелачивание, химический состав, кинетика.

Введение

Проблемы переработки техногенных отходов остро стоят в странах с развитой металлургической промышленностью, в том чиле и в Казахстане. Техногенные отходы, такие как шлаки цветной металлургии могут представлять угрозу для окружающей среды поскольку содержат тяжелые металлы как Pb, Cu, Zn и другие [1]. Однако при правильном подходе техногенные отходы можно рассматривать как сырье из которого можно получать ценные металлы одновременно снижая их

токсичность [2]. Ранее проведенные исследования показывают что содержание ценных компонентов в шлаках цветной металлургии может превышать их содержание в минеральном сырье, что делает их ценным сырьем для переработки [3,4]. Существуют различные методы переработки металлургических шлаков. Это могут быть пирометаллургические [5], гидрометаллургические и совмещенные методы [6]. Современные взгляды на металлургические процессы отмечают положительные стороны гидрометаллургической переработки в плане оптимизации расходов энергии и экологичности [7,8]. При выщелачивании оксидов металлов используются различные реагенты [9]. При этом соляная кислота имеет некоторые преимущества при переработке сырья с большим содержанием оксида кремния, поскольку не вступает с ней в реакцию подобно серной кислоте, и при этом может достаточно полно извлекать ценные металлы, такие как медь, свинец и цинк [10].

Цель эксперимента изучить состав шлака свинцового производства. Оценить возможность извлечения Cu, Pb, Zn из шлака свинцового производства водным раствором соляной кислоты, с целью получения ценных металлов и снижения токсичности. Оценить термодинамические параметры и кажущуюся энергию активации процесса. Кек оставшийся после извлечения металлов планируется отправить на производство новых композитных материалов.

Материалы и методы

Все эксперименты проводились в лаборатории факультета ВКТУ им. Д. Серикбаева (https://www.ektu.kz). Объектом исследования является шлак свинцового производства ТОО «Казцинк» в количестве 20 кг, из которых методом квартования была отобрана проба (1 кг). Для измельчения шлака до класса -100 мкм (97%) использовалась шаровая мельница на базе стенда вибрационного универсального СВУ-2 производства ТОО «Вибромаш». Измельчение проводилось в течении 30 мин. Масс-спектрометр ICP-MS 7500cx фирмы «Agilent technologies» (США) и рентгеновский дифрактометр X'Pert PRO производства компании «PANalitical» использовались изучения химического и фазового состава сырья. Микроскоп BX-51 (Olympus, Япония) использован для изучения морфологии образцов. Для изучения сырья также использован растровый электронный микроскоп JSM-6390LV производства компании «JEOL Ltd.» (Япония). Для выщелачивания была использована лабораторная реакторная система LR – 2.ST, производство фирмы IKA, (Германия). Термодинамические расчеты проводились с помощью программ HSC 9. Выщелачивание проводилось с помощью раствора HCl (Ж/Т=10/1; 6М; 1000 мл раствора / 100г шлака (размер > 100 мкм)) при перемешивании (290 об/мин) при варьировании температуры раствора от t = 55 °C, 60 °C, 65 °C и 70 °C. Продолжительность эксперимента 300 мин. Каждые 60 минут отбирались пробы для изучения кинетики процесса. Для поддержания pH процесса использовали H_2O_2 = 15 мл /100 мл раствора. Все опыты повторяли 2 раза. При разнице значений результатов более 1 % эксперимент повторяли. Все реагенты аналитической чистоты. Величину энергии активации выщелачивания измеряли с применением методов на основе интерпретации уравнения Аррениуса.

Результаты и обсуждение

Для оценки возможности селективного извлечения свинца и других металлов с помощью программ HSC 9 был проведен термодинамический анализ взаимодействия компонентов при выщелачивании шлака свинцового производства в водном растворе соляной кислоты.

Анализ полученных данных рентгенофазового исследования (Рисунок 1), показывает, что проба шлака представлена аморфной фазой состава, близкого к кристаллическим фазам природного происхождения, таких как фаялит, муллит, волластонит и оксид железа. Химический состав шлака содержит значительное количество оксидов металлов, таких как железо, медь, кремний и другие, что свидетельствует о сложной структуре шлаков (Таблица 1).

Таблица 1 – Химический анализ состава свинцового шлака (масс. %)

MeO,%	FeO	CuO	PbO	ZnO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	S	As
	43,30	0,54	0,11	2,74	11,90	29,80	5,85	3,25	0,25	0,10

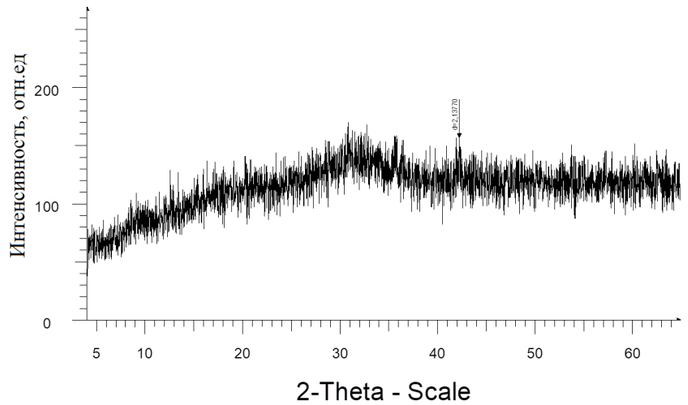


Рисунок 1 – Спектр РФА свинцового шлака

При изучении пробы шлака в отраженном свете, представленном на рисунке 2, выявлено, что пробы шлака состоят из аморфной матрицы. При этом видим металлические вкрапления в самих частицах (внедрены в шлак), внешне сходных с природными медными сульфидными минералами арсенопирита.

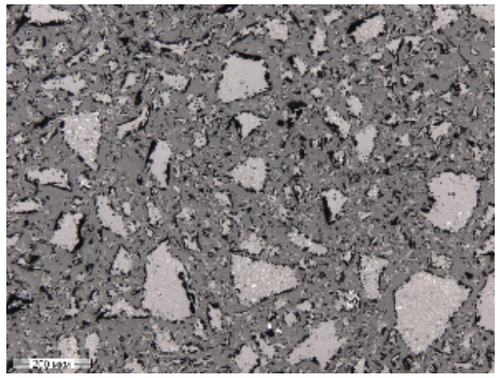


Рисунок 2 – Оптический снимок свинцового шлака, полученный при увеличении x100

На следующем этапе исследована морфология поверхности свинцового шлака с помощью растрового электронного микроскопа (Рисунок 3). Методом элементного анализа и элементного картирования получены поверхностные значения исследуемого образца. Из анализа снимка видно, что образец внешне черный и аморфный, кристаллические образования не отмечается.

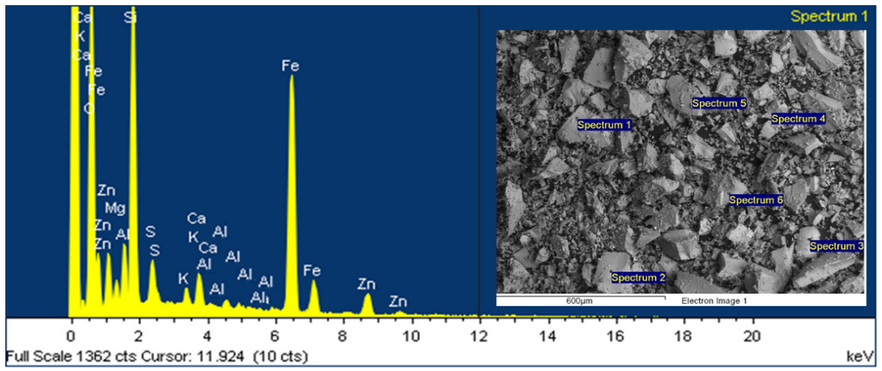


Рисунок 3 – Снимок, полученный с помощью растрового электронного микроскопа и микроанализ свинцового шлака при увеличении x500

Известно из обзора литературы и установлено экспериментально, что тяжелые металлы медь, цинк и свинец находятся в виде оксидов, которые свободно вступают в реакцию с водным раствором соляной кислоты. Часть химических элементов и соединений (SiO_2, Al_2O_3, S, As) останется в кеке, поскольку их реакции взаимодействия с водным раствором соляной кислоты маловероятны (Таблица 2).

Таблица 2 – Стандартные значения ΔG° для реакций оксидов с HCl

Вещество	Реакция	$\Delta G°_{298}$, кДж/моль	Примечания
FeO	$FeO + 2HCl \rightarrow FeCl_2 + H_2O$	−103.651	Термодинамически благоприятна
CuO	$CuO + 2HCl \rightarrow CuCl_2 + H_2O$	-93.15	Термодинамически благоприятна
PbO	$PbO + 2HCl \rightarrow PbCl_2 + H_2O$	-172.969	Термодинамически благоприятна
ZnO	$ZnO + 2HCl \rightarrow ZnCl_2 + H_2O$	−97,436	Термодинамически благоприятна
CaO	$CaO + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O$	-192.2	Термодинамически благоприятна
SiO_2	$SiO_2 + 4HCl \rightarrow SiCl_4 + 2H_2O$	-	Реакция маловероятна
Al_2O_3	$Al_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2O$	-	Реакция маловероятна
MgO	$MgO + 2HCl \rightarrow MgCl_2 + H_2O$	-72,968	Термодинамически благоприятна
S	$S + 2HCl \rightarrow SCl_2 + H_2$	+165.148	Реакция маловероятна
As	$As + 3HCl \rightarrow AsCl_3 + H_2$	-	Реакция маловероятна

Затем выполнена оценка окислительно - восстановительного потенциалов (Eh) ионов разделяемых металлов с целью прогнозирования их последующего поведения при выщелачивании. На рисунке 4 изображены диаграммы Eh-pH, отражающие области существования различных форм металлов в водном растворе из числа присутствующих в шлаке.

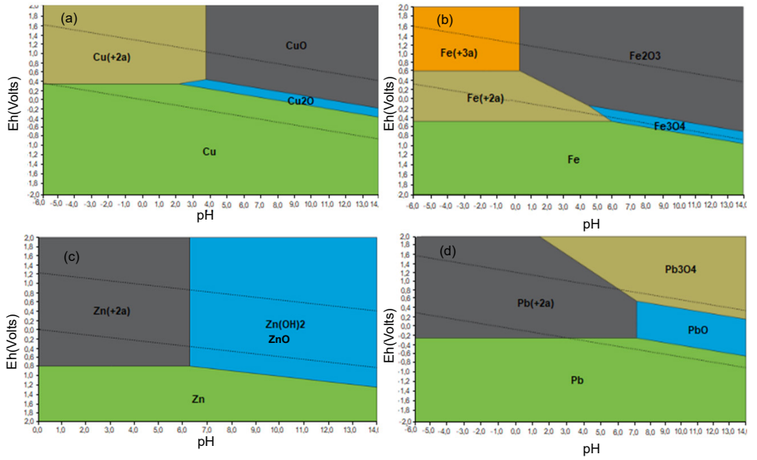


Рисунок 4 – Диаграммы Eh-pH, отображающие области существования в водном растворе различных форм металлов Cu (a), Fe (b), Zn (c), Pb (d)

Варьирование концентрации (молярность) металлов в модельных растворах осуществляли в пределах близких реальным (вероятным) концентрациям элементов (таблица 1). Из диаграммы Eh-pH, для свинца (Pb) видно, что при низком pH (кислая среда) стабильной формой становится Pb^{2+}, в то время как PbO устойчив при более высоком pH. При добавление HCl (даже слабого раствора) pH среды снижается, PbO переходит в раствор в виде Pb^{2+} (1). Далее Pb^{2+} затем реагирует с Cl^- и образует $PbCl_2$ (мало растворим, частично осаждается). Таким образом, при pH < 7 PbO нестабилен и растворяется, что соответствует применению слабого раствора HCl.

$$PbO+2H^+ \rightarrow Pb^{2+}+H_2O \quad (1)$$

Из диаграммы Eh-pH, для меди (Cu) видно, что CuO устойчив в нейтральной и слабокислой среде, но при pH < 4 он начинает растворяться с образованием Cu^{2+}(2). При добавлении концентрированной HCl (pH~0-1) и нагревании ускоряется переход. Cu^{2+} стабилизируется в растворе как $CuCl_2$. Соединение CuO растворяется только в достаточно кислых условиях - это видно на диаграмме Пурбе. Поэтому используется более концентрированный раствор HCl и нагрев.

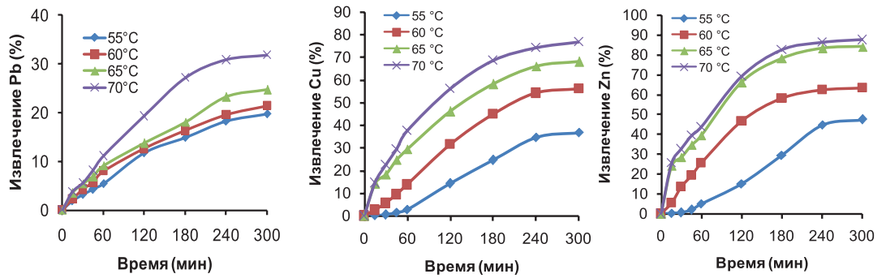
$$CuO+2H^+ \rightarrow Cu^{2+}+H_2O \quad (2)$$

Из диаграммы Eh-pH, для цинка (Zn) видно, что ZnO переходит в Zn^{2+} при pH < 6 ZnO (3). Кроме того, ZnO — амфотерный оксид. В кислоте он ведёт себя как основание. Для эффективного растворения необходима высокая концентрация H^+, то есть высокое содержание HCl и нагрев.

$$ZnO+2H^+ \rightarrow Zn^{2+}+H_2O \quad (3)$$

Предположено, что для растворения PbO необходимо использовать слабый раствор HCl (1-2M) при комнатной температуре. Для растворения CuO необходимо использовать раствор HCl (3-6M), подогретый до 50-60°C. Для растворения ZnO необходимо использовать раствор HCl (3-6M), подогретый до 60-80°C. Во всех случаях для смещения pH в кислую сторону используется перекись водорода (H2O2). Для проверки данной гипотезы были проведены предварительные исследования с подбором оптимальных условий выщелачивания Pb, Cu и Zn. Для этого были проведены эксперименты с варьированием концентрации HCl в интервале от 2 до 6M, и температуры в диапазоне от 21 °C до 80 °C. Установлено, что оптимальными являются параметры процесса, где концентрация HCl = 6M при температуре процесса 70 °C. Концентрация H_2O_2 = 15 мл /100 мл раствора. Это коррелируется с данными ранее полученных авторами исследований [6]. Далее были проведены эксперимента по гидрометаллургическому извлечению Pb, Cu и Zn из образцов шлака свинцового производства с определением кажущейся энергии активации процессов выщелачивания. Получено, что последовательность

извлекаемых металлов целесообразно проводить в зависимости от их количества и физико – химических свойств. Растворение Pb, Cu и Zn проводилось с помощью 6M раствора HCl (Ж/Т=10/1; 1000 мл раствора / 100г шлака (размер > 100 мкм)) при перемешивании (290 об/мин) при варьировании температуры раствора в диспазоне t = 55 °C, 60 °C, 65 °C и 70 °C. Продолжительность эксперимента 300 мин.. Полученные результаты представлены на рисунке 5.

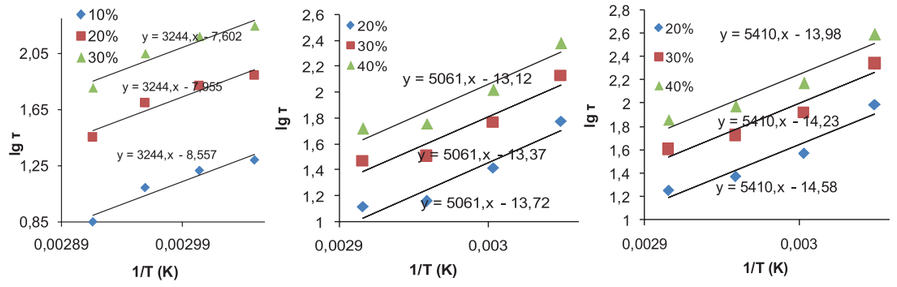


(а) (б) (в)

Рисунок 5 – Степень извлечения
Pb (а), Cu (б) и Zn (в) в зависимости от температуры

Показано, что степень выщелачивание Pb (Рисунок 5а) из шлака свинцового производства при температуре 55 °C составляет 19,7% и растет по мере увеличения температуры до 21,4% при 60 °C, затем до 24,7% при 65 °C с достижением максимума 31,8% с выходом на плато при температуре 70° C. Данные по извлечению меди, в зависимости от температуры приведены на рисунке 5б. Степень выщелачивание Cu из шлака свинцового производства при температуре 55 °C составляет 36,7% и возрастает по мере увеличения температуры до 63,5 % при 60 °C, затем до 84,1% при 65 °C с достижением максимума 89,2 % и выходом на плато при 70 °C. Данные по извлечению цинка, в зависимости от температуры приведены на рисунке 5в. Степень выщелачивание Zn из шлака свинцового производства (рисунок 5в) при температуре 55 °C составляет 47,4% и возрастает по мере увеличения температуры до 63,4 % при 60 °C, затем до 84,1% при 65 °C с достижением максимума 89,2 % и выходом на плато при 70 °C. На следующем этапе были проведен расчет энергии активации процесса по формуле Аррениуса. Для этого полученные эмпирические графики оптимизировали методом наименьших квадратов. Затем методом регрессии были построены графики зависимости ln τ от 1/T.

Коэффициенты наклона прямых $\lg\tau = f(1/T)$ связаны со значением кажущейся энергии активации соотношением $d(\lg\tau)/d(1/T) = E/(2,3R)$ (Рисунок 6).



(а) (б) (в)

Рисунок 6 – Кинетика выщелачивания
Pb (а), Cu (б) и Zn (в) в водном растворе HCl

Графики зависимости lg τ от 1/T для Pb показаны на рисунке 6а. Кажущаяся энергия активации выщелачивания Pb составила 62 кДж/моль. Графики зависимости lg τ от 1/T для Cu показаны на рисунке 6б. Кажущаяся энергия активации выщелачивания Cu составила 103,4 кДж/моль. Графики зависимости lg τ от 1/T для Zn показаны на рисунке 6в. Кажущаяся энергия активации выщелачивания Zn составила 91,07 кДж/моль.

Таким образом, экспериментальные данные извлечения различных металлов из шлака свинцового производства составили: Zn-89,2 %; Pb-31,8 %; Cu-76,8 %, а также Mg и Fe в количестве 81 % и 83,4 % соответственно. Оставшийся кек после дополнительной обработки будет использован в качестве материала для изготовления композитных материалов.

Информация о финансировании

Исследование выполнено в рамках грантового финансирования для молодых ученых «Жас Ғалым» AP22682987 «Разработка цифрового производства керамических материалов, синтезированных из природного сырья и полуфабрикатов цветной металлургии».

Выводы

В работе рассмотрены вопросы, связанные с комплексной переработкой шлака свинцового производства. Проведен анализ современных существующих технологий, показаны их достоинства и недостатки. На основании проведенного обзора литературы выбрана стратегия проведения исследования. Выполнен большой объем экспериментов по совершенствованию процесса выщелачивания свинца, цинка и меди из шлака свинцового производства водным раствором соляной кислоты. Изучено влияние температуры на кинетику реакции выщелачивания. Установлено, что при выщелачивание Zn, Pb, и Cu лимитирующей стадией процесса было химическое взаимодействие, поскольку энергия активации составляла > 40 кДж/моль. что говорит о кинетическом (химическом) режиме лимитирования процесса. Несмотря на теоретически термодинамически более выгодное течение

процесса растворения оксида свинца в соляной кислоте, практические извлечение свинца оказалось меньше, чем у оксида цинка и оксида меди. Это можно объяснить тем, что полученный в результате взаимодействия с соляной кислотой оксид свинца образует $PbCl_2$. Соединение $PbCl_2$ слабо растворимо в воде, и его растворимость уменьшается с повышением концентрации HCl из-за общего ионного эффекта (Cl^-). Кроме этого, часть $PbCl_2$ выпадает в осадок, что мешает дальнейшему растворению PbO. Также возможно образование пассивирующей плёнки $PbCl_2$ на поверхности частиц PbO, что ограничивает дальнейшую реакцию. Полученный результат показал эффективность примененного солянокислого выщелачивания поскольку идет растворение части оксидов тяжелых металлов без растворения Al_2O_3 и SiO_2, в отличие от реакции этих же компонентов с серной кислотой когда образуется силикогель затрудняющий извлечение растворенных в продуктивном растворе тяжелых металлов. На следующем этапе исследования планируется провести осаждения в металлическом виде свинца, цинка и меди путем цементации. Извлечение железа из продуктивного раствора, содержащего ценные компоненты из шлака планируется осуществить путем гидролиза. Оставшийся после всех стадий выщелачивания свинцового шлака кек, отвечающий требованиям по токсичности и не представляющий интерес для металлургической переработки, но при этом аккумулирующий оксиды Al_2O_3 и SiO_2 планируется использовать в качестве материала для производства композитных материалов методами порошковой металлургии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Erdem M., Özverdi A.** Environmental risk assessment and stabilization/ solidification of zinc extraction residue : II. Stabilization/solidification // Hydrometallurgy. – 2011. – № 105. – С. 270–276.

2 **Abdel Basir S. M., Rabahr M. A.** Hydrometallurgical recovery of metal values from brass melting slag // Hydrometallurgy. – 1999. – № 53. – С. 31–44.

3 **Wang G. C.** The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction. - Woodhead Publishing, 2016, с. 35–61. ISBN: 9780081003978

4 **Kolesnikov A. S., Serikbaev B. E., Zolkin A. L., Kenzhibaeva G. S.** Processing of Non-Ferrous Metallurgy Waste Slag for its Complex Recovery as a Secondary Mineral Raw Material // Refractories and Industrial Ceramics. – 2021. – № 62. – С. 375–380.

5 **Vayghan G. A., Horckmans L., Snellings R., Peys A., Teck P., Maier J., Friedrich B., Klejnowska K.** Use of Treated Non-Ferrous Metallurgical Slags as Supplementary Cementitious Materials in Cementitious Mixtures // Applied Sciences. – 2021. – № 11. – С. 1–25.

6 **Pan D., Li L., Tian X., Wu Yu., Cheng N., Yu H.** A review on lead slag generation, characteristics, and utilization // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – № 146. – С. 140–155.

7 **Conard B. R.** The role of hydrometallurgy in achieving sustainable development // Hydrometallurgy. -1992. – № 30. – С. 1–28.

8 **Saidi A., Khawaja E. R., Boffito D. C.** A Review of Traditional and Intensified Hydrometallurgy Techniques to Remove Chromium and Vanadium from Solid Industrial Waste // ACS Engineering Au. – 2024. – № 4. – С. 49–70.

9 **Habbache N., Alane N., Djerad S., Tifouti L.** Leaching of copper oxide with different acid solutions // Chemical Engineering Journal. – 2009. – № 152. – С. 503–508.

10 **Yoshida T.** Leaching of Zinc Oxide in Acidic Solution // Materials transactions. – 2003. – № 44. – С. 2489–2493.

REFERENCES

1 **Erdem M., Özverdi A.** Environmental risk assessment and stabilization/ solidification of zinc extraction residue: II. Stabilization/solidification // Hydrometallurgy. – 2011. – № 105. – P. 270–276.

2 **Abdel Basir S. M., Rabahr M. A.** Hydrometallurgical recovery of metal values from brass melting slag // Hydrometallurgy. – 1999. – № 53. – P. 31–44.

3 **Wang G. C.** The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction. - Woodhead Publishing, 2016, p. 35–61. ISBN: 9780081003978

4 **Kolesnikov A. S., Serikbaev B. E., Zolkin A. L., Kenzhibaeva G. S.** Processing of Non-Ferrous Metallurgy Waste Slag for its Complex Recovery as a Secondary Mineral Raw Material // Refractories and Industrial Ceramics. – 2021. – № 62. – P. 375–380.

5 **Vayghan G. A., Horckmans L., Snellings R., Peys A., Teck P., Maier J., Friedrich B., Klejnowska K.** Use of Treated Non-Ferrous Metallurgical Slags as Supplementary Cementitious Materials in Cementitious Mixtures // Applied Sciences. – 2021. – № 11. – P. 1–25.

6 **Pan D., Li L., Tian X., Wu Yu., Cheng N., Yu. H.** A review on lead slag generation, characteristics, and utilization // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – № 146. – P. 140–155.

7 **Conard B. R.** The role of hydrometallurgy in achieving sustainable development // Hydrometallurgy. – 1992. – № 30. – P. 1–28.

8 **Saidi A., Khawaja E. R., Boffito D. C.** A Review of Traditional and Intensified Hydrometallurgy Techniques to Remove Chromium and Vanadium from Solid Industrial Waste // ACS Engineering Au. – 2024. – № 4. – P. 49–70.

9 **Habbache N., Alane N., Djerad S., Tifouti L.** Leaching of copper oxide with different acid solutions // Chemical Engineering Journal. – 2009. - № 152. – P. 503–508.

10 **Yoshida T.** Leaching of Zinc Oxide in Acidic Solution // Materials transactions. – 2003. – № 44. – P. 2489–2493.

Р. В. Сапинов[1], *М. Е. Утегенова[2], М. А. Саденова[3], P. S. Varbanov[4]
[1]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[2,3]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ.
[4]Széchenyi István University, Венгрия, Дьёр қ.

ҚОРҒАСЫН ӨНДІРІСІНІҢ ҚОЖДАРЫН ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ӨҢДЕУ

Техногендік шикізат айтарлықтай экономикалық құндылыққа ие және жаңа кен орындарын игеруге ірі капитал салымдарын қажет етпестен ресурстарды ұлғайтудың негізгі резервтерінің бірі болып табылады. Қазақстанда металлургиялық қождар аз зерттелген күйінде қалып отыр, сондықтан олардың қасиеттері мен қайта өңдеу әлеуетін бағалау үшін металлургиялық қождарға зерттеулер жүргізу қажет, бұл ресурстарды негұрлым тиімді пайдалануға және айналмалы экономикаға және орнықты дамуға көшу контекстінде ел өнеркәсібінің алдында тұрған өзекті міндеттерді шешуге ықпал етуі мүмкін. Жұмыста «Қазцинк» ЖШС қорғасын қожының химиялық және минералогиялық құрамы, морфологиясы мен құрылымы зерттелді. Қождың құрамында коммерциялық қызығушылық тудыратын мөлшерде оксидтер түрінде Pb, Cu және Zn құнды компоненттері бар екені анықталды. Қорғасын өндірісінің қожды өңдеу технологиясының нәтижелері ұсынылды, тиімді реагенттер анықталды және тұз қышқылын пайдаланып қорғасын, мырыш және мыс сілтілеуіне температураның әсері зерттелді. Нәтижесінде өнімді ерітіндіге ауыстырылды: Zn-89,2%; Pb-31,8%; Cu-76,8%, сонымен қатар Mg және Fe сәйкесінше 81% және 83,4%. Pb, Cu және Zn үшін айқын активтендіру энергиясы 62 кДж/моль, 103,4 кДж/моль, және сәйкесінше 91,07 кДж / моль болып табылды.

Кілті сөздер: металлургия, қорғасын қожы, шаймалау, химиялық құрамы, кинетика.

***R. V. Sapinov*[1], **M. E. Utegenova*[2], *M. A. Sadenova*[3], *P. S. Varbanov*[4]**
[1]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
[2,3]D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk
[3]Széchenyi István University, Hungary, Győr

HYDROMETALLURGICAL PROCESSING OF LEAD PRODUCTION SLAG

Technogenic raw materials have significant economic value and represent one of the key reserves for increasing resources without the need for large capital investments in the development of new deposits. In Kazakhstan, metallurgical slags remain poorly studied, so it is necessary to conduct research on metallurgical slags to assess their properties and processing potential, which can contribute to a more efficient use of resources and solve urgent problems facing the country's industry in the context of transition to a circular economy and sustainable development. In the work chemical and mineralogical composition, morphology and structure of lead slag of «Kazzinc» LLP are studied. It is shown that the slag contains valuable components Pb, Cu and Zn in the form of oxides in quantities of commercial interest for their extraction. The results of lead slag processing technology are presented, effective reagents are revealed and the influence of temperature on leaching of lead, zinc and copper using hydrochloric acid is studied. Zn-89,2%; Pb-31,8%; Cu-76,8%, as well as Mg and Fe in the amount of 81% and 83,4%, respectively, were transferred to the productive solution. The apparent activation energies for Pb, Cu and Zn were 62 kJ/mol, 103.4 kJ/mol. and 91.07 kJ/mol, respectively.

Keywords: metallurgy, lead slag, leaching, chemical composition, kinetics.

МРНТИ 53.31.21
DOI

***Ж. Қ. Сәулебек*[1], *А. С. Орлов*[2], *О. Ж. Садық*[3], *К. К. Мукатаев*[4], *З. Зулхан*[5]**
[1,2,3,4]Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Республика Казахстан, г. Караганда;
[5]Бандунгский технологический институт, Индонезия, г. Бандунг
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3852-7513
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7563-357X
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8557-1532
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5804-643X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6670-1764
*e-mail: zhalgas.saulebek@bk.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ФЕРРОХРОМА С НИЗКИМ УГЛЕРОДНЫМ СЛЕДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩЕГО ФЕРРОСПЛАВА В КАЧЕСТВЕ ВОССТАНОВИТЕЛЯ

В данной работе исследуется возможность использования кальцийсодержащего ферросплава ферроалюмосиликокальция (ФАСК) в качестве восстановителя при производстве рафинированного феррохрома. Проведен сравнительный анализ стандартной технологии с применением силикохрома и разрабатываемого метода с использованием ФАСК. Для определения оптимальных параметров процесса выполнено термодинамическое моделирование в диапазоне температур от 300 до 3000 К с использованием программного комплекса TERRA. Экспериментальные плавки проводились в высокотемпературной печи сопротивления «Таммана».

Результаты исследований показали, что применение ФАСК приводит к существенному изменению фазового состава шлака: содержание алюминатов кальция увеличивается более чем в три раза, что способствует снижению вязкости шлака, улучшению его текучести и снижению температуры плавления. Оптимальный диапазон основности шлака составляет 1,2–1,5, при котором обеспечивается максимальное извлечение хрома в металл. Полученный сплав по химическому составу соответствует требованиям к рафинированным сортам феррохрома, а содержание хрома превышает 65%.

Таким образом, использование комплексного ферросплава ФАСК в качестве восстановителя позволяет повысить эффективность процесса получения рафинированного феррохрома, снизить потери хрома со шлаком и улучшить металлургические свойства шлаков.

Ключевые слова: рафинированный феррохром, термодинамика, комплексный ферросплав, ферроалюмосиликокальций, печь Таммана.

Введение

В производстве рафинированного феррохрома особое внимание уделяется выбору эффективных восстановителей, обеспечивающих высокую степень извлечения хрома и минимизацию примесей в конечном продукте. Одним из перспективных направлений является использование кальцийсодержащих ферросплавов, которые не только способствуют восстановлению хрома, но и улучшают свойства шлаковой фазы, способствуя снижению содержания оксидов и неметаллических включений [1; 2; 3].

Применение таких восстановителей, как ферроалюмосиликокальций (ФАСК) и другие кальцийсодержащие сплавы, позволяет оптимизировать металлургические процессы, повысить качество конечного сплава и снизить технологические потери хрома. Кроме того, кальций в составе восстановителя влияет на основные свойства шлака, такие как вязкость, текучесть и растворяющая способность, что играет ключевую роль в эффективном разделении металлической и шлаковой фаз [4; 5].

В данной работе рассматриваются современные подходы к использованию кальцийсодержащих ферросплавов при производстве рафинированного феррохрома, анализируется их влияние на физико-химические процессы плавки и оценивается их эффективность в сравнении с традиционными восстановителями.

Материалы и методы

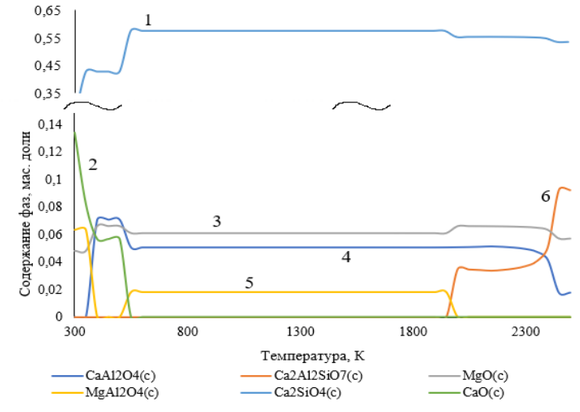
Объектом исследования являлись стандартный способ получения рафинированного феррохрома с применением силикохрома, а также разрабатываемый способ с применением комплексного кальцийсодержащего ферросплава ФАСК. Химический состав шихтовых материалов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание элементов в шихтовом материале (мас. %)

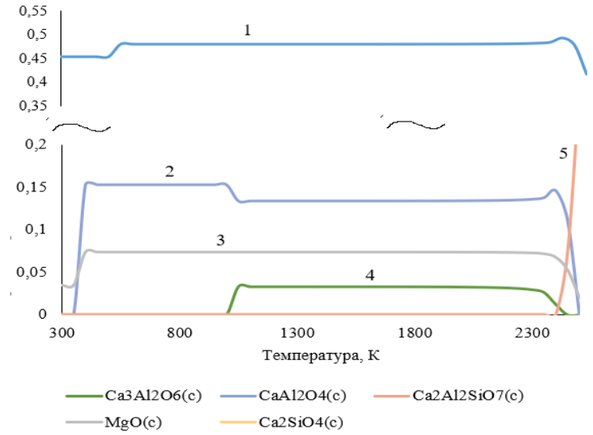
Шихтовые материалы	Содержание элементов, %							
Хромовая руда	Cr_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	P_2O_5	S
	52,881	14,03	10,24	6,13	1,65	15,05	0,006	0,013
Известь	Cr_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	P_2O_5	S
		0,05	0,48	1,62	90	0,46	0,008	0,006
ФСХ	Cr	C	Si	Fe	P	S	-	-
	32,6	0,06	46,7	20,6	0,022	0,012	-	-
ФАСК	Ca	Si	Al	Fe	P	S	-	-
	9,59	52,29	15,45	22,11	0,06	0,02	-	-

Для обеспечения полного протекания реакций и максимального извлечения элементов при карботермической плавке важно правильно выбрать температурный режим процесса. Это связано с тем, что при низких температурах некоторые элементы могут не восстанавливаться, а при слишком высоких температурах они могут перейти в газовую фазу.

Для определения оптимальной температуры было выполнено термодинамическое моделирование процесса в диапазоне температур от 300 до 3000 К с использованием универсальной программы расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA, которая базируется на принципе максимума энтропии [6]. Вероятность протекания реакции оценивалась по энергии Гиббса с помощью программного комплекса HSC.



1 – Ca_2SiO_4; 2 – CaO; 3 – MgO; 4 – $CaAl_2O_4$; 5 – $MgAl_2O_4$; 6 – $Ca_2Al_2SiO_7$.
Рисунок 1 – Динамика изменения фазового состава шлака с температурой по стандартной технологии



1 – Ca_2SiO_4; 2 – $CaAl_2O_4$; 3 – MgO; 4 – $Ca_3Al_2O_6$; 5 – $Ca_2Al_2SiO_7$.
Рисунок 2 – Динамика изменения фазового состава шлака с температурой с применением ФАСК

Термодинамическое моделирование на комплексе программ Терра показало, что при стандартной технологии при получении рафинированного феррохрома образующиеся шлаки в большей части состоят из двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$ (Ca_2SiO_4) (кривая 1, рисунок 1), что подверждается отрицательным значением изменения энергии Гиббса во всем диапазоне температур, согласно комплексу HSC Chemistry (Рисунок 3).

Избыточно большое содержание двухкальциевого силиката может оказывать несколько отрицательных влияний на шлаки при производстве рафинированного феррохрома. Вот основные из них:

Повышенная вязкость шлака: Двухкальциевый силикат способствует увеличению вязкости шлака, что затрудняет его текучесть и удаление из системы. Это может привести к образованию более стабильных и трудноудаляемых шлаков, которые ухудшают процессы в печи.

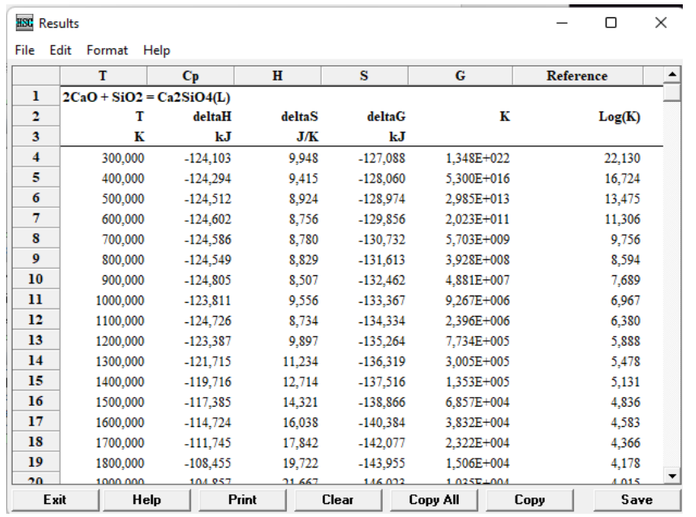
Задержка реакции: Из-за повышенной вязкости шлака с высоким содержанием двухкальциевого силиката может замедляться восстановление металлов и других компонентов в процессе плавки, так как распад шлака или его взаимодействие с металлургическими реагентами замедляется.

Негативное воздействие на температуру плавления: $2CaO \cdot SiO_2$ может повышать температуру плавления шлака, что потребует более высоких температур для его распада и, следовательно, увеличит энергозатраты.

Трудности в переработке и утилизации: Шлаки с высоким содержанием двухкальциевого силиката могут быть сложными для дальнейшей переработки или утилизации, так как большое содоржание $2CaO \cdot SiO_2$ может влиять на стабилизацию шлака и его распад после остывания.

Реакция образования двухкальциевого силиката ($2CaO \cdot SiO_2$) происходит при взаимодействии оксида кальция (CaO) с диоксидом кремния (SiO_2). Это типичная реакция для процессов в металлургии, в частности, для образования шлаков в процессе плавки. Реакция можно выразить следующим образом (1):

$$2CaO + SiO_2 \rightarrow Ca_2SiO_4 \quad (1)$$


Results

File Edit Format Help

	T	Cp	H	S	G	Reference
1	2CaO + SiO2 = Ca2SiO4(L)					
2	T	deltaH	deltaS	deltaG	K	Log(K)
3	K	kJ	J/K	kJ		
4	300,000	-124,103	9,948	-127,088	1,348E+022	22,130
5	400,000	-124,294	9,415	-128,060	5,300E+016	16,724
6	500,000	-124,512	8,924	-128,974	2,985E+013	13,475
7	600,000	-124,602	8,756	-129,856	2,023E+011	11,306
8	700,000	-124,586	8,780	-130,732	5,703E+009	9,756
9	800,000	-124,549	8,829	-131,613	3,928E+008	8,594
10	900,000	-124,805	8,507	-132,462	4,881E+007	7,689
11	1000,000	-123,811	9,556	-133,367	9,267E+006	6,967
12	1100,000	-124,726	8,734	-134,334	2,396E+006	6,380
13	1200,000	-123,387	9,897	-135,264	7,734E+005	5,888
14	1300,000	-121,715	11,234	-136,319	3,005E+005	5,478
15	1400,000	-119,716	12,714	-137,516	1,353E+005	5,131
16	1500,000	-117,385	14,321	-138,866	6,857E+004	4,836
17	1600,000	-114,724	16,038	-140,384	3,832E+004	4,583
18	1700,000	-111,745	17,842	-142,077	2,322E+004	4,366
19	1800,000	-108,455	19,722	-143,955	1,506E+004	4,178
20	1900,000	-104,857	21,667	-146,023	1,025E+004	4,015

Exit Help Print Clear Copy All Copy Save

Рисунок 3 – Термодинамические характеристики реакции образования двухкальциевого силиката Ca_2SiO_4

При полном же замещении силикохрома на комплексный ферросплав ФАСК происходит более чем трехкратное увеличение содержание алюмината кальция $CaAl_2O_4$ (кривая 2, рисунок 2), а также появляется фаза трехкальциевого алюмината $Ca_3Al_2O_6$. Реакции образования этих фаз представлены в уравнениях (2)-(3):

$$2CaO + Al_2O_3 \rightarrow CaAl_2O_4 \quad (2)$$
$$3CaO + Al_2O_3 \rightarrow Ca_3Al_2O_6 \quad (3)$$

Алюмината кальция $CaAl_2O_4$ (кривая 2, рисунок 2) образуется во всем исследуемом диапазоне температур, вплоть до 2400 К. Трехкальциевый алюминат $Ca_3Al_2O_6$ (кривая 4, рисунок 2) начинает образовываться 900 К и выше. Это можно объяснить тем, что до этих температур энергия Гиббса образования соединения $CaAl_2O_4$ имеет более отрицательные значения. Выше этих температур баланс сил смещается в сторону образования соединения $Ca_3Al_2O_6$, что подтверждается комплексом программ HSC Chemistry (рисунок 4)

Results

File Edit Format Help

	T	Cp	H	S	G	Reference
1	CaO+Al2O3=CaO*Al2O3					
2	T	deltaH	deltaS	deltaG	K	Log(K)
3	K	kJ	J/K	kJ		
4	273,000	-15,716	25,092	-22,566	2,080E+004	4,318
5	373,000	-15,645	25,322	-25,091	3,265E+003	3,514
6	473,000	-15,920	24,691	-27,599	1,117E+003	3,048
7	573,000	-16,578	23,438	-30,008	5,442E+002	2,736
8	673,000	-17,405	22,108	-32,284	3,206E+002	2,506
9	773,000	-18,096	21,146	-34,442	2,126E+002	2,328
10	873,000	-18,594	20,540	-36,526	1,533E+002	2,186
11	973,000	-19,042	20,054	-38,555	1,175E+002	2,070
12	1073,000	-19,396	19,707	-40,542	9,414E+001	1,974
13	1173,000	-19,649	19,480	-42,500	7,811E+001	1,893
14	1273,000	-19,800	19,357	-44,441	6,663E+001	1,824
15	1373,000	-19,848	19,320	-46,374	5,813E+001	1,764
16	1473,000	-19,790	19,360	-48,308	5,167E+001	1,713
17	1573,000	-19,622	19,470	-50,249	4,664E+001	1,669
18	1673,000	-19,345	19,640	-52,204	4,266E+001	1,630
19	1773,000	-18,961	19,863	-54,178	3,947E+001	1,596
20	1873,000	-18,466	20,135	-56,178	3,688E+001	1,567
21	1973,000	-17,857	20,451	-58,207	3,476E+001	1,541
22	2000,000	-17,672	20,544	-58,760	3,426E+001	1,535

Exit Help Print Clear Copy All Copy Save

б)

Results

File Edit Format Help

	T	Cp	H	S	G	Reference
1	3CaO+Al2O3=3CaO*Al2O3					
2	T	deltaH	deltaS	deltaG	K	Log(K)
3	K	kJ	J/K	kJ		
4	273,000	-7,499	40,124	-18,453	3,397E+003	3,531
5	373,000	-6,988	41,742	-22,558	1,443E+003	3,159
6	473,000	-6,901	41,970	-26,753	9,008E+002	2,955
7	573,000	-7,157	41,487	-30,929	6,602E+002	2,820
8	673,000	-7,499	40,935	-35,048	5,254E+002	2,720
9	773,000	-7,617	40,766	-39,129	4,409E+002	2,644
10	873,000	-7,457	40,959	-43,215	3,854E+002	2,586
11	973,000	-7,174	41,265	-47,325	3,474E+002	2,541
12	1073,000	-6,741	41,687	-51,472	3,205E+002	2,506
13	1173,000	-6,168	42,197	-55,665	3,013E+002	2,479
14	1273,000	-5,471	42,766	-59,913	2,875E+002	2,459
15	1373,000	-4,670	43,372	-64,220	2,776E+002	2,443
16	1473,000	-3,775	44,001	-68,588	2,707E+002	2,432
17	1573,000	-2,783	44,652	-73,021	2,661E+002	2,425
18	1673,000	-1,718	45,309	-77,519	2,633E+002	2,421
19	1773,000	-0,591	45,962	-82,082	2,621E+002	2,418
20	1873,000	0,590	46,610	-86,711	2,621E+002	2,418
21	1973,000	1,827	47,253	-91,404	2,631E+002	2,420
22	2000,000	2,171	47,427	-92,682	2,635E+002	2,421

Exit Help Print Clear Copy All Copy Save

а)

Рисунок 4 – Термодинамические характеристики реакции образования $CaAl_2O_4$ (а) и $Ca_3Al_2O_6$ (б)

Кальций алюминат ($CaAl_2O_4$) и трехкальциевый алюминат $Ca_3Al_2O_6$ имеет несколько положительных влияний на металлургические шлаки, что делает эти фазы важным компонентом в процессах плавки и рафинирования металлов. Вот основные положительные эффекты:

Улучшение текучести шлака: Кальций алюминат способствует улучшению текучести шлака при высоких температурах. Это помогает легче удалять шлак

из печи или других металлургических агрегатов, повышая эффективность производственного процесса и облегчая удаление примесей из металла.

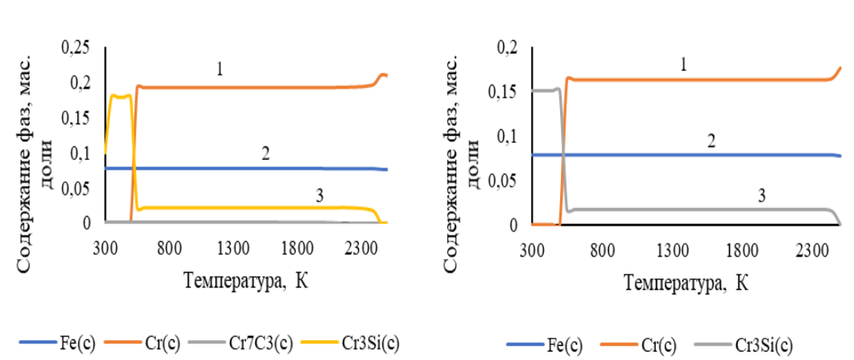
Снижение вязкости шлака: Эти фазы снижают вязкость шлаков, что делает их менее густыми и более подвижными. Это важно для процесса отделения шлаков от металла, а также для предотвращения засорения печи.

Снижение температуры плавления шлаков: Присутствие алюминатов кальция может снизить температуру плавления шлака, улучшая условия работы в печах, снижая энергозатраты и предотвращая образование слишком твердых или высокотемпературных шлаков.

Химическая стабильность: $CaAl_2O_4$ и $Ca_3Al_2O_6$ имеют хорошую термодинамическую стабильность при высоких температурах и не распадаются при изменении условий, что способствует сохранению стабильности состава шлака и его эффективному функционированию на протяжении всего процесса плавки.

Регулирование состава шлаков: Кальций алюминат активно участвует в образовании разнообразных сложных шлаков, которые могут поглощать и связывать вредные примеси, такие как фосфор или сера, улучшая качество получаемого металла и снижая загрязнение.

Основные металлические фазы при использовании комплексного сплава ФАСК в качестве восстановителя не претерпевают никаких изменений (рисунок 5). Однако наблюдается незначительное снижение общего выхода металл, так как из шихтовки колоши убирается металлическое железо и металлический хром который вносит силикохром в процессе рафинирования.



а б

Рисунок 5 – Динамика изменения фазового состава основного металла с температурой по заводской технологии (а) и с применением комплексного ферросплава ФАСК (б).

Для обеспечения достоверности термодинамических анализов и определения физико-химических свойств ФАСК в качестве восстановителя были проведены предварительные лабораторные плавки в тиглях. Эксперименты выполнялись в высокотемпературной печи сопротивления «Таммана» с графитовым нагревателем.

Плавки осуществляли в алундовых тиглях диаметром 75 мм и высотой 500 мм, используя как традиционную, так и предложенную технологию. В качестве шихтовых материалов применяли хромовую руду, ферроалюмосиликокальций и известь (CaO > 90%). Химический состав исходных компонентов представлен в таблицах 2-3.

Таблица 2 – Химический состав хромовой руды, %

Шихтовый материал	Содержание элементов, %							
Хромовая руда	Cr_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	P_2O_5	S
	52,881	14,03	10,24	6,13	1,65	15,05	0,006	0,013
Известь	-	0,05	0,48	1,62	90	0,46	0,008	0,006

Таблица 3 – Химический состав ферроалюмосиликокальция, %

Восстановитель	Содержание элементов, %					
	Ca	Si	Al	Fe	P	S
ФАСК	9,59	52,29	15,45	22,11	0,06	0,02

Смесь шихтовых материалов загружали в алундовый тигель, после чего помещали в печь Таммана и нагревали со скоростью 50–80 °С/мин. Температурный контроль осуществляли с помощью термопары ВР5-20. В процессе нагрева при 900–950 °С наблюдалось выделение газа, обусловленное частичным окислением кремния и алюминия ФАСК под воздействием кислорода воздуха. При дальнейшем повышении температуры до 1100–1150 °С появлялись первые признаки плавления шихты. При достижении температуры 1370 °С началось кипение шлака, которое в диапазоне 1480–1490 °С становилось интенсивным. После этого расплав выдерживали при 1550–1600 °С в течение двух часов, затем охлаждали в естественных условиях. Остывший металл легко отделялся от шлака и имел характерную нитевидную структуру, типичную для хромистых сплавов. Затвердевший шлак имел сероватый оттенок и не рассыпался. Результаты серии плавок представлены в таблице 4.

В ходе экспериментов изменяли соотношение восстановителя и флюсующей добавки для выявления оптимального состава шихты, обеспечивающего максимальное извлечение хрома в сплав. Дополнительно изучалось влияние основности шлака на степень извлечения хрома [7; 8; 9; 10].

Таблица 4 – Химический состав продуктов тигельных плавок рафинированного феррохрома с использованием ФАСК, %

№ п/п	Металл				Шлак					
	Cr	Si	Al	C	Cr_2O_3	MgO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	CaO/ SiO_2
1	63,2	3,3	0,06	1,0	5,6	13,7	24,5	14,3	40,0	1,6
2	65,5	0,7	0,002	0,2	5,8	24,4	24,0	11,2	34,5	1,4
3	67,7	0,7	0,007	1,1	3,5	21,6	24,4	13,8	35,3	1,45
4	66,8	0,9	0,003	0,3	4,2	25,0	22,2	14,1	33,3	1,5
5	64,3	0,8	0,1	1,0	6,7	15,6	24,0	12,3	41,7	1,7

Результаты и обсуждение

Результаты лабораторных исследований подтвердили возможность использования комплексного кальцийсодержащего ферросплава ФАСК в качестве эффективного восстановителя при производстве рафинированного феррохрома.

Фазовый состав шлаков был исследован с использованием термодинамического моделирования и экспериментальных данных (рисунки 1 и 2). При стандартной технологии основным компонентом шлака являлся двухкальциевый силикат (Ca_2SiO_4), который оказывает негативное влияние на вязкость и текучесть шлаковой фазы. В отличие от этого, при использовании ФАСК наблюдалось увеличение содержания алюминатов кальция ($CaAl_2O_4$ и $Ca_3Al_2O_6$), которые способствуют снижению вязкости шлака и улучшению его текучести.

Моделирование в программном комплексе TERRA показало, что образование фаз $CaAl_2O_4$ и $Ca_3Al_2O_6$ происходит в более широком температурном диапазоне (900–2400 К), тогда как двухкальциевый силикат стабилен при более низких температурах. Это подтверждается значениями энергии Гиббса, рассчитанными в HSC Chemistry (рисунок 4). Данные результаты указывают на более благоприятные условия ведения плавки с ФАСК, позволяющие снизить энергозатраты и улучшить шлакообразование.

Анализ химического состава полученного металла (таблица 4) показал, что применение ФАСК позволяет получить сплав с высоким содержанием хрома (до 67,7%) и низким содержанием примесей, таких как кремний (0,7–3,3%) и углерод (0,2–1,1%). Это свидетельствует о высокой степени восстановления хрома и эффективном протекании рафинирующих процессов.

Экспериментальные данные (таблица 4) показали, что оптимальный диапазон основности шлака составляет 1,2–1,5. При этих значениях наблюдалось максимальное извлечение хрома в металл (до 67,7%) и минимальные потери хрома с оксидами в шлаке (<6%). Увеличение основности выше 1,5 приводило к росту количества Ca_2SiO_4, что негативно сказывалось на текучести шлака.

Затвердевшие образцы шлака после 30-дневного хранения в нормальных условиях сохраняли свою структуру, не рассыпались и не проявляли признаков дестабилизации. Это свидетельствует о высокой устойчивости образующихся фаз и возможности переработки шлаков.

Информация о финансирований. Данные исследования были проведены в рамках программно-целевого финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24992758).

Выводы

Применение комплексного кальцийсодержащего ферросплава ФАСК в процессе производства рафинированного феррохрома позволяет значительно повысить эффективность металлургического процесса за счет ряда преимуществ. Во-первых, оно способствует увеличению степени извлечения хрома в металлическую фазу, что связано со снижением потерь хрома в шлаке. Это достигается благодаря изменению состава шлаковой фазы, в которой уменьшается содержание трудноразлагаемых соединений хрома, что, в свою очередь, обеспечивает более полное восстановление металла. Во-вторых, введение ФАСК улучшает физико-химические свойства шлака, снижая его вязкость и повышая текучесть, что облегчает его удаление и снижает вероятность образования застойных зон в печи. В-третьих, благодаря изменению фазового состава шлака, включающему формирование кальций-алюминатных соединений ($CaAl_2O_4$ и $Ca_3Al_2O_6$), достигается оптимизация температурного режима процесса, что позволяет снизить энергозатраты за счет уменьшения температуры плавления шлака. В-четвертых, использование ФАСК приводит к получению феррохрома с повышенным содержанием хрома (более 65 %) и минимальным уровнем примесей, таких как кремний и углерод, что соответствует требованиям к рафинированным маркам сплава. Наконец, проведенные исследования подтвердили стабильность полученных шлаков при длительном хранении, что упрощает их утилизацию и снижает экологические риски. Таким образом, замена традиционного восстановителя (силикохрома) на ФАСК представляет собой перспективное направление в развитии технологий производства рафинированного феррохрома, позволяя повысить его качество, снизить энергозатраты и улучшить экологические показатели процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Akimov, E. N.** Production low-carbon ferrochrome with low content of phosphorus using the complex reducer [Текст] / E. N. Akimov, Y. I. Voronov, A. V. Senin, V. E. // The thirteenth International Ferroalloys Congress Efficient technologies in ferroalloy industry. – 2013. – № 13. – 49–50 p.

2 **Gnatko, M.** Refined of Al-Si-melts by intermetallic iron precipitation – a phase equilibrium investigation [Текст] / M. Gnatko, B. Fredrich, A. Arnold // Proceedings – European Metallurgical Conference. – Aachen, 2005. – P. 1549–1562.

3 **Pikna, L.** Recovery of Chromium from Slags Leachates by Electrocoagulation and Solid Product Characterization [Текст] / L. Pikna, M. Hezelova, A. Morillon, D. Algermissen, O. Milkovic,; R. Findorak, M. Cesnek, J. Briancin, // Metals. – 2020. – 10, 1593. – https://doi.org/10.3390/met10121593

4 **Алмагамбетов, М. С.** Усовершенствование технологии получения рафинированного феррохрома [Текст] / М. С.Алмагамбетов, С. О. Байсанов, Д. Д. Избембетов и др. // Промышленность Казахстана. – 2008. – № 1(46). – С. 86–87.

5 **Heine, W.** Evaluation of the Furnace Method for the Production of Low Carbon Ferrochrome [Текст] / W. Heine, M.G. Andrie // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2016. – № 37(3). – https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1168413

6 **Белов, Г. В.** Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем [Текст] : учеб. / Г. В. Белов, Б. Г. Трусов. – М. : МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.

7 **Масгутов, И.** Состояние и перспективы производства низкоуглеродистого феррохрома [Текст] / И. Масгутов, П. В. Ковалев, В. А. Бигеев, А. И. Волков // Конференция : Труды XVII Международного конгресса сталеваров и производителей металла «От руды к стали - ISCON 2023». – В. : Магнитогорск, 2023.

8 **Makhambetov, Ye. N.** Production of Complex Calcium-Containing Ferrous Alloys of Waste Smelter Slags and High-Ash Coals [Текст] / Ye.N. Makhambetov, A. S. Baisanov, A.Z. Isagulov et. al. // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 10. – P. 692–702.

9 **Ilyasov, A. E.** Deoxidizing and modifying properties of alkaline earth metals within ferroalumosilicocalcium and ferrosilicobarium alloys [Текст] / A. E. Ilyasov, S. N. Sharkaev, A. B. Akhmetov, G. D. Kusainova // Ferrous Metallurgy Bulletin of Scientific Technical and Economic Information. – 2018. – https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-9-58-64.

10 **Алмагамбетов, М. С.** Неметаллические вклю-чения в жидких хромсодержащих расплавах [Текст] / М. С. Алмагамбетов, С. О. Байсанов, Н. З. Нургали и др. // Тез. докл. Межд. научн.-практ. конф. «Жидкость на границе раздела фаз- теория и практика». – Караганды, 2006. – С. 600–604.

REFERENCES

1 **Akimov, E. N.** Production low-carbon ferrochrome with low content of phosphorus using the complex reducer / E. N. Akimov, Y. I. Voronov, A.V. Senin, V.E. // The thirteenth International Ferroalloys Congress Efficient technologies in ferroalloy industry. – 2013. – № 13. – 49–50 p.

2 **Gnatko, M.** Refined of Al-Si-melts by intermetallic iron precipitation – a phase equilibrium investigation / M. Gnatko, B. Fredrich, A. Arnold // Proceedings – European Metallurgical Conference. – Aachen, 2005. – P. 1549–1562.

3 **Pikna, L.** Recovery of Chromium from Slags Leachates by Electrocoagulation and Solid Product Characterization / L. Pikna, M. Hezelova, A. Morillon, D. Algermissen, O. Milkovic,; R. Findorak, M. Cesnek, J. Briancin, // Metals. – 2020. – Т. 10, № 1593. – https://doi.org/10.3390/met10121593

4 **Almagambetov, M. S.** Usovershenstvovanie tekhnologii polucheniya rafinirovannogo ferrohroma [Improvement of technology for obtaining refined ferrochrome] / M. S.Almagambetov, S. O. Bajsanov, D. D. Izbembetov i dr. // Promyshlennost' Kazahstana. – 2008. – № 1(46). – P. 86–87.

5 **Heine, W.** Evaluation of the Furnace Method for the Production of Low Carbon Ferrochrome / W. Heine, M. G. Andrie // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2016. – № 37(3). https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1168413

6 **Belov, G. V.** Termodinamicheskoe modelirovanie himicheski reagiruyushchih sistem [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems] / G. V. Belov, B. G. Trusov. – Moscow : MGTU imeni N.E. Baumana, 2013. – 96 p.

7 **Masgutov, I.** Sostoyanie i perspektivy proizvodstva nizkouglerodistogo ferrohroma [Status and Prospects of Low-Carbon Ferrochrome Production] / I. Masgutov, P. V. Kovalev, V. A. Bigeev, A. I. Volkov // Konferenciya : Trudy XVII Mezhdunarodnogo kongressa stalevarov i proizvoditelej metalla «Ot rudy k stali - ISCON 2023». – V. : Magnitogorsk, 2023.

8 **Makhambetov, Ye. N.** Production of Complex Calcium-Containing Ferrous Alloys of Waste Smelter Slags and High-Ash Coals [Текст] / Ye. N. Makhambetov, A. S. Baisanov, A. Z. Isagulov et. al. // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 10. – P. 692–702.

9 **Ilyasov, A. E.** Deoxidizing and modifying properties of alkaline earth metals within ferroalumosilicocalcium and ferrosilicobarium alloys [Текст] / A. E. Ilyasov, S. N. Sharkaev, A. B. Akhmetov, G. D. Kusainova // Ferrous Metallurgy Bulletin of Scientific Technical and Economic Information. – 2018. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-9-58-64.

10 **Almagambetov, M. S.** Nemetallicheskie vklyu-cheniya v zhidkih hromsoderzhashchih rasplavah [Non-metallic inclusions in liquid chromium-containing melts] / M. S. Almagambetov, S. O. Bajsanov, N. Z. Nurgali i dr. // Tez. dokl. Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «ZHidkost' na granice razdela faz- teoriya i praktika». – Karagandy, 2006. – P. 600–604.

***Ж. Қ. Сәулебек[1], А. С. Орлов[2], Ж. О. Садық[3],**
К. К. Мукатаев[4], З. Зулхан[5]
[1,2,3,4]Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[5]Бандун технологиялық институты, Индонезия, Бандунг қ.

ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРҒЫШ РЕТІНДЕ ҚҰРАМЫНДА КАЛЬЦИЙІ БАР ФЕРРОҚОРЫТПАНЫ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, КӨМІРТЕКТІ ІЗІ ТӨМЕН ФЕРРОХРОМДЫ ДАЙЫНДАУ

Бұл жұмыста тазартылған феррохром өндірісінде тотықсыздандырғыш ретінде құрамында кальцийі бар ферроқорытпа ферроалюминосиликокальций (ФАСК) пайдалану мүмкіндігі зерттеледі. Кремний хромын қолданатын стандартты технологияға және ФАСК көмегімен әзірленген әдіске салыстырмалы талдау жүргізілді. Процестің оңтайлы параметрлерін анықтау үшін TERRA бағдарламалық пакетінің көмегімен 300-ден 3000 К дейінгі температура диапазонында термодинамикалық модельдеу жүргізілді. Тәжірибелік балқыту жоғары температурада төзімді «Тамман» пешінде жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері ФАСК қолдану қождың фазалық құрамының айтарлықтай өзгеруіне әкелетінін көрсетті: кальций алюминаттарының мөлшері үш еседен астам артады, бұл қождың тұтқырлығын төмендетуге, оның сұйықтығын жақсартуға және балқу температурасын төмендетуге көмектеседі. Қож негізділігінің оңтайлы диапазоны 1,2–1,5 құрайды, бұл хромның металға максималды алынуын қамтамасыз етеді. Алынған қорытпаның химиялық құрамы феррохромның тазартылған сорттарына қойылатын талаптарға сәйкес келеді, ал хром мөлшері 65 %-дан асады.

Осылайша, тотықсыздандырғыш ретінде күрделі ферроқорытпа ФАСК пайдалану тазартылған феррохром алу процесінің тиімділігін арттыруға, шлактан хромның жоғалуын азайтуға және қождың металлургиялық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: тазартылған феррохром, термодинамика, күрделі ферроқорытпа, ферроалюмосиликокальций, Тамман пеші.

Zh. K. Saulebek[1], A. S. Orlov[2], Zh. O. Sadyk[3],
K. K. Mukatayev[4], Z. Zulhan[5]
[1,2,3,4]Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
[5]Bandung Institute of Technology, Indonesia, Bandung

PRODUCTION OF LOW CARBON FOOTPRINT FERROCHROME USING CALCIUM-CONTAINING FERROALLOY AS A REDUCING AGENT

In this paper, we study the possibility of using calcium-containing ferroalloy ferroalumosilicocalcium (FASC) as a reducing agent in the production of refined ferrochrome. A comparative analysis of the standard technology using silicochrome and the developed method using FASC is carried out. Thermodynamic modeling in the temperature range from 300 to 3000 K using the TERRA software package was performed to determine the optimal process parameters. Experimental melts were carried out in a high-temperature resistance furnace "Tammana". The results of the studies showed that the use of FASC leads to a significant change in the phase composition of the slag: the content of calcium aluminates increases more than threefold, which helps to reduce the viscosity of the slag, improve its fluidity and reduce the melting point. The optimal range of slag basicity is 1.2–1.5, which ensures maximum extraction of chromium into the metal. The resulting alloy meets the requirements for refined grades of ferrochrome in terms of chemical composition, and the chromium content exceeds 65%. Thus, the use of complex ferroalloy FASK as a reducing agent allows increasing the efficiency of the process of obtaining refined ferrochrome, reducing chromium losses with slag and improving the metallurgical properties of slags.

Keywords: refined ferrochrome, thermodynamics, complex ferroalloy, ferroalumosilicocalcium, Tamman furnace.

ТРАНСПОРТ

МРНТИ 62.20.35.
DOI

Д. С. Аймуханов[1], А. С. Кадыров[2],
Лукаш Варгула[3], С. М. Аймуханов[4]
[1,2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда
[3]Познаньский политехнический университет, Республика Польша, г. Познань
[4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8816-9760
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7071-2300
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3120-778X
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0951-9495
*e-mail: ads-pavl@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ПРИВОДОВ НА БАЗЕ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ УТИЛИЗИРУЕМОГО ТРАНСПОРТА

Идея вторичного применения автомобильных силовых агрегатов, таких как двигателей, трансмиссии и других компонентов, в приводах исполнительных механизмов транспортной техники, позволяет сэкономить ресурсы и улучшить характеристики по сравнению с затратами на капитальный ремонт либо приобретение нового заводского приводного агрегата.

Для оценки эффективности идеи с вторичным применением агрегатов транспортных средств необходимо провести анализ нескольких факторов, таких как состояние, доступность силовых агрегатов, их совместимость с требуемыми исполнительными механизмами, стоимость адаптации или модернизации агрегатов, а также потенциальные экономические и экологические выгоды производства.

В статье предложено классифицировать возможные конфигурации приводов исполнительных механизмов, а также в сводной таблице приведены основные виды исполнения приводов на базе наиболее распространенных 4-х цилиндровых рядных двигателей внутреннего сгорания в зависимости от требуемой автоматизации привода, способа соединения, исполнения, способа управления. Предлагаемая таблица позволяет максимально эффективно рассчитать производственные затраты в зависимости от выбранной конфигурации и назначения привода исполнительного механизма. На основе анализа данных, в зависимости от назначения, произведен выбор выгодного исполнения конструкции привода, согласно которого изготовлен экспериментальный образец. Анализ исходных данных таблицы и литературных источников определил экономико-математическое выражение, позволяющее на начальном этапе рассчитать рентабельность и эффективность

производства привода исполнительного механизма на базе свап-комплектов утилизируемого транспорта.

Ключевые слова: приводы машин, силовые агрегаты, свап-комплект, проектирование машин, экономика производства.

Введение

С ужесточением требований экологических норм и переходом на электрический вид транспорта в Европе, Китае и Японии массово развивается рынок дешевых «контрактных» автозапчастей. В нашей стране наиболее эффективным способом продления срока службы автомобильной техники является модернизация с установкой более надежных «контрактных» силовых агрегатов, демонтированных с зарубежных утилизированных автомобилей.

Эксплуатация подобных «контрактных» силовых агрегатов по стоимости значительно дешевле стоимости капитального ремонта, а также их надежность с учетом оригинальных деталей значительно выше ремонтных аналоговых запасных частей. В настоящее время в производственных масштабах производится модернизация коммерческого пассажирского и грузового автотранспорта типа «Газель», способом замены заводского агрегата на надежные, ресурсные и более распространенные в мире агрегаты бывшего употребления (Тойота, Мерседес Бэнз, Ниссан). Данные комплектные агрегаты называют свап-комплектами («swap kit» перевод с английского языка «комплект для замены») [1; 2].

В связи с этим предлагается исследовать применение автомобильных «контрактных» силовых агрегатов в сборе с навесным оборудованием (далее «свап-комплектов») в приводах устройств и механизмов прочего вида транспорта. К ним можно отнести водный, карьерный транспорт, машины гидромеханизации и дорожную технику.

Из литературных источников приводы транспортного оборудования можно классифицировать по типу соединения на несколько видов [3; 4, с.4-9; 5, с.5-7]:

1) прямое соединение двигателя и исполнительного механизма через упругие полумуфты;

2) соединение двигателя и исполнительного механизма через ременное либо зубчатое соединение;

3) соединение двигателя и исполнительного механизма через упругие полумуфты, совместно с одно- или двуступенчатым редуктором.

По способу управления двигателем и типу используемого топлива можно классифицировать на несколько видов использующихся в настоящее время [6, с.151-197; 7, с.14-144; 8, с.18-93]. К ним относят:

– Дизельные, с механическим управлением ТНВД;

– Дизельные, с электромеханическим управлением ТНВД;

– Дизельные, аккумуляторного типа с электронным управлением ТНВД через электронную педаль акселератора (с системой типа «Common rail»).

– Бензиновые, с механическим управлением, карбюраторные;

– Бензиновые, с электронным управлением через электронную педаль акселератора

– Комбинированные карбюраторные с ГБО 2 поколения, с механическим управлением;

– Комбинированные впрысковые с ГБО 4-6 поколения, с электронным управлением через электронную педаль акселератора

Варианты конфигурации по различному назначению [9].

Конструктивные особенности приводов (силовых агрегатов) транспортных механизмов зависят от многих факторов, включая тип транспортного средства, конструктивных особенностей режима эксплуатации и ожидаемый остаточный моторесурс. Рассмотрим влияние особенности приводов и сложности их систем на прогнозируемый диапазон их моторесурса [10, с. 50-55; 11].

1) Приводы, с моторесурсом 1–3 тыс. моточасов, чаще используются в электрических и гидравлических приводах, обеспечивающие высокую мощность при небольших габаритах. Им характерны материалы с легкими сплавами и высокопрочными сталями, обеспечивающие оптимальное соотношение веса и прочности. Система охлаждения чаще воздушного типа, двс двухтактного типа.

2) Приводы с моторесурсом 3–5 тыс. моточасов представляют собой механические приводы с более сложной системой редукторов для увеличения крутящего момента. В материалах – увеличение доли нержавеющих и коррозионно-стойких материалов, конструктивно более сложные, с водяным охлаждением.

3) Приводы на 5–8 тыс. моточасов используются совместно с одно- или многоступенчатыми редукторами и более мощными двигателями, способные работать в тяжелых условиях. Применяемые материалы - высококачественные композитные материалы и улучшенные сплавы для увеличения долговечности. Наличие в них эффективной системы с жидкостным охлаждением позволяют поддерживать оптимальную рабочую температуру.

4) Приводы на 8 тысяч и более моточасов имеют конструкцию с прямым упругим соединением исполнительного механизма с редукторным или без редукторным исполнением. Двигатели обладают усовершенствованной системой охлаждения в зависимости от условий окружающей среды и конфигурации обдува. Применяются также высококачественные композитные материалы и улучшенные сплавы для увеличения долговечности. Конструкция деталей шатунно-поршневой группы имеют усиленные поясные и опорные поверхности, обладают высокой надежностью и моторесурсом. Подобные двигатели обычно имеют прямое заводское назначение для привода исполнительного механизма.

Рассмотрев конфигурации приводов, можно предположить, что автомобильные бензиновые и дизельные силовые агрегаты в сборе с механической коробкой передач, электрооборудованием, блоком управления, навесным оборудованием, заводскими системами зажигания, смазки, охлаждения и выхлопной системой, резинотехническими изделиями способны отработать заложенный ресурс при сохранении параметров системы охлаждения.

В статье предлагается применение автомобильных двигателей в комплектации всех узлов подкапотного пространства касающихся работы силовых агрегатов. В зависимости от типа исполнительного механизма, его скоростных

характеристик, режима работы, планируемой наработки агрегата выполняется выбор конфигурации.

Материалы и методы

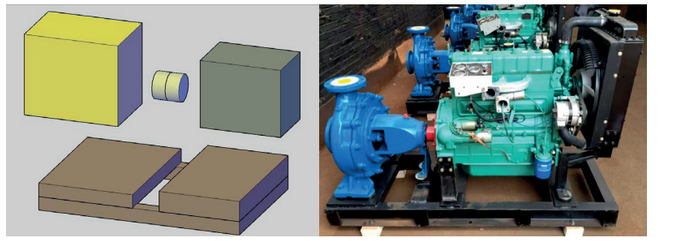
В результате исследования классификации приводов составлена сводная таблица для проектирования приводов в условиях производственных возможностей автотранспортного ремонтного предприятия. В качестве объектов исследования приняты рядные 4х цилиндровые автомобильные двигатели внутреннего сгорания (рисунок 4).

Предлагаемая таблица позволяет рационально выбрать исполнение разрабатываемого привода исполнительного механизма в зависимости от его назначения между 7 типами ДВС наиболее распространенных в мире. В таблице рассмотрены основные элементы, влияющие на изготовление привода с четырьмя видами конструктивного исполнения.

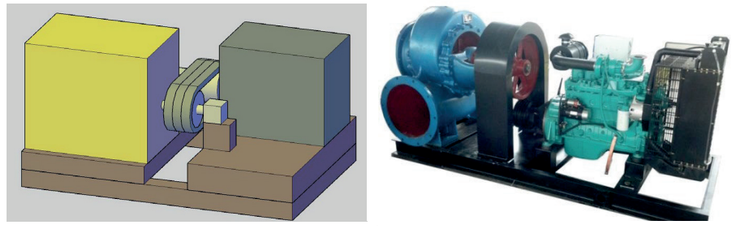
В случае применимости V-образных или многоцилиндровых ДВС элементы затрат увеличиваются в стоимости трудозатрат.

По результатам приведенной таблицы между рядными четырехцилиндровыми ДВС наиболее оптимальным приводом является прямой либо ременной (без мкпп) на базе дизельных с механическим топливным насосом и бензиновых карбюраторных ДВС (рисунок 1).

Преимуществом данного исполнения служит дешевизна изготовления, простота конструкции, и технического обслуживания. Недостатком является неэффективное использование крутящего момента двигателя, отсутствует возможность быстро изменить передаточное отношение при переменной нагрузке, чрезмерный износ ремней на шкиве, малый ресурс коренной шейки коленчатого вала со стороны маховика.



А)



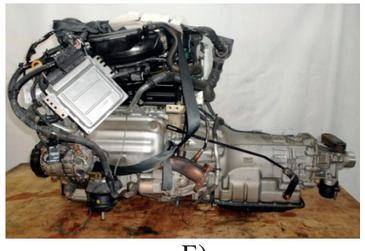
Б)

Рисунок 1 – Классическое исполнение привода исполнительного механизма (дизельного насоса) на базе низкооборотных ДВС: А) прямое; Б) ременное

На втором месте по наименьшему количеству i-элементов является привод с заводским переднеприводным или заднеприводным мкпп (или акпп). В нашем случае при изготовлении применяются штатные автомобильные подушки двигателя на кронштейнах либо подрамнике (рисунок 2).



А)



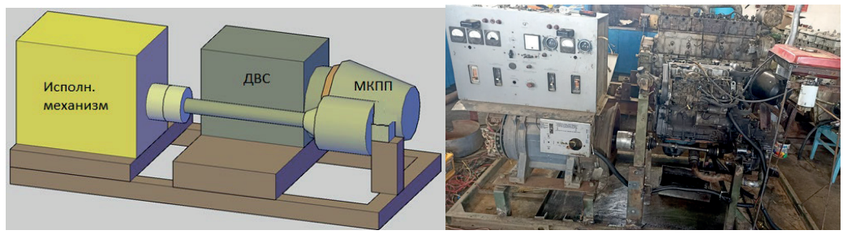
Б)

Рисунок 2 – Свап-комплект Тойота, в сборе с двигателем, сцеплением, кпп, подрамником и амортизирующими подушками:
А) с переднеприводным мкпп, Б) заднеприводной мкпп

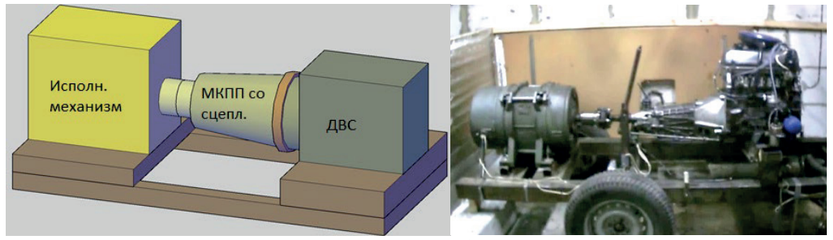
Применение двигателей в сборе со штатным переднеприводным или заднеприводным мкпп, в качестве регулируемого редуктора, позволяет существенно сэкономить на дополнительных элементах, подобрать или рассчитать оптимальную передачу при переменной нагрузке [3; 4].

На примере рисунка 3 разработаны привода с данными элементами. Подобное исполнение позволяет максимально эффективно использовать штатные элементы утилизированного автомобиля.

В нашем случае соединение двигателя и исполнительного механизма производится через упругие полумуфты, переходную плиту и мкпп. Собранный узел ДВС-сцепление-МКПП комплектуется штатными амортизирующими подушками с кронштейнами и подрамником, система охлаждения, система зажигания и выпускная система также сохраняются штатными. В случае применения штатной МКПП, количество дополнительных требуемых элементов уменьшается.



А)



Б)

Рисунок 3 – Оборудование с приводом
в сборе переднеприводной, и заднеприводной МКПП

Исходя из данных таблицы (рисунок 4) можно определить закономерность увеличения элементов. С усложнением современных силовых агрегатов (двигателей и коробок передач) по конструкции, экологического класса и по типу используемого топлива количество элементов конструкции увеличивается, соответственно увеличивается стоимость изготовления привода.

Группируя и принимая за основные конструктивные элементы, указанные в таблице, можем определить себестоимость и рациональность производства установки при том или другом исполнении и сравнить со стоимость заводского продукта классического исполнения.

Результаты и обсуждение

На основе литературных источников и используя гарантийную оценку технического состояния силовых агрегатов определяем, что общая себестоимость производства экспериментальной установки (Собщ) может быть представлена следующим образом [12; 13; 14, с. 84-99]:

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{свап.двс}} + C_{\text{гар.двс}} + (\text{КПП} * C_{\text{свап.кпп}}) + \\ + (\text{КПП} * C_{\text{гар.кпп}}) + C_{\text{мат}} + C_{\text{труд}} + C_{\text{накл}} + C_{\text{эн}}, \quad (1)$$

где: $C_{общ}$ – Общая себестоимость производства;

$C_{свап.двс}$ – Стоимость «контрактного» или свап-комплекта утилизируемого автотранспорта, в том числе ДВС в сборе со сцеплением, навесным оборудованием, радиатором, патрубками, блоком управления, крепежными элементами и т.д., которая равна:

$C_{\text{свап.двс}} = \sum c_i * n_i$ – Сумма стоимости каждого i-компонента (c_i) умноженная на их количество (n_i);

$C_{гар.двс}$ – Стоимость гарантии по прогнозируемому остаточному моторесурсу, состоит из стоимости диагностирования, дефектации, определения остаточного моторесурса и накладных затрат при гарантийном ремонте ДВС;

$C_{свап.кпп}$ – Стоимость расходов, возникающие при установке КПП в сборе с системой управления и крепежными элементами, которая равна:

$C_{\text{свап.кпп}} = \sum c_j * nk_j$ – Сумма стоимости каждого j-компонента КПП (c_j) умноженная на их количество (n_i);

N п/п	Наименование і элемента для изготовления привода, в т.ч. материальные и трудовые затраты	Конфигурации приводов энергетических установок транспортной техники на базе двигателей и коробок передач																													
		на базе дизельных двигателей L4																на базе бензиновых двигателей L4													
		с механич. ТНВД				с электроуправляемым регулятором ТНВД				с электронным ТНВД				Карбюратор				Впрысковые				Карбюр.с ГБО				Впрысковые L4 с ГБО			
		с АМКП	со штатным АМКП	с АМКП	без КПП	с АМКП	со штатным АМКП	с АМКП	без КПП	с АМКП	со штатным АМКП	с АМКП	без КПП	с АМКП	со штатным АМКП	с АМКП	без КПП	с АМКП	со штатным АМКП	с АМКП	без КПП	с АМКП	со штатным АМКП	с АМКП	без КПП	с АМКП	со штатным АМКП	с АМКП	без КПП
1	Двигатель в сборе с навесным оборудованием: Радиатор, генератор, стартер, интеркуллер, шланги, трубки	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	ЭБУ двигателя					1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1
3	ЭБУ ГБО с форсунками и проводкой																									1	1	1	1
4	ЭБУ регулятора ТНВД					1		1	1	1		1	1																
5	ЭБУ ТНВД									1		1	1																
6	Проводка для пуска, регулятор частоты вращения	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Проводка для датчиков, щит приборов с кнопками	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	Жгут проводов для ЭБУ ТНВД					1	1	1	1																				
9	Жгут проводов для ЭБУ двигателя									1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1
10	Комплект ГБО																					1	1	1	1	1	1	1	1
11	Бензобак	1	1	1	1									1	1	1	1									1	1	1	1
12	Бензобак с топливным насосом низкого давления					1	1	1	1																				
13	Бензобак с топливным насосом высокого давления									1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1
14	Теплонепровод, трубопровод системы охлаждения и выхлопная система	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	Подушки и подрамник двигателя и КПП	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	Сцепление с нажимным диском/ з МКПП с нажимным диском	1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1	
17	Переходная плита КПП-Сцепление с крепежами по чертежу			1				1				1				1				1				1				1	
18	Отступа передняя с приводным валом	1				1				1				1				1								1			
19	Карданный вал / шруповый вал с хвостовиком		1	1			1	1			1	1			1	1			1	1			1	1			1	1	
20	Упругая полумуфта карданного вала		1	1			1	1			1	1			1	1			1	1			1	1			1	1	
21	Шкивы быстроходный и тихоходный, натяжное устройство, клиновые ремни				1				1				1				1				1				1				1
22	Полумуфта: с шарнирами и без	1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1		1	1	1	
23	Конструкционные материалы: уголок, швеллер, труба разная	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	Метизы	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1
25	Расходные сварочные материалы: электроды, абразивные диски.	1	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1
26	Газорезка и электросварочные работы	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
27	Токарно-фрезерные работы, в т.ч. изготовление переходной плиты	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1
28	Пуско-наладочные работы: центровка, блокировка дифференциала, проходка рычагов и иголок системы управления, настройка и наладка электрических цепей, системы питания, техобслуживание	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	3	2	3	3	4	3
29	Доработка электронной педали газа и прошивки ЭБУ									1	1	1	1					1	1	1	1					1	1	1	1
30	Дефектация и диагностика основных узлов и агрегатов: двигатель, стартер, генератор, маслонасос, водяной насос, кпп, радиатор, выхлопная труба с глушителем	8	8	8	7	8	8	8	7	8	8	8	7	8	8	8	7	8	8	8	7	8	8	8	7	8	8	8	7
31	Определение остаточного моторесурса	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	1
	Всего показателей	25	27	32	21	28	26	35	24	30	27	36	26	25	27	31	21	27	28	33	23	27	29	33	23	31	32	39	27

Рисунок 4 – Элементы в различном исполнении привода на базе автомобильных ДВС типа L4 и КПП

$С_{гар.кпп}$ – Стоимость гарантии по прогнозируемому остаточному моторесурсу, состоит из стоимости диагностирования, дефектации, определения остаточного моторесурса и накладных затрат при гарантийном ремонте КПП;

КПП – Бинарная переменная – 1, если есть КПП; 0, если нет;

$С_{мат}$ – Стоимость материалов;

$С_{труд}$ – Стоимость трудозатрат, при $C_{труд} = \sum w_i * h_i$ – определяется как сумма стоимости часа работы каждого специалиста (w_j) умноженная на количество отработанных часов (h_j).

$С_{накл}$ – Накладные расходы (расходные и неучтенные материалы, инструменты, ГСМ, транспортные расходы);

$С_{эн}$ – Стоимость энергозатрат;

$C_{эн} = E * P$ – Потребление электроэнергии (Е) умноженное на стоимость единицы электроэнергии (Р).

Решающим показателем для определения рациональности изготовления исследуемого объекта, на базе выбранного свап-комплекта двигателя является:

$$C_{гар.двс} = C_{деф} * f\left(N_{цил}, T_{двс}, P_{двс}\right) + C_{капрем.двс} * И_{физ} \qquad (2)$$

где:

$С_{деф}$ – стоимость дефектации и диагностики двигателя;

$f(N_{цил}, T_{двс}, P_{двс})$ – функция, зависящая от сложности двигателя по отношению к количеству цилиндров, типы двигателей по расположению цилиндров, мощности двигателей, степени наддува двигателя;

$N_{цил}$ – Количество цилиндров двигателя;

$T_{двс}$ – Тип двигателя рядный L, V-образный, W-образный;

$P_{двс}$ – Мощность двигателя;

$С_{капремдвс}$ – Стоимость капитального ремонта двигателя с учетом стоимости деталей;

$И_{физ} = f(t_к, \Delta P_{сж}, \Delta P_{карт.г.}, \Delta P_м, \Delta Z_{колен.в.}, \Delta Z_{цпг}, K_{пит}, K_{рти}, K_{дегр})$ – Коэффициент физического износа, зависящий от функции, отражающей определение физического износа двигателя, по основным параметрам [15; 16].

$t_к$ – коэффициент по времени наработки с момента начала эксплуатации;

$\Delta P_{сж}$ – коэффициент остаточного ресурса по снижению давления сжатия в ЦПГ в зависимости от параметров заводского и допустимых предельных значений;

$\Delta P_{карт.г.}$ – коэффициент остаточного ресурса по увеличению давления картерных газов;

$\Delta P_{масла}$ – коэффициент остаточного ресурса по снижению давления масла;

$\Delta Z_{цпг}$ – коэффициент остаточного ресурса по увеличению зазоров (износа) цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) в зависимости от параметров заводского и допустимых предельных значений;

$\Delta Z_{колен.в}$ – коэффициент остаточного ресурса по увеличению зазоров во вкладышах коленчатого вала;

$K_{пит}$ – коэффициент остаточного ресурса параметров системы питания;

$K_{рти}$ – средний коэффициент остаточного ресурса износа и деградации РТИ двигателя;

$K_{дегр}$ – средний коэффициент остаточного ресурса конструкционных материалов деталей двигателя.

Стоимость гарантии по прогнозируемому остаточному моторесурсу коробки переключения передач или редуктора определяется в следующим виде:

$$C_{\text{гар.кпп}} = C_{\text{деф}} * f\left(t_{\text{кпп}}, T_{\text{кпп}}, N_{\text{передач}}, N_{\text{вал}}\right) + \\ + C_{\text{капрем.кпп}} * И_{\text{физкпп}} + C_{\text{накл}} \quad (3)$$

где:

$C_{деф}$ – стоимость дефектации и диагностики коробки переключения передач;

$f\left(T_{\text{кпп}}, T_{\text{сцепл}}, N_{\text{передач}}, N_{\text{вал}}\right)$ – функция, зависящая от типа кпп, количества переключения передач, количество валов;

$T_{кпп}$ – тип КПП (механическая, автоматизированная, заднеприводная или переднеприводная);

$T_{сцепл}$ – тип сцепления, если есть;

$N_{передач}$ – количество переключения передач;

$N_{вал}$ – количество валов;

$C_{капремкпп}$ – Стоимость капитального ремонта коробки переключения передач и сцепления с учетом стоимости деталей;

$И_{физкпп} = f(t_{кпп}, \Delta M_{крнагр}, K_{сцепл}, K_{подш}, K_{шс})$ – Коэффициент физического износа кпп, зависящий от функции, отражающей определение физического износа, по основным параметрам. Включает в себя параметры времени наработки сначала эксплуатации $t_{кпп}$, параметр отношения заводского номинального крутящего момента кпп и нагрузки к расчетным номинальным крутящим моментам $\Delta M_{крнагр}$, коэффициент технического состояния и износа сцепления $K_{сцепл}$, коэффициента износа подшипников кпп $K_{подш}$, средний коэффициент износа шестерен и синхронизаторов расчетной передачи кпп $K_{шс}$

[3; 15; 16].

Исходя из стоимости основных показателей, указанных в таблице, а также параметров, влияющих на стоимость работ по определению остаточного моторесурса привода, на начальном этапе проектирования можно определить приблизительную себестоимость производства транспортного устройства или механизма.

Для определения рентабельности изготовления привода должно соблюдаться условие, при котором стоимость всех материалов и работ не должна превышать стоимость монтажа нового заводского агрегата:

$$C_{\text{общ}} \leq C_{\text{нов}} \quad (4)$$

Отсюда можем определить, что закупаемая стоимость выбранного расчетного свап-комплекта должна определяться по выражению:

$$C_{\text{свап.двс}} \leq C_{\text{нов}} - C_{\text{гар.двс}} - (\text{КПП} * C_{\text{свап.кпп}}) - (\text{КПП} * C_{\text{гар.кпп}}) - \\ C_{\text{мат}} - C_{\text{труд}} - C_{\text{накл}} - C_{\text{эн}},$$

Таким образом, сравнительный анализ расчетной стоимости изготовления привода и стоимости установки нового привода заводского исполнения позволяет на начальном этапе определить: экономическую рентабельность производства и максимально допустимую стоимость закупаемого свап-комплекта. В случае несоблюдении неравенства требуется выбрать другое исполнение проектируемого привода с меньшим количеством элементов или ограничить гарантийный остаточный моторесурс приводного агрегата.

Выводы

По теме экспериментальной работы по вторичному применению «контрактных» силовых агрегатов выполнен раздел по исследованию основных конфигурации приводов на базе рядных 4-х цилиндровых автомобильных двигателей внутреннего сгорания и МКПП (механической коробки передач) с учетом их дальнейшего назначения и срока службы. Определены основные параметры, влияющие на себестоимость изготовления привода. Предложено математическое выражение для определения себестоимости и анализа рентабельности изготовления привода исполнительного механизма.

Для решения вопроса прогнозирования гарантированного остаточного моторесурса предлагается произвести дальнейшие исследования по определению физического износа в зависимости основных показателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Интернет-ресурс – Свап автомобиля Газель. – [Электронный ресурс]. — https://www.drive2.ru/b/492994076933620109

2 Интернет-ресурс – Выбор двигателя для Свапа. – [Электронный ресурс]. – https://www.drive2.ru/l/3261480

3 **Аймуханов, Д. С., Кадыров, А. С., Сембаев, Н. С., Байгушкарова А. Б., Лукаш Варгула.** Применение «контрактных» автомобильных силовых агрегатов в качестве привода исполнительных механизмов транспортной техники [Текст] // Наука и техника Казахстана. – 2025. – № 1. – С. 298.

3 **Фаттахов, Р. Х.** Компоновка привода общего назначения на сварной раме: методические указания к выполнению курсовых проектов по курсам «Детали машин и основы конструирования», «Детали машин» и «Основы проектирования и конструирования» [Текст]/ Р.Х. Фаттахов, Г.А. Клещарева, В.Г. Ставишенко. Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2010. – 48 с.

4 **Дунаев, П. Ф., Леликов, О. П.** Конструирование узлов и деталей машин: Учеб.пособие для студ. техн. спец. вузов [Текст]. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 496 с.

5 **Шатров, М. Г., Морозов, К. А., Алексеев, И. В.** Автомобильные двигатели : учебник для студ. высш. учеб. заведений [Текст]. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 464 с.

6 **Лянденбурский, В. В., Грабовский, А. А., Белоковыльский, А. М., Салмин, В. В., Аношкин, П. И.** Топливные системы современных и перспективных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие [Текст]. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 324 с.

7 **Габитов, И. И., Грехов, Л. В., Неговора, А. В.** Техническое обслуживание и диагностика топливной аппаратуры автотракторных дизелей: Учебное пособие [Текст]. – Уфа: Изд-во БГАУ, 2008. – 240 с.

8 **Певнев, Н. Г., Елгин, А. П., Бухаров, Л. Н.** Техническая эксплуатация газобаллонных автомобилей [Текст]. – Омск: Изд-во Сибирской гос. автомобильно-дорожной академии, 2010. – 183 с.

9 **Охотников, Б. Л.** Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания : учебное пособие [Текст]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 140 с.

10 **Коршунов, Л. П.** Энергетические установки промысловых судов: Учебник [Текст]. – Л. : Судостроение, 1991. – 360 с.

11 Методика определения стоимости транспортных средств в рамках судебно-экспертного автотовароведческого исследования (утверждена ЦСЭ МЮ РК, протокол № 2 от 20–21 сентября 2018 г.) [Текст] // Министерство юстиции Республики Казахстан РГКП «Центр судебных экспертиз МЮ РК».

12 Закон Республики Казахстан от 4 мая 2010 года № 274-IV «О защите прав потребителей» [Текст].

13 **Ренева, А. Н., Тупицына, О. В.** Методы оценки износа и стоимости деталей, машин, комплексов : учебное пособие [Текст]. – М-во с.-х. РФ, федеральное гос. бюджетное образов. учреждение высшего образов. «Пермский гос. аграрно-технологич. ун-т им. акад. Д. Н. Прянишникова». – Пермь : ИПЦ «Прокростъ», 2018. – 121 с.

14 **Серикова, Е. А., Бажинов, А. В.** Способы адаптивного прогнозирования остаточного ресурса ДВС [Текст] // Вестник ХНАДУ, выпуск 56, 2012 г.

15 **Жданко, Д. А. Тарасенко, В. Е., Непарко, Т. А.** Прогнозирование остаточного ресурса мобильных энергетических средств: учебное пособие [Текст]. – Минск : БГАТУ, 2022. – 280 с.

REFERENCES

1 Online resource - Gazelle car swap. – [Electronic resource]. – https://www.drive2.ru/b/492994076933620109.

2 Online resource – Choosing an engine for Swap. – [Electronic resource]. – https://www.drive2.ru/l/3261480.

3 **Ajmuhanov, D. S., Kadyrov, A. S., Sembaev, N. S., Bajgushkarova A. B., Lukash Vargula.** Primenenie «kontraktnyh» avtomobil'nyh silovyh agregatov v kachestve privoda ispolnitel'nyh mekhanizmov transportnoj tekhniki [The use of «contract» automotive power units as a drive for the actuators of transport equipment] // Nauka i texnika Kazakhstana. – 2025 – № 1. – P. 298.

4 **Fattaxov, R. X.** Komponovka privoda obshchego naznacheniya na svarnoj rame : metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu kursovyh proektov po kursam «Detali mashin i osnovy konstruirovaniya», «Detali mashin» i «Osnovy proektirovaniya i konstruirovaniya» [The layout of a general-purpose drive on a welded frame: guidelines for the implementation of course projects in the courses «Machine parts and fundamentals of design», «Machine parts» and «Fundamentals of design and construction»]/ R. X. Fattaxov, G. A. Kleshhareva, V. G. Stavishenko. Orenburgskij gos. un-t. – Orenburg : OGU, 2010. – 48 p.

5 **Dunaev, P. F., Lelikov, O. P.** Konstruirovanie uzlov i detalej mashin: Ucheb. posobie dlya stud. tekhn. spec. vuzov [Construction of machine components and parts: Textbook.manual for technical students. special universities]. – 8-e izd., pererab. i dop. – Moscow : Izdatel`skij centr «Akademiya», 2004. – 496 p.

6 **Shatrov, M. G., Morozov, K. A., Alekseev, I. V.** Avtomobil'nye dvigateli : uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenij [Automobile engines : a textbook for students. higher. studies. establishments]. – 2-e izd., ispr. – Moscow : Izdatel`skij centr «Akademiya», 2011. – 464 p.

7 **Lyandenburskij, V. V., Grabovskij, A. A., Belokovy`l`skij, A. M., Salmin, V. V., Anoshkin, P. I.** Toplivnye sistemy sovremennyh i perspektivnyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya : ucheb. posobie [Fuel systems of modern and advanced internal combustion engines: a textbook]. – Penza : PGUAS, 2013. – 324 p.

8 **Gabitov, I. I., Grexov, L. V., Negovora, A. V.** Tekhnicheskoe obsluzhivanie i diagnostika toplivnoj apparatury avtotraktornyh dizelej : Uchebnoe posobie [Maintenance and diagnostics of fuel equipment for automotive diesel engines : A textbook]. – Ufa : Izd-vo BGAU, 2008. – 240 p.

9 **Pevnev, N. G., Elgin, A. P., Buxarov, L. N.** Tekhnicheskaya ekspluataciya gazoballonnyh avtomobilej [Technical operation of gas-cylinder cars]. – Omsk : Izd-vo Sibirskoj gos. avtomobil`no-dorozhnoj akademii, 2010. – 183 p.

10 **Oxotnikov, B. L.** Ekspluataciya dvigatelej vnutrennego sgoraniya : uchebnoe posobie [Operation of internal combustion engines : a training manual]. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2014. – 140 p.

11 **Korshunov, L. P.** Energeticheskie ustanovki promyslovyh sudov: Uchebnik [Power installations of commercial vessels: A textbook]. – Leningrad : Sudostroenie, 1991. – 360 p.

12 Metodika opredeleniya stoimosti transportnyh sredstv v ramkah sudebno-ekspertnogo avtotovarovedcheskogo issledovaniya (utverzhdena CSE MYu RK, protokol № 2 ot 20–21 sentyabrya 2018 g.) [Methodology for determining the cost of vehicles in the framework of a forensic automotive research study (approved by the CSE of the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan, Protocol No. 2 dated

September 20-21, 2018)] // Ministerstvo yusticii Respubliki Kazahstan RGKP «Centr sudebnyh ekspertiz MYu RK».

13 Zakon Respubliki Kazahstan ot 4 maya 2010 goda № 274-IV «O zashchite prav potrebitelej» [The Law of the Republic of Kazakhstan dated May 4, 2010 No. 274-IV «On Consumer Rights Protection»].

14 **Reneva, A. N., Tupicyna, O. V.** Metody ocenki iznosa i stoimosti detalej, mashin, kompleksov : uchebnoe posobie [Methods for assessing the wear and cost of parts, machines, complexes : a textbook]. – M-vo s.-x. RF, federal'noe gos. byudzhetnoe obrazov. uchrezhdenie vysshego obrazov. «Permskij gos. agrarno-tekhnologich. un-t im. akad. D. N. Pryanishnikova». – Perm' : IPC «Prokrost», 2018. – 121 p.

15 **Serikova, E. A., Bazhinov, A. V.** Sposoby adaptivnogo prognozirovaniya ostatochnogo resursa DVS [Methods of adaptive forecasting of the remaining life of the internal combustion engine] // Vestnik HNADU, vypusk 56, 2012.

16 **Zhdanko, D. A. Tarasenko, V. E., Neparko, T. A.** Prognozirovanie ostatochnogo resursa mobil'nyh energeticheskih sredstv: uchebnoe posobie [Forecasting the remaining resource of mobile energy resources: a textbook]. – Minsk : BGATU, 2022. – 280 p.

Д. С. Аймұқанов[1], А. С. Қадыров[2], Лукаш Варгула[3], С. М. Аймұқанов[4]
[1,2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
[3]Познань политехникалық университеті, Польша Республикасы, Познань қ.
[4]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

КӘДЕГЕ ЖАРАТЫЛАТЫН КӨЛІКТІҢ КҮШТІК АГРЕГАТТАРЫ НЕГІЗІНДЕ ЖЕТЕКТЕРДІҢ КОНФИГУРАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Көлік техникасының жетектерінде қозғалтқыштар, трансмиссиялар және басқа компоненттер сияқты автомобильдік қуат агрегаттарын қайталама қолдану идеясы күрделі жөндеу немесе жаңа зауыттық жетек агрегатын сатып алу шығындарымен салыстырғанда ресурстарды үнемдеуге және өнімділікті жақсартуға мүмкіндік береді.

Көлік құралдарының агрегаттарын қайталама қолдана отырып, идеяның тиімділігін бағалау үшін бірнеше факторларға талдау жасау қажет, мысалы, қуат агрегаттарының жай-күйі, қол жетімділігі, олардың қажетті жетектермен үйлесімділігі, агрегаттарды бейімдеу немесе жаңарту құны, сондай-ақ өндірістің әлеуетті экономикалық және экологиялық пайдасы.

Мақалада жетектердің мүмкін болатын конфигурацияларын жіктеу ұсынылады, сонымен қатар жиынтық кестеде жетектің қажетті автоматтандырылуына, қосылу әдісіне, орындалуына, басқару әдісіне байланысты ең көп таралған 4 цилиндрлі ішкі жану қозғалтқыштары негізінде жетектердің негізгі түрлері келтірілген. Ұсынылған кесте таңдалған конфигурацияға және жетектің мақсатына байланысты өндіріс шығындарын барынша тиімді есептеуге мүмкіндік береді. Деректерді талдау негізінде, мақсатына байланысты, жетек дизайнының тиімді орындалуын таңдау жасалды, оған сәйкес эксперименттік үлгі жасалды. Кестенің

және әдеби дереккөздердің бастапқы деректерін талдау бастапқы кезеңде кәдеге жаратылатын көліктің свап-жиынтықтары негізінде атқарушы механизмнің жетегін өндірудің рентабельділігі мен тиімділігін есептеуге мүмкіндік беретін экономикалық-математикалық өрнекті анықтады.

Кілтті сөздер: машина жетектері, қуат қондырғылары, свап жинағы, машиналарды жобалау, өндіріс экономикасы.

D. S. Aimukhanov[1], A. S. Kadyrov[2], Lukasz Wargula[3], S. M. Aimukhanov[4]
[1,2]Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda
[3]Poznan Polytechnic University, Poland, Poznań
[4]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

INVESTIGATION OF THE CONFIGURATION OF DRIVES BASED ON POWER UNITS OF RECYCLABLE VEHICLES

The idea of the secondary use of automotive power units, such as engines, transmissions and other components, in the actuators of transport equipment, allows you to save resources and improve performance compared with the cost of major repairs or the purchase of a new factory drive unit.

To assess the effectiveness of the idea with the secondary use of vehicle assemblies, it is necessary to analyze several factors, such as the condition, availability of power units, their compatibility with the required actuators, the cost of adapting or upgrading units, as well as the potential economic and environmental benefits of production.

The article proposes to classify possible configurations of actuators, and the summary table shows the main types of actuators based on the most common 4-cylinder inline internal combustion engines, depending on the required drive automation, connection method, design, and control method. The proposed table makes it possible to calculate production costs as efficiently as possible, depending on the selected configuration and purpose of the actuator. Based on the data analysis, depending on the purpose, a choice was made of an advantageous design of the drive design, according to which the experimental sample was made. An analysis of the initial data in the table and literature sources has determined an economic and mathematical expression that allows calculating the profitability and efficiency of production of an actuator based on swap sets of recyclable vehicles at the initial stage.

Keywords: machine drives, power units, swap assembly, machine design, production economics.

МРНТИ 73.49.99
DOI

Н. К. Булатов[1], *К. Б. Манапов[2], А. Б. Сагатбекова[3], А. О. Беккалиев[4]
[1,3,4]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана
[2]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3721-2280
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9459-8753
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0311-1827
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4672-5611

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ ПРИ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТАХ КОНВЕЙЕРОМ В КРЫТЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

В данной статье выявлена математическая модель построения ситуации по распределению концентрации пыли от ударных факторов при осуществлении погрузочно-разгрузочных операций с крытыми транспортными средствами и груз обладающий пылящий характер, такие как цемент, сухие строительные смеси и мукомольная продукция, расфасованная в мешках. Проведен анализ механизма распределения концентрации пыли и соответствующие факторы воздействия при работе с данным грузом. При проведении данных операций имеются средства защиты для задействованной рабочей силы, но эти средства не создают удобного, комфортного условия работы, так работы ведутся с респираторами, защитными очками или масками, которые забиваются, требуют периодической чистки и т.д. Запыленность также приводит к быстрому износу действующего при погрузке или разгрузке оборудования или перегреву, перегоранию электродвигателей данного оборудования. Следовательно, важно понимать закономерности распределения концентрации пыли при осуществлении данных работ. В этой статье данные исследования основаны на теории подобия и уравнении движения двухфазного потока газ-твердое вещество, учитывающее осуществление погрузочно-разгрузочных операций в крытое транспортное средство ленточным конвейером. Существует шесть основных факторов, влияющих на распределение пыли вокруг ленточного конвейера, такие как направление воздушного потока, средняя скорость воздушного потока, рабочая скорость ленты, влажность в крытом грузовом отсеке транспортного средства, скорость подачи и высота подачи грузов на конвейер и с конвейера.

Ключевые слова: пылящие грузы, ленточный конвейер, погрузочно-разгрузочные операции, крытое транспортное средство, концентрация пыли.

Введение

В процессе погрузочно-разгрузочных работ в крытых транспортных средствах в виде товарных вагонов и автофургонов, полуприцепы седельных тягачей, а также

в контейнерах работа с тарно-штучными грузами, а в особенности с мукомольной продукции и строительных материалов в виде цемента, строительных смесей и другие грузы за тарированные в мешки образовывают большое количество пыли. Пыль образовывается выделением от физического воздействия на грузы, которые поднимаются, опускаются, перемещаются, штабелируются и другие воздействия на мешки с пылевидными товарами. Также чем выше высота падение или скорость падения, тем более сильнее выделяется пыль во внутри кузова транспортного средства. Пыль, естественно, влияет на дыхательную систему человека, которая приводит к пневмокониозу, неизлечимым профессиональным болезням легких и дыхательных органов.

Проведены множества исследований по удалению или уменьшению пыли в производственных процессах предприятий при работе с пыльными видами сырья, в рудниках и шахтах, особенно в добыче угля, цемента. Среди них контроль влажности руды, изоляция источников пыли, усиление вентиляционных систем и внедрение распыления воды, уменьшение разности потенциалов энергии при работе с пылевидными грузами. Данные методы имеют эффект по снижению концентрации пыли, но существующие технологии и управленческие действия недостаточно распространены и не применяются в транспортно- логистических работах, особенно в выполнении погрузочно-разгрузочных операций.

Еще в середине 20 века учеными и инженерами определены закономерности взаимосвязи пыли и воздушного потока, движение и распространение пыли в воздушном потоке и эффект от применения вентиляции по устранению пыли. Определением необходимых условий для движения пыли в воздушном потоке в 1931 году задался советский ученый Скочинский А. А., проведя эксперименты по определению взаимосвязи между движением пыли и скоростью ветра [1]. Затем в 1955 году другой советский ученый Фукс Н. А. издав монографию «Механика аэрозолей» впервые применил термин «аэрозоль» внеся весомый вклад в продвижении исследований по динамике распространения пылевидных веществ. Далее рассматривая скопления частиц в виде псевдожидкости, то есть непрерывным потоком, пылевидные вещества рассматривались как двухфазный поток в виде газотвердого вещества в виде газа. Изучались характеристики осаждаемости вдыхаемых пылей образующиеся на дорогах. В 2002 году австралийцом Уитт и др. [2] построена динамическая жидкостная модель прогнозирования траектории движения пыли в вихревом потоке из передаваемого устройства впервые на компьютере. американские ученые также в 2002 году проведя экспериментальные исследования определили, что скорости частиц опережают скорости газового потока с передачей импульса в пограничных слоях работая в двухфазных потоках твердого тела с угольной пылью со средним диаметром приблизительно 60 мкм. Определена корреляция между распределением частиц пыли по размерам и концентрацией угольной пыли французскими исследователями [3]. Как видим проведены много исследований по определению закономерностей поведения и движения пылевых потоков как зарубежными, так и отечественными учеными,

но еще недостаточно разносторонне учтены факторы влияния и движения пылевидных веществ в процессе нагрузки на них.

В мешковых тарах расфасованные порошкообразные, зерновые, и строительные грузы при погрузочно-разгрузочных операциях в крытых помещениях и в транспортных средствах в связи с тем, что относятся к пылящим грузам создают неблагоприятную обстановку для работающих людей и техники. Если люди при длительной и постоянной работе в данной обстановке получают профессиональные болезни легких и дыхательных путей, то оборудования и техника, задействованная при погрузке и загрузке грузов также подвергаются к процессам быстрого изнашивания. Такие как, например, оседание пыли на электродвигателях приводят быстрее к перегоранию обмотки, при оседании на движущих частях быстрее выводятся из строя подшипники и т.д.

В этой статье на основе исследования распределяемости концентрации пыли вокруг частей ленточного конвейера при погрузке и выгрузке пылящих грузов в крытых транспортных средствах были определены основные эффективные факторы распределения концентрации пыли. Это исследование важно для изучения процесса погрузки и разгрузки пылящих грузов применяя новые технологии, которые помогают контролировать концентрацию пыли в данной среде.

Материалы и методы

Механизм пылеобразования

Для эффективного устранения пыли, иначе говоря преобразование статистическое состояние частиц пыли во взвешенное, необходимо понимать, как функционирует механизм пылеулавливания. Это позволит правильно вести контроль диффузии пыли. Рассмотрим погрузку или разгрузку пылящих мешкотарных грузов в крытые транспортные средства при использовании ленточного конвейера для механизации процесса. Пыль в основном образуется при погрузке падением груза на конвейерную ленту, выгрузке сбросом с конвейерной ленты груза и далее распространяется перемещающейся лентой и движущимися частями конвейера. Кроме того, пыль также может распространяться вибрацией ленты и трением между грузом в мешках с воздушным потоком воздуха. Согласно полевым исследованиям и теоретическому анализу, механизм образования пыли классифицируется следующим образом [4; 5]:

(1) Образование пыли, вызванное сдвигом

Образование пыли может быть вызвано сдвигающим действием между грузом (в мешках) и поверхностью ленты. В процессе погрузочно-разгрузочных работ груз с наиболее позволяемой меньшей высоты по конструкции погрузочного бункера или конструкции конвейерных систем свободно выпадает на поверхность ленты конвейера. Во время этого процесса, частицы пыли исходящие от пылящих грузов сталкиваются с сопротивлением воздушной массы и вызывается сдвигающий эффект. Воздушная масса поднимает частицы пыли и распространяет, образуя потоки рассеивания частиц пыли в воздухе. Эффект взаимного уноса между потоками пыли приводит к постоянному распространению пыли и ее взвешиванию

в воздухе, что полностью распространяет пыль вокруг ленточного конвейера и в полностью в крытом транспортном средстве при погрузочно-разгрузочных операциях.

(2) Образование пыли, вызванное нагнетанием воздуха

Запыление может образовываться от нагнетания воздушных масс от движущихся и крутящих частей. Осевшая пыль на поверхности ленты конвейера, при движении ленты и нагнетаемого воздушной массы от движения частей конвейера заново приподнимается в процессе доставки груза и данный цикл бесконечно не прекращается до полной остановки движения конвейера.

(3) Запыление, вызванное перемещением оборудования

Пыль может образовываться от установки, переустановки и в целом от перемещения оборудования для улучшения позиций оборудования в процессе транспортировки, погрузки и разгрузки грузов. В процессе работы также лента подвержена интенсивному вибрированию от вибрации роликоопор и барабанов. Некоторые мелкие частицы пылящих материалов будут вылетать от поверхности мешка (груза), на который воздействуют вибрационные нагрузки и смешиваются с окружающей средой в закрытом пространстве под действием этих вибраций. Это все приводит к насыщению пыли в рабочем пространстве крытого транспортного средства.

(4) Запыление, вызванное сбросом воздуха

Пыль также может образовываться от сброса воздушной массы. Груз в виде мешка с пылящим материалом будет свободно падать под действием силы тяжести во время передачи через загрузочное устройство на ленточный конвейер. Затем воздушная масса, находящаяся поблизости с таким же следующим грузом, будет выталкиваться и подниматься к поверхности загрузочного устройства (желоба). В этом процессе частицы пыли, содержащиеся в падающих мешкотарах, смешиваются с атмосферой, а затем выбрасываются из желоба загрузки потоком поднимающегося воздуха. Также мешки падающие в свободном падении от конвейерной ленты через устройства выгрузки на поверхность пола или на собираемый кладкой на уже ранее выложенные мешки поднимают частицы пыли от мешков с пылящим материалом на поверхности желоба выгрузки и при прохождении следующей мешкотары пылевая воздушная масса выбрасывается в верх заполняя атмосферу закрытого пространства в зоне погрузки грузов. Таким образом, зоны погрузки и выгрузки грузов ленточного конвейера наиболее насыщены пылью.

Результаты и обсуждение

Построение уравнения движения двухфазных потоков газ-твердое тело

Данные эксперименты по подобию распределения пыли на движущихся частях ленточного конвейера, задействованного в погрузке и/или загрузке крытых транспортных средств, применяется для изучения поведения и распределения пылевого потока в данной среде. Следовательно, следует принимать во внимание как газ, так и пыль. Поскольку воздушный поток является критической силой, вызывающей перемещение пыли, уравнения движения как газа, так и пыли

используются для описания физического явления двухфазных потоков газ-твердое вещество [6; 7; 8].

(1) Уравнение движения пыли

Рассматриваемый пылевой поток над поверхностью и вокруг ленточного конвейера учитываем как не подвергаемый к сжатию вязкий поток в установившемся состоянии. Опишем его как не подвергаемое к сжатию трехмерное уравнение NS:

$$\rho_g \frac{dU_g}{dt} = \vec{F} - P + \mu_g \Delta U_g, \quad (1)$$

ρ_g – плотность пыли, кг/м^3(Н/м^3)
U_g – вектор скорости пыли (м/с),
t – время (с),
$\vec{F}$ – усилие на единицу массы пыли (Н/м),
P – давление воздуха (Па)
μ_g – динамическая вязкость пыли (Па · с)
и Δ – оператор Лапласа соответственно.

(2) Уравнение движения пыли в газе

Делая выводы по анализу действующих сил на частицы пыли, предполагаем, что большинство действующих сил невелико и, следовательно, ими можно пренебречь, кроме сопротивления воздуха, сил тяжести и плавучести. В этом случае, уравнение движения пыли представляется в следующем виде:

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{dU_g}{dt} = \frac{\pi}{8} C_d d_p^2 \rho_g \left(U_g - U_p\right)\left|U_g - U_p\right| + \frac{\pi}{6} d_p^3 \left(\rho_p - \rho_g\right) g, \quad (2)$$

где d_p – диаметр частицы пыли (м),
ρ_p – плотность частицы пыли (кг/м),
C_d – коэффициенты аэродинамического сопротивления,
U_p – скорость частицы пыли (м/с)
и g – ускорение свободного падения (м/с2) соответственно.

Ввод чисел подобия

В закрытом пространстве (т.е. без воздействия внешних нагузок как ветер и др.) движение газа и пыли выражается уравнениями (1) и (2). В данной ситуации рассматривается 10 физических размерных параметров, включая ρ_g, ρ_p, U_g, U_p, μ_g, d_p, g, l, t, P и L длина (м).

Учитывая, проводимый размерный анализ, выявляем семь следующих чисел подобия выраженные в формулах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Числа подобия по 7 критериям выраженные в формулах

Критерий Стокса	$S_{tk} = \frac{d_p^2 \rho_p \left\|\vec{U}_g - \vec{U}_p\right\|}{l \mu_g}$
Промежуточный критерий	$H_o = \frac{\vec{U}_g t}{l}$,
Критерий Фронда	$Fr = \frac{\vec{U}_g}{\sqrt{gl}}$
Критерий Рейнольдса	$Re = \frac{l \rho_g \vec{U}_g}{\mu_g}$
Критерий плотности	$\frac{\rho_p}{\rho_g}$,
Критерий перемещения	$\frac{\vec{U}_p}{\vec{U}_g}$
Критерий Эйлера	$Eu = \frac{\vec{P}}{\rho_g \vec{U}_g^2}$

Из этих семи чисел подобия критерий Эйлера так как является запрограммированным числом подобия нами будет проигнорирован.

Учитывая, что условия потока однозначны, вместе с ним геометрические и физические условия (ρ_g, μ_g, g), а также на входе и выходе распределенности скоростей воздушного потока с числом геометрического подобия ($\delta_l = D/L$), число движения частиц по критерию Рейнольдса

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g \left|U_g - U_p\right|}{\mu_g},$$

с выведением относительной шероховатости поверхности (Δ/D).

Следовательно, при проведении эксперимента экспортируется в общей сложности девять независимых значений критерия подобия, по следующим критериям:

$$S_{tk}, H_o, Fr, Re, \frac{\rho_p}{\rho_g}, \frac{U_p}{U_g}, \delta_l, Re_p, \frac{\Delta}{D}.$$

Упрощение чисел подобия

В процессе планирования экспериментов ограниченность масштаба измерений является значительной проблемой, это особенно заметно при

создании физических моделей реальных объектов или процессов. Связь здесь зависит от идеального соблюдения всех критериев подобия (геометрического, кинематического, динамического и т.д.). Что часто является невозможным из-за ограничений по размерам, времени, материалам и технологиям. В результате, для успешного планирования и проведения экспериментов необходимо использовать приближенные модели, адаптированные под конкретные условия исследования.

При эксперименте с приближенными моделями важно учитывать следующие моменты:

Выбор масштабности с учетом критериев подобия: на начальном этапе задаемся определением, параметров и переменных критически важных для исследования и как провести выбор масштабности более адекватно. Для этого проводится выбор основных безразмерных критериев (например, числа Рейнольдса, Фруда, Маха и т.д.), которые содействуют в сохранении ключевых аспектов физических процессов в модели [9; 10; 11; 12].

Анализ ошибок и их минимизация: использование приближенных моделей требует тщательного анализа потенциальных источников ошибок для их минимизации. При измерении, улучшении методов обработки данных и математических методов для коррекции результатов могут использоваться специализированное оборудование.

Итеративный подход: При подвержении приближенных моделей к экспенименту, его планирование и проведение требует итеративного подхода. Модель кооректируется и уточняется на основе полученных данных, что обеспечивает более точное соответствие реальным условиям.

Подход компьютерным моделированием: Современные технологии и программное обеспечение для компьютерного моделирования и численных расчетов могут существенно помочь в планировании экспериментов и анализе данных. Данное моделирование удобно для провеедения предварительных расчетов, оптимизировании параметров модели и даже в проведении виртуальных экспериментов для получения подтверждений гипотез.

Комбинирование разных методов: для получения наиболее точных и надежных результатов иногда используются комбинация различных методов исследования, с включением теоретического анализа, численного моделирования и физических экспериментов на приближенных моделях.

Эксперименты с приближенными моделями планируются с глубоким пониманием исследуемых процессов, внимательным подходом к выбору методов исследования и готовности к постоянному анализу и корректировке методики в зависимости от получаемых результатов.

Экспериментальные исследования при применении подхода упрощения задачи и критериев подобия процессов, связаны с перемещением пылевых частиц малого размера в газовой среде, представляется обоснованным в контексте заданных условий. Учитывая, что гравитационное поле не оказывает заметного влияния на мелкие частицы и скорость движения частиц почти равна скорости движения

газа ($\frac{U_p}{U_g} \approx 1$), а также учитывая стабильность состояния аналогичной модели и прототипа, действительно можно сосредоточиться на упрощенном наборе критериев подобия.

Рассмотрим упомянутые выше критерии подобия:

S_{tk} – этот критерий, относителен к степени турбулентности или специфическому параметру, который характеризует состояние течения в контексте эксперимента. Правильное определение и измерение данного параметра, гарантирует соответствие между моделью и прототипом.

δ_l – наиболее часто применяется при определении граничного слоя или параметра, связанного с изменением локальных свойств течения. Этот параметр позволяет учитывать влияние поверхностей и геометрии на движение частиц.

Re_p – число Рейнольдса учитывающее вязкостные и инерционные силы, которые действуют на частицы. Прототип и модель в одной и той же области числом Рейнольдса указывает на подобие режимов течения, которое воссоздает точности экспериментальных результатов.

Δ/D – этот параметр может относиться к отношению характерного размера изменения (например, диаметра частицы). Параметр имеет важность для учета влияния размера частиц на их поведение в течении.

Фокус на эти четыре параметра, может учитывать основные физические процессы, происходящие в системе, и обеспечить подобие между моделью и прототипом при анализе взаимодействия между газовой фазой и твердыми частицами в условиях, когда другие воздействия (такие как гравитация) не играют решающей роли. Данное упрощение позволяет учитывать ключевые аспекты исследования и упростить анализ результатов.

Нахождение Re модели и прототипа в контуре одной и той же области, дает при рассмотрении Re аналогичное значение. Груз в виде мешков, заполненных пылящими материалами (такие как цемент, мука, строительные смеси и т.д.), используемые в этом эксперименте, загружается или выгружается в крытое грузовое транспортное средство в перевалочных пунктах, терминально-логистических комплексах, складах хранения груза, поэтому параметр $\frac{\rho_p}{\rho_g}$ может быть вполне удовлетворительным. Учитывая выше выявленную ситуацию, рассматриваемые критерия подобия вполне упрощаются до четырех параметров S_{tk}, δ_l, Re_p, Δ/D.

Создание аналогичной модели для проезжей части ленточного конвейера

Выбор масштаба

Для создания аналогичной модели с геометрическими параметрами $C_l = l : l' = 2 : 1$ и условиями $\rho_g = \rho'_g$, $\mu_g = \mu'_g$, $l_g = l'_g$, устанавливаем, что скорость газа в модели (U'_g) должна быть вдвое больше, чем скорость пыли в прототипе (U'_g), чтобы сохранить одинаковое число Рейнольдса в обеих системах.

Это означает, что модель и прототип работают в аналогичных режимах течения, что критично для обеспечения подобия экспериментальных и реальных условий.

Рассмотрим расчет более подробно:

Для числа Стокса S_{tk}, которое определяется как $S_{tk} = \frac{d_p^2 \rho_p |U_g - U_p|}{l\mu_g}$,

установим, что при условиях $\rho = \rho'$, $l = 2l'$, $U' = 2U$, диаметр частиц d должен удвоиться $(d = 2d')$, чтобы сохранить подобие условий для модели и прототипа.

С учетом того, что $U_g' = 2U_g$ и используя формулу для числа Рейнольдса

$$Re = \frac{l\rho_g U_g}{\mu_g}$$

чтобы поддерживать одинаковое число Рейнольдса для модели и прототипа, увеличим линейные размеры в два раза $(l = 2l')$ и скорость в два раза $(U' = 2U)$, что позволяет сохранить динамическое подобие между моделью и прототипом. Это важно, поскольку число Рейнольдса является критическим параметром для описания режима течения: ламинарного или турбулентного. Указанное число Рейнольдса, превышающее 2300, говорит о том, что течение в системе турбулентное, что необходимо учитывать при анализе движения пылящего материала при проведении погрузочно-разгрузочных операций в закрытом пространстве.

Таким образом, подход к установлению условий подобия позволяет адекватно моделировать поведение пылящих материалов во время погрузочно-разгрузочных операций на железнодорожных тупиках, учитывая особенности течения воздушных потоков и движения частиц в газе в ограниченном пространстве.

Следовательно, жидкость находится в полностью турбулентном состоянии, которое находится в области квадрата сопротивления. Согласно экспериментам Никурадзе, движение жидкости аналогично в области квадрата сопротивления, пока силы одинаковы. Этот факт указывает на то, что скорость ветра необязательно должна удовлетворять условиям подобия, упомянутым выше. Следовательно, требуется только разработать модель в соответствии с критерием геометрического подобия.

Выводы

Данное исследование показало, что решения по распределяемости концентрации пыли вокруг частей ленточного конвейера при погрузке и выгрузке пылящих грузов в крытых транспортных средствах определение основных эффективных факторов распределения концентрации пыли зависит от построения уравнения движения двухфазных потоков газ-твердое тело. Данное построение уравнения выстраивается определением уравнение движения пыли, вводом чисел подобия с дальнейшим упрощением их. Затем выстраивается созданием аналогичной модели для проезжей части ленточного конвейера, путем

выбора масштаба с сохранением одинакового числа Рейнольдса для системы сохраняя динамическое подобие между моделью и прототипом. Данный подход к установлению условий подобия позволяет адекватно моделировать поведение пылящих материалов во время погрузочно-разгрузочных операций на в закрытых транспортных средствах, учитывая особенности течения воздушных потоков и движения частиц в газе в ограниченном пространстве.

Это исследование важно для изучения процесса погрузки и разгрузки пылящих грузов применяя новые технологии, которые помогают контролировать концентрацию пыли в данной среде.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Скочинский А. А.** Новые угольные шахты и проблемы вентиляции, требующие научного исследования // Уголь. – 1931. – № 71. – С. 1–4.

2 **Witt P. J., Carey K. G., Nguyen T. V.** Prediction of dust loss from conveyors using computational fluid dynamics modeling // Applied Mathematical Modelling. – 2002. – Vol. 26. – № 2. – P. 297–309. – https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00062-2

3 **Silvester S. A., Lowndes I. S., Kingman S. W.** The ventilation of an underground crushing plant // Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. – 2004. – Vol. 113. – Issue 4. – P. 201–214. – https://doi.org/10.1179/037178404225007091

4 **Bhaskar R., Ramani R. V., Jankowski R. A.** Experimental studies on dust dispersion in mine airways // Mining Engineering. – 1988.– Vol. 40. – № 3. – P. 191–195.

5 **Laigna K. Y.** Solution of diffusion problems in mine aerology // Soviet Mining Science. – 1979. Vol. 15, № 1. – P.121–129.

6 **Courtney W. G., Cheng L., Divers E. F.** Deposition of Respirable Coal Dust in an Airway, US Bur of Mines, Pittsburgh. – 1986. – 20 p.

7 **Descamps I., Harion J., Baudion B.** Taking-off model of particles with a wide size distribution // Chemical Engineering and Processing. – 2005. – Vol. 44, № 2. – P. 159–166. – https://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2004.04.007

8 **Wang P., Feng T., Liu R.** Numerical simulation of dust distribution at a fully mechanized face under the isolation effect of an air curtain // Mining Science and Technology (China). – 2011. – Vol. 21, Issue 1. – P. 65 – 69. – https://doi.org/10.1016/j.mstc.2010.12.001

9 **Gang Z. and et al.** Research on dust dispersion law of fully mechanized mining faces under different inclinations and tracking closed dust control method // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12, Article № 16633. – https://doi.org/10.1038/s41598-022-20606-9

10 **Renaud Ansart and et al.** Dust emission by powder handling: Comparison between numerical analysis and experimental results // Powder Technology. – 2009. – Vol. 190 (1–2). – P. 274–281. – https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.053.hal-01680757

11 **Zhen L. and et al.** Research on the mechanism of coal wall fragmentation and dust production characteristics in the perspective of differentiated discrete elements // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article № 9312. – https://doi.org/10.1038/s41598-024-60192-6

12 **Posner J. D., Buchanan D., Dunn-Rankin D.** Measurement and prediction of indoor air flow in a model room // Energy Build. – 2003. – Vol. 35. – P. 515–526. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00163-9

REFERENCES

1 **Skochinskij A. A.** Novye ugol'nye shahty i problemy ventilyacii, trebuyushchie nauchnogo issledovaniya // Ugol' [New coal mines and ventilation problems requiring scientific research // Coal]. – 1931. – № 71. – P. 1–4.

2 **Witt P. J., Carey K. G., Nguyen T. V.** Prediction of dust loss from conveyors using computational fluid dynamics modeling // Applied Mathematical Modelling. – 2002. – Vol. 26. – № 2. – P. 297–309. – https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00062-2

3 **Silvester S. A., Lowndes I. S., Kingman S. W.** The ventilation of an underground crushing plant // Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. – 2004.– Vol. 113, Issue 4. – P. 201–214. – https://doi.org/10.1179/037178404225007091

4 **Bhaskar R., Ramani R. V., Jankowski R. A.** Experimental studies on dust dispersion in mine airways // Mining Engineering. – 1988.– Vol. 40. – № 3. – P.191–195.

5 **Laigna K. Y.** Solution of diffusion problems in mine aerology // Soviet Mining Science. – 1979. Vol. 15. – № 1. – P.121–129.

6 **Courtney W. G., Cheng L., Divers E. F.** Deposition of Respirable Coal Dust in an Airway, US Bur of Mines, Pittsburgh. – 1986. – 20 p.

7 **Descamps I., Harion J., Baudion B.** Taking-off model of particles with a wide size distribution // Chemical Engineering and Processing. – 2005. – Vol. 44. – № 2. – P. 159–166. – https://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2004.04.007

8 **Wang P., Feng T., Liu R.** Numerical simulation of dust distribution at a fully mechanized face under the isolation effect of an air curtain // Mining Science and Technology (China). – 2011. – Vol. 21. – Issue 1. – P. 65–69. – https://doi.org/10.1016/j.mstc.2010.12.001

9 **Gang Z. and et al.** Research on dust dispersion law of fully mechanized mining faces under different inclinations and tracking closed dust control method // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Article № 16633. – https://doi.org/10.1038/s41598-022-20606-9

10 **Renaud Ansart and et al.** Dust emission by powder handling: Comparison between numerical analysis and experimental results // Powder Technology. – 2009, Vol. 190 (1–2). – P. 274–281. – https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.053.hal-01680757

11 **Zhen L. and et al.** Research on the mechanism of coal wall fragmentation and dust production characteristics in the perspective of differentiated discrete elements // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article №. – 9312. – https://doi.org/10.1038/s41598-024-60192-6

12 **Posner J. D., Buchanan D., Dunn-Rankin D.** Measurement and prediction of indoor air flow in a model room // Energy Build. – 2003. – Vol. 35. – P. 515–526. – https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00163-9

Н. Қ. Болатов[1], *Қ. Б. Манапов[2], А. Б. Сагатбекова[3], А. О. Беккалиев[4]

[1,3,4]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық
зерттеу университеті, Астана қ.

[2]Л. Н. Гумилев атындағы Евразия ұлттық университеті, Астана қ.

ЖАБЫҚ КӨЛІК ҚҰРАЛДАРЫНДА КОНВЕЙЕРМЕН ТИЕУ-ТҮСІРУ ЖҰМЫСТАРЫ КЕЗІНДЕ ШАҢ КОНЦЕНТРАЦИЯСЫН МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада жабық көлік құралдарымен тиеу-түсіру операцияларын жүзеге асыру кезінде соққы факторларынан шаң концентрациясын бөлу бойынша жағдайды құрудың математикалық моделі және цемент, құрғақ құрылыс қоспалары және қаптарға оралған ұн тарту өнімдері сияқты шаңды сипаттағы жүк анықталды. Осы жүкпен жұмыс істеу кезінде шаң концентрациясын бөлу механизміне және тиісті әсер ету факторларына талдау жүргізілді. Осы операцияларды жүргізу кезінде жұмыс күшіне арналған қорғаныс құралдары бар, бірақ бұл құралдар ыңғайлы, икемді жұмыс жағдайын жасамайды, сондықтан жұмыс респираторлармен, бітеліп қалған көзілдіріктермен немесе маскалармен жүргізіледі, мезгіл-мезгіл тазалауды қажет етеді және т. б. шаңдану сонымен қатар жабдықты тиеу немесе түсіру кезінде жұмыс істейтін жабдықтың тез тозуына немесе қызып кетуіне, электр қозғалтқыштарының жануына әкеледі. Сондықтан, осы жұмыстарды орындау кезінде шаң концентрациясының таралу заңдылықтарын түсіну маңызды. Бұл мақалада зерттеу деректері ұқсастық теориясына және газдың екі фазалы ағынының қозғалыс теңдеуіне негізделген қатты зат -таспалы конвейермен жабық көлікте тиеу-түсіру операцияларын жүзеге асыру жағдайын ескереді. Таспалы конвейердің айналасындағы шаңның таралуына әсер ететін алты негізгі фактор бар, мысалы, ауа ағынының бағыты, ауа ағынының орташа жылдамдығы, таспаның жұмыс жылдамдығы, көлік құралының жабық жүк қоймасындағы ылғалдылық, жеткізу жылдамдығы және конвейерге және конвейерден жүк беру биіктігі.

Кілтті сөздер: шаң басатын жүктер, таспалы конвейер, тиеу-түсіру операциялары, жабық көлік құралы, шаң концентрациясы.

N. K. Bulatov[1], *K. B. Manapov[2], A. B. Sagatbekova[3], A. O. Bekkaliev[4]
[1]Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana
[2]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana

MODELING OF DUST CONCENTRATION DURING CONVEYOR LOADING AND UNLOADING OPERATIONS IN COVERED VEHICLES

This article identifies a mathematical model for constructing a situation on the distribution of dust concentration from impact factors during loading and unloading operations with covered vehicles and cargo with a dusty character, such as cement, dry building mixes and flour products packaged in bags. The analysis of the mechanism of dust concentration distribution and the corresponding impact factors when working with this cargo is carried out. During these operations, protective equipment is available for the workforce involved, but these tools do not create a convenient, comfortable working environment, as work is carried out with respirators, goggles or masks that become clogged, require periodic cleaning, etc. Dustiness also leads to rapid wear of equipment operating during loading or unloading or overheating, burning out of electric motors of this type. equipment. Therefore, it is important to understand the patterns of dust concentration distribution during these operations. In this article, these studies are based on the theory of similarity and the equation of motion of a two-phase gas-solid flow, which takes into account the implementation of loading and unloading operations in an indoor vehicle by a belt conveyor. There are six main factors that affect the dust distribution around the conveyor belt, such as the direction of air flow, the average air flow velocity, the working speed of the belt, humidity in the covered cargo compartment of the vehicle, the feed rate and the height of the cargo to and from the conveyor belt.

Keywords: dusty cargo, conveyor belt, loading and unloading operations, covered vehicle, dust concentration.

МРНТИ 73.31.00
DOI

М. Б. Бурьян[1], Е. Ф. Дыбов[2], Р. М. Алтынбеков[3], *Н. С.Камзанов[4]
[1,2,3]Пограничная академия КНБ Республики Казахстан,
Республика Казахстан г. Алматы
[4]Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1174-6400
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9323-0070
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-4730-2448
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2420-8362
e-mail: n.kamzanov@satbayev.university

РАЗРАБОТКА ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОГРАНИЧНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХРАНЫ ГОСГРАНИЦЫ

Статья является двенадцатой публикацией в рамках реализации программы «Разработка прототипа модернизированной пограничной машины для повышения эффективности выполнения служебно-боевых задач по охране Государственной границы Республики Казахстан», финансируемой Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR218010/0223).

В статье раскрывается и обосновывается необходимость и концепт разработки прототипа многофункциональной пограничной машины для повышения эффективности выполнения задач по охране Государственной границы в рамках концепта «Умная граница» и создания мобильных, эффективных сил реагирования Пограничной службы КНБ РК. Раскрывается идея разработки второго опытного образца специальной пограничной машины.

Перед Пограничной службой КНБ Республики Казахстан (далее – ПС) стоит задача по повышению эффективности охраны Государственной границы, которая будет способна противостоять разнообразным угрозам и вызовам в пограничном пространстве на другом качественном уровне.

Добиться решения данной задачи без исследования и применения инновационных технологий весьма затруднительно. Поэтому одним из актуальных аспектов рассмотрения путей повышения эффективности охраны границы является внедрение концепта «умная граница» в деятельность подразделений, создание мобильных и эффективных сил реагирования ПС. Для эффективной его реализации немаловажную роль играет разработка линейки транспортных средств и средств повышения мобильности подразделений ПС, непосредственно охраняющих Государственную границу.

Ключевые слова: концепт «умная граница», инфраструктура, задачи, транспортное средство, средство повышения мобильности, линейка транспортных средств.

Введение

Угрозы, возникающие в результате противоправной деятельности трансграничных преступных сообществ в пограничном пространстве Республики Казахстан, имеют системный, а иногда и непредсказуемый (инновационные) характер. Данное явление приобретает организованный и устойчивый характер, а также сопровождается высоким технологическим и техническим оснащением.

Материалы и методы

Анализа охраны границы зарубежными странами [1] показал что, в настоящее время не существует какой-то одной «универсальной» модели охраны границы которая полностью подошла бы для нашего государства, но существующие модели объединяет то, что все применяют современные инновации, адаптируя их под свои нужды, отходя от «советской модели» охраны границы, в которой основным фактором было применение большого количества людских резервов и техники для создания барьеров (и обеспечения режимов на границе и приграничной территории.

Подтверждением необходимости перехода к новым началам также являются слова первого президента Республики Казахстан Н.А. Назарбаева в Послании народу Казахстана «Стратегия-2050»: новый политический курс состоявшегося государства»: Суть экономической политики нового курса – всеобъемлющий экономический прагматизм. Фактически, это кардинальная ломка наших сегодняшних взглядов и подходов…», «Необходимо провести масштабную реформу Пограничной службы. Задача – кардинально повысить эффективность её деятельности, модернизировать материально-техническую базу» [2], а также вышесказанное было отмечено Президентом Республики Казахстан – Верховным главнокомандующего Касым-Жомартом Токаевым на Всеармейском совещании [3].

Решение данной ситуации есть, но оно должно внедрятся в жизнедеятельности поэтапно на основе результатов междисциплинарных исследований, НИОКР и ОКР.

В настоящее время мы часто применяем дефиницию «мобильность», что же оно означает? «Мобильность» — это хорошо зарекомендовавший себя инструмент, который можно применять для повышения оперативности и эффективности выполнения задач сотрудниками пограничных ведомств по противодействию и пресечению противоправных действий.

Результаты и обсуждение

Существующие в настоящее время подходы к обеспечению и укомплектованию автомобильной техникой и средствами повышения мобильности пограничных подразделений, непосредственно охраняющих Государственную границу, не позволяют в полной мере адекватно реагировать на все изменения обстановки. Причиной видится следующее: состоящие и принятые на вооружение транспортные средства, которые являются гражданскими и коммерческими образцами автомобильной промышленности, а разнообразность марок и производителей не имеет унификации и достаточного запаса прочности, а отсутствие на

вооружении (либо в ограниченных количествах) средств повышения мобильности создает непреодолимый разрыв и отставание от деятельности и оснащённости правонарушителей, кроме того устаревание тактики действий пограничников и их мобильности от тактики действий нарушителей, не позволяют качественно выполнять задачи по охране Государственной границы.

На современном этапе организации охраны государственной границы задача для начальника пограничного отделения (заставы) по применению транспортных средств в служебной деятельности должна сводиться к рациональному применению имеющихся в штате транспортных средств, а также поддержания их в исправном состоянии для немедленного реагирования на обстановку, сложившуюся в результате противоправной деятельности на участке ответственности. Поэтому решение данного вопроса должно быть инновационным, учитывающим современные новаторские идеи.

В настоящий момент многие полагают, что в штате пограничной заставы должны присутствовать только легковые и грузовые транспортные средства, которые должны выполнять только возложенную на них конструктивную функцию при выполнении задач по охране границы и обеспечения деятельности подразделения, но это мнение считаем ошибочным.

Разработка линейки транспортных средств, которое должно не только объединять воедино все имеющиеся транспортные средства применяемые в охране границы, но и позволить существенно расширить мобильные возможности людского ресурса, выполняющего задачи по охране границы, а также изменить тактику и организацию деятельности подразделений ПС.

Анализ зарубежного и отечественного опыта применения транспортных средств в охране Государственной границы [1, с.4] позволяет сделать вывод, что на сегодняшний день не существует какого-либо универсального способа охраны границы с использованием специально разработанной линейки машин, которую возможно применять на всех разнообразных участках границы. Исходя из этого, наиболее эффективная охрана границы будет обеспечиваться только при комплексном применении всей «линейки» транспортных средств взаимодополняющих друг друга в рамках концепта «Умная граница».

Заместитель Председателя КНБ РК – Директор ПС генерал-майор Алдажуманов Е. Е. в интервью газете «Егемен Казахстан» сказал: «Так называемая «умная граница» подразумевает применение технических средств охраны границы» [4].

Вопросы комбинированного или комплексного применения сил и средств, а также их развитие в охране Государственной границы рассматривались зарубежными ученным В. А. Дмитриевым [5], Т. А. Акименко, Е. Ф. Филиповым [6], но в их исследованиях затронуты только отдельные аспекты применения технических средств охраны границы, при этом вопросы комплексного применения они затрагивают частично.

В пункте 61 Военной доктрины Республики Казахстан указано [7]:

«Основными мерами по обеспечению надежной охраны (защиты) Государственной границы являются:

3) оснащение Пограничной и Авиационной служб КНБ РК современным вооружением и военной техникой, техническими средствами охраны границы;

4) приведение инфраструктуры Государственной границы в соответствие ее категорированию и современным требованиям;

6) интеграция объектов информационно-коммуникационной инфраструктуры Пограничной службы КНБ РК;

7) реализация концепта «умная граница» и создание мобильных и эффективных сил реагирования Пограничной службы КНБ РК».

В ходе выполнения работ в рамках реализации государственного заказа по выполнению НИР «Разработка прототипа модернизированной пограничной машины для повышения эффективности выполнения служебно-боевых задач по охране Государственной границы Республики Казахстан», и проведения испытаний разработанного опытного образца МПМ (рабочее название – «Көшпенді») в комплексе со средствами повышения мобильности и мотовездеходами, а так же анализа потребности практики охраны Государственной границы, в настоящий момент, назрел вопрос по дополнению комплекса высокомобильным, скоростным и безопасным транспортным средством, с возможностью унификации с разработанным опытным образцом модернизируемой пограничной машины, а так же соблюдением условий модернизации существующего парка.

В производстве гражданской автомобильной техники для различных обслуживающих служб сегодня популярно предлагать линейку машин, что же это означает? Под этой терминологией понимается такое понятие как «унификация системы обслуживания, эта линейка создана для того, чтобы упростить обслуживание той или иной отрасли деятельности людям. Благодаря «линейке машин» рутинные задачи больше не приносят раздражения и не вызывают усталость у сотрудников службы».

Одним из направлений по поиску решения проблемы, обозначенной выше, является проведение исследования по разработке опытного образца многофункциональной пограничной машины (рабочее название – «Кайсар»), оборудованной для выполнения задач как самостоятельно, так и в комплексе с вышеописанными транспортными средствами и способной изменить качество несения службы пограничников по охране Государственной границы [8].

Модернизация существующего парка обусловлена наличием достаточного количества автомашин высокой проходимости, предназначенных в основном для доставки (перевозки) личного состава и грузов. В настоящее время остро назрела необходимость изменения класса техники с грузопассажирского на многофункциональный, который будет способен выполнять наиболее широкий спектр функциональных задач защиты и охраны Государственной границы Республики Казахстан как самостоятельно, так и в комплексе с уже разрабатываемыми транспортными средствами.

Следует отметить, что в настоящее время автомобильный парк Пограничной службы применяет автомобили марки КАМАЗ 4326. В тоже время практики, проходящие службу в подразделениях, выражают неудовлетворение его габаритным

характеристикам и функциональным возможностям. Анализ опросов практиков указывает на необходимость и востребованность в многофункциональном транспортном средстве имеющем габаритные характеристики снятого с вооружения автомобиля ГАЗ-66, в то же время способного к перевозке в комфортных условиях до 8 человек и определенный объем полезного груза, приэтом обладающего высокой маневренностью и малым радиусом разворота для безопасной эксплуатации в горных условиях, а так же имеющего достаточно высокие скоростные и маневренные характеристики при сохранении повышенной проходимости.

Учитывая требования, предъявляемые к пограничным машинам (грузовым автомобилям-фургонам) из парка машин, применяемых в Вооруженных силах РК, других войсках и воинских формированиях целесообразно предложить для модернизации в многофункциональную пограничную машину грузовые автомобили на базе «КАМАЗ-4326». В виду того, что у данной модели есть ряд преимуществ, которые ставят её на эту позицию. Во-первых, эта машина по своим техническим характеристикам наиболее близка к требованиям, озвученным практиками, а во-вторых, количество автомобилей этой модели имеется в достаточном количестве в парках ПС КНБ РК и, в-третьих, в Казахстане имеется предприятие СРКП ТОО «КАМАЗ», которое имеет опыт в проведении модернизации опытного образца модернизированной пограничной машины и способно создать инновационный образец КУНГа (кузова-фургона или дубль-кабины). СРКП ТОО «КАМАЗ», является официальным дилером ПАО «КАМАЗ» в Казахстане, которое имеет соответствующую лицензию от завода изготовителя на внесение конструктивных изменений.

Реализация модернизации опытного образца многофункциональной пограничной машины для соответствия готового изделия требованиям к концептуальной линейки машин на базе КАМАЗ-4326 нами видится следующим образом:

– модернизация шасси, путем уменьшения колесной базы до 3690 мм, что позволит максимально приблизить размеры колесной базы к размерам базы ГАЗ-66, сократить радиус разворота машины, повысить ее маневренность на дороге и уменьшить габариты;

– разработка и изготовление кузова-фургона, в виде дубль-кабины с двумя распашными дверями, открывающимися вперед, по ходу движения машины, для обеспечения перевозки в нем в любых погодных и климатических условиях до 5 человек, оперативного их спешивания по обе стороны машины, отдыха части наряда при длительном несении службы, с его монтажом за кабиной шасси;

– разработка и изготовление крытой грузовой платформы с каркасом безопасности, заниженным полом, приспособленной для перевозки технических средств охраны и других грузов, и имеющую оборудование для перевозки пассажиров в виде откидных боковых и складного среднего сидений, с монтажом за дубль-кабиной;

– разработка и изготовление силового каркаса безопасности, выполняющего функции багажника для кабины шасси, и кузова-фургона.

На основе исследования зарубежного [9,10] и отечественного опыта эксплуатации и применения военной и специальной автомобильной техники, определены следующие наиболее оптимальные технические характеристики и комплектации опытного образца многофункциональной пограничной машины, разрабатываемого для линейки транспортных средств:

– высокая проходимость, запас прочности шасси и маневренность машины (действий пограничников, т.е. соответствующая колесная база с кабиной, дополнительным и специальным оборудованием, грузовой платформой, а также наличием средств повышения проходимости);

– кузов-фургон (дубль-кабина) должен обеспечивать: совместное передвижение до 5 пограничников в соответствии с требованиями, предъявляемыми к безопасной перевозке людей и доставке и грузов; быстрое и оперативное их спешивание как с левой, так и с правой стороны машины; комфортное несение службы (применения средств живучести экипажа) и отдыха пограничников сроком более 8 часов;

– обеспечение безопасности личного состава при движении к месту несения службы и преследовании правонарушителей путем монтажа силового каркаса безопасности;

– экологичность и экономичность (иметь нейтрализатор, обеспечивающий сокращение вредных выхлопов двигателя и уменьшения расхода топлива);

– отход от зависимости поставок иностранного производителя и унификация парка (переход к отечественному производителю), применение одно марочной системы обеспечения по принципу made in KZ.

Опытный образец предлагаемой модели, позволит решать ряд задач в комплексе в различных климатических и физико-географических условиях как самостоятельно, так и в комплексе с разрабатываемой линейкой машин, приведенные выше характеристики подразумевают относительно небольшие габариты и массу опытного образца многофункциональной модернизированной пограничной машины, его маневренность и подвижность, высокие скоростные характеристики как на дорогах, так и на пересеченной местности с сохранением повешенной проходимости машины.

На основе проведенного анализа отечественного парка грузовых машин ПС КНБ РК предложена в качестве базового шасси для модернизации и производства опытного образца многофункциональной специальной пограничной машины базовое шасси крупнотоннажного грузового автомобиля повышенной проходимости КАМАЗ-4326 (рисунок 1).

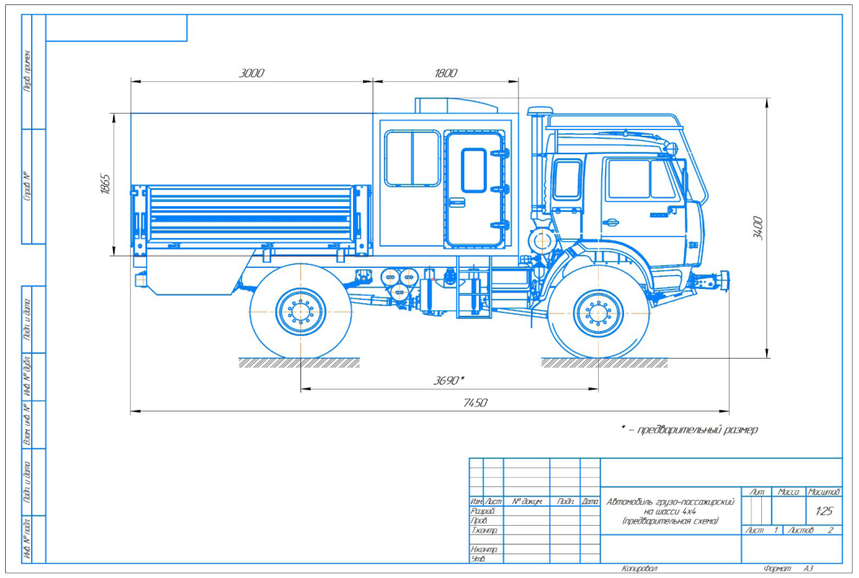


Рисунок 1 – Внешний вид опытного образца многофункциональной пограничной машины

Относительно создания мобильных и эффективных сил реагирования Пограничной службы в настоящее время в Пограничной академии разработано тактико-техническое задание на производство опытного образца многофункциональной пограничной машины (рабочее название – «Кайсар»), совместно с СРКП ТОО «КАМАЗ» произведен опытный образец, планируется провести его испытания в комплексе с опытным образцом МПМ, в целях определения способности опытного образца обеспечить совместную перевозку личного состава, современных технических средств охраны границы (ТСОГ), его мобильность, способность обеспечить комфортные условия несения службы пограничного наряда (до 8 человек) в полевых условиях, автономность, повысить мобильные и оперативные способности по задержанию правонарушителей в пограничном пространстве.

Разработанный и испытуемый опытный образец многофункциональной пограничной машины позволит осуществлять безопасную перевозку личного состава (доставку к месту несения службы), в том числе и совместно с ТСОГ, обеспечить безопасное и комфортное несение службы (обнаружение, преследование и задержание правонарушителей), качественный отдых пограничников в отрыве от места постоянной дислокации на срок более 8 часов.

Результаты испытаний будут представлены в последующих публикациях.

Информация о финансировании

Данная статья публикуется в рамках реализации проекта «Разработка прототипа модернизированной пограничной машины для повышения эффективности выполнения служебно-боевых задач по охране Государственной границы Республики Казахстан», финансируемой Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR218010/0223).

Выводы

Таким образом, есть основания полагать что создание и внедрение в подразделения всех уровней Пограничной службы линейки транспортных средств в рамках концепта концепт «Умная граница», создание мобильных и эффективных сил реагирования позволит изменить качество деятельности подразделений Пограничной службы: уменьшатся человеческие трудозатраты в непосредственной охране границы; уменьшится расход ТМЦ и моторесурсов; охрана границы будет осуществляться в режиме «24/7»; повыситься скорость реагирования на правонарушения, оперативность их пресечения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Тютявин, А. Д., Молдазым, Н. М., Алтынбеков, Р. М., Салий, С. М., Бурьян, М. Б., Тютенов, К. К.** Многофункциональный специальный пограничный автомобиль: опыт разработки и применения [Текст] // Вестник Национальной гвардии. – 2022. – № 4 (46). – С. 76–80.

2 Стратегия «Казахстан-2050» - новый политический курс состоявшегося государства // Послание Президента Республики Казахстан – Лидера нации Н.А.Назарбаева. – 2012. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.zakon.kz/ (дата обращения: 05.02.2025).

3 Всеармейское совещание с участием Верховного главнокомандующего Касым-Жомарта Токаева – 2023. [Электронный ресурс]. – URL: www.akorda.kz (дата обращения: 05.01.2025).

4 «Умная граница», безопасность, защита пограничников: интервью с Директором Погранслужбы КНБ. – 2022. [Электронный ресурс] – URL: Tengrinews.kz (дата обращения: 04.01.2025).

5 **Дмитриев, А. В.** Основы применения технических средств наблюдения Пограничных войск. Институт повышения квалификации офицерского состава[Текст]: учеб. / М.: ГУ ПВ КГБ СССР, 1991. – 288 с.

6 **Акименко, Т. А., Филиппова, Е. В.** Программно-аппаратная реализация модуля контроля разрешения тепловизионных систем наблюдения [Текст] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 36–41.

7 Указ Президента Республики Казахстан от 12 октября 2022 года № 1045 «О внесении изменений и дополнений в Указ Президента Республики Казахстан от 29 сентября 2017 года №554 «Об утверждении Военной доктрины Республики Казахстан». – 2022. [Электронный ресурс] – URL: https://www.zakon.kz/ (дата обращения: 04.01.2025).

8 **Усиков, В. Ю.** «Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах». [Текст] // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Челябинск, 2015. – 167 с.

9 Новая китайская патрульная машина для пограничных войск. – 2021. [Электронный ресурс] – URL: https://dambiev.livejournal.com/2079841.html?utm_source=embed_post. (дата обращения 18.11.2023).

10 Специальная пограничная машина «Ратник». – 2020. [Электронный ресурс] – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU142616U1_20140627. (дата обращения: 02.07.2023).

REFERENCES

1 **Tyutyavin, A. D., Moldazym, N. M., Altynbekov, R. M., Salij, S. M., Bur'yan, M. B., Tyutenov, K. K.** Mnogofunkcional'nyj special'nyj pogranichnyj avtomobil': opyt razrabotki i primeneniya [Multifunctional special border vehicle : development and application experience] [Text] // Vestnik Nacional'noj gvardii. – 2022. – №4 (46). – P. 76–80.

2 Strategiya «Kazaxstan-2050» - novy`j politicheskij kurs sostoyavshegosya gosudarstva // Poslanie Prezidenta Respubliki Kazaxstan – Lidera nacii N. A. Nazarbaeva. – 2012. [Strategy «Kazakhstan-2050» - a new political course of the established state] [Electronic resource]. – URL: https://www.zakon.kz/ (data obrashheniya: 05.02.2025).

3 Vsearmejskoe soveshhanie s uchastiem Verxovnogo glavnokomanduyushhego Kasy`m-Zhomarta Tokaeva – 2023. [All-Army meeting with the participation of Supreme Commander Kassym-Jomart Tokayev] [E`lektronny`j resurs]. – URL: www.akorda.kz (data obrashheniya: 05.01.2025).

4 «Umnaya granicza», bezopasnost`, zashhita pogranichnikov: interv`yu s Direktorom Pogransluzhby` KNB. – 2022. [«Smart border», security, protection of border guards: interview with the Director of the National Security Committee Border Service] [Electronic resource] – URL: Tengrinews.kz (data obrashheniya: 04.01.2025).

5 **Dmitriev, A. V.** Osnovy primeneniya tekhnicheskih sredstv nablyudeniya Pogranichnyh vojsk. Institut povysheniya kvalifikacii oficerskogo sostava [Fundamentals of the use of technical means of surveillance of Border troops] [Tekst]: ucheb. / M.: GU PV KGB SSSR, 1991. – 288 p.

6 **Akimenko, T. A., Filippova, E. V.** Programmno-apparatnaya realizaciya modulya kontrolya razresheniya teplovizionnyh sistem nablyudeniya [Hardware and software implementation of the resolution control module for thermal imaging surveillance systems] [Text] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2020. – № 2. – P. 36–41.

7 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazaxstan ot 12 oktyabrya 2022 goda № 1045 «O vnesenii izmenenij i dopolnenij v Ukaz Prezidenta Respubliki Kazaxstan ot 29 sentyabrya

2017 goda №554 «Ob utverzhdenii Voennoj doktriny` Respubliki Kazaxstan». – 2022. [Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated October 12, 2022 No. 1045 «On Amendments and Additions to Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated September 29, 2017 No. 554 «On Approval of the Military Doctrine of the Republic of Kazakhstan»] [Electronic resource] – URL: https://www.zakon.kz/ (data obrashheniya: 04.01.2025).

8 **Usikov, V. Yu.** «Povy`shenie proxodimosti avtomobilej mnogocelevogo naznacheniya putem decentralizacii regulirovaniya davleniya vozduxa v shinax». [«Improving the cross-country capability of multi-purpose vehicles by decentralizing tire pressure regulation»] [Text] // Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk. – Chelyabinsk, 2015. – P. 167.

9 Novaya kitajskaya patrul`naya mashina dlya pogranichny`x vojsk. – 2021. [New Chinese patrol car for border troops] [Electronic resource] – URL: https://dambiev.livejournal.com/2079841.html?utm_source=embed_post. (data obrashheniya 18.11.2023).

10 Special`naya pogranichnaya mashina «Ratnik». – 2020. [Special border guard vehicle «Ratnik»] [Electronic resource] – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU142616U1_20140627. (data obrashheniya: 02.07.2023).

М. Б. Бурьян[1], Е. Ф. Дыбов[2], Р. М. Алтынбеков[3], *Н. С. Камзанов[4]
[1,2,3]Қазақстан Республикасы ҰҚК Шекара академиясы,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[4]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

МЕМЛЕКЕТТІК ШЕКАРАНЫ ҚОРҒАУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН КӨПФУНКЦИОНАЛДЫ ШЕКАРА МАШИНАСЫНЫҢ ТӘЖІРИБЕЛІК ҮЛГІСІН ӘЗІРЛЕУ

Мақала «Қазақстан Республикасы Мемлекеттік шекарасын қорғау жөніндегі қызметтік-жауынгерлік міндеттерді тиімді орындауға арналған жаңғыртылған шекаралық машинаның прототипін әзірлеу» бағдарламасын іске асыру аясында жарияланған он екінші жарияланым болып табылады. Бұл бағдарлама Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылады (BR218010/0223).

Мақалада Мемлекеттік шекараны қорғау жөніндегі міндеттерді тиімді орындау үшін көпфункционалды шекаралық машинаның прототипін әзірлеу қажеттілігі мен тұжырымдамасы негізделіп, «Ақылды шекара» концепциясы аясында ҚР ҰҚК Шекара қызметінің мобильді және тиімді әрекет ету күштерін құру идеясы ашып көрсетіледі. Сондай-ақ арнайы шекаралық машинаның екінші тәжірибелік үлгісін әзірлеу идеясы баяндалады.

Қазақстан Республикасы Ұлттық қауіпсіздік комитетінің Шекара қызметінің (бұдан әрі – ШҚ) алдында Мемлекеттік шекараны қорғау тиімділігін жаңа сапалы деңгейге көтеру, шекаралық кеңістікте туындайтын әртүрлі қатерлер мен қауіп-қатерлерге қарсы тұру қабілетін арттыру міндеті тұр.

Бұл міндетті инновациялық технологияларды зерттеп, қолданбай шешу мүмкін емес. Сондықтан шекара күзеті тиімділігін арттыру жолдарын қарастырудың өзекті аспектілерінің бірі – «ақылды шекара» концепциясын бөлімшелердің қызметіне енгізу және ШҚ-ның мобильді, тиімді әрекет ету күштерін құру болып табылады. Бұл тұжырымдаманы тиімді жүзеге асыруда Мемлекеттік шекараны тікелей күзететін ШҚ бөлімшелерінің мобильділігін арттыруға арналған көлік құралдары мен жабдықтар желісін әзірлеу маңызды рөл атқарады.

Кілтті сөздер: «ақылды шекара» тұжырымдамасы, инфрақұрылым, міндеттер, көлік құралы, мобильділікті арттыру құралы, көлік құралдарының желісі.

M. B. Buryan[1], E. F. Dybov[2], R. M. Altynbekov[3], N. S. Kamzanov[4]
[1,2,3]Border Academy of the National Security Committee of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan
[4]Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE MULTIFUNCTIONAL BORDER GUARD VEHICLE TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS OF STATE BORDER PROTECTION

This article is the twelfth publication within the framework of the implementation of the program "Development of a Prototype of a Modernized Border Vehicle to Enhance the Efficiency of Operational and Combat Tasks in the Protection of the State Border of the Republic of Kazakhstan," funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (BR218010/0223).

The article outlines and justifies the necessity and concept of developing a prototype of a multifunctional border vehicle to improve the effectiveness of border protection tasks within the "Smart Border" concept and the creation of mobile and efficient response forces for the Border Service of the National Security Committee of the Republic of Kazakhstan (NSC RK). It also presents the idea of developing a second experimental model of a special border vehicle.

The Border Service of the NSC of the Republic of Kazakhstan (hereinafter referred to as the BS) faces the challenge of increasing the efficiency of state border protection, capable of countering various threats and challenges in the border space on a qualitatively new level.

Achieving this goal is extremely difficult without research and the application of innovative technologies. Therefore, one of the relevant aspects of improving border security is the integration of the "Smart Border" concept into the operations of border units, as well as the development of mobile and effective BS response forces. The successful implementation of this concept heavily depends on the development of a range of vehicles and mobility-enhancing tools for the BS units directly responsible for protecting the State Border.

Keywords: «Smart Border» concept, infrastructure, tasks, vehicle, mobility enhancement tool, vehicle lineup.

ҒТАМР 73.29.11
DOI

***А. Б. Забиева[1], Ж. Р. Алипбаев[2], Г. Н. Байгужина[3],**
А. Е. Тойлыбаев[4], А. Б.Сагатбекова[5]
[1,2,3]Л. Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Астана қ.
[4]М.Тынышбаев атындағы Көлік және логистика академиясы, Алматы қ.
[5]С.Сейфуллин атындағы Қазақ агртотехникалық университеті, Астана қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8089-3693
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1163-8929
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9181-9186
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9623-7778
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0311-1827
*e-mail: zabiyeva_ab@enu.kz

ЕКІ СЕКЦИЯЛЫ ХОППЕР ВАГОННЫҢ ЖҰМЫС ЖАҒДАЙЫНДА ТІРЕК ҚҰРЫЛЫМНЫҢ БЕРІКТІГІН ТАЛДАУ

Әр түрлі жүктерді бір уақытта тасымалдау мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін хоппер вагонының құрылымын жақсарту ұсынылады. Жақсарту тік қабырға мен көлденең байланыстырушы белдіктер арқылы өзара әрекеттесетін жеке бөлімдер есебінен шанақты екіге бөлуден тұрады. Екі секциялы хоппер вагонның құрылымдық беріктігін анықтау үшін, SolidWorks Simulation бағдарламасында соңғы элементтер әдісін қолдану арқылы есептелді.

Зерттеу нәтижелері хоппер вагонның максималды жүктелуі бірінші құрылымдық режимде (соққы) болатынын көрсетті. Дегенмен, алынған кернеулер рұқсат етілген 30% -дан төмен болды. Вагон динамикасының көрсеткіштерін есептеу үшін модельдеу жүргізілді. Барлық алынған динамикалық көрсеткіштер рұқсат етілген шекті нәтижелерде болды. Хоппер вагонын халықаралық қатынастардағы теміржол паромдарында тасымалдау кезінде тізбекті бекіту үшін агрегаттарды пайдалану ұсынылады. Хоппер вагонының тірек құрылымының динамикалық жүктемесін зерттеу математикалық модельдеу арқылы жүргізілді. Хоппер вагонының тірек құрылымына беріктік талдау жүргізілді. Хоппер вагонының конструкциясындағы кернеулер нормативтік мәндерден аспайтыны анықталды. Зерттеу нәтижелері теміржол көлігінің тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Сонымен қатар, жұмыс нәтижелері заманауи вагон құрылымын жасауда, соның ішінде халықаралық қатынаста пайдалы болуы мүмкін екені сөзсіз.

Кілтті сөздер: көлік механикасы; хоппер вагоны; екі секциялы вагон; заманауи вагон құрылымы; вагонды тиеу; теміржол көлігінің тиімділігі.

Кіріспе

Көлік салалары арасындағы бәсекелестік орта инновациялық жылжымалы құрам құру қажеттілігіне әкеледі [1; 2; 3]. Вагондардың жүк көтергіш құрылымдарына ерекше назар аудару керек, өйткені олар өз салмағының көп бөлігін құрайды. Хоппер вагондары өнеркәсіптік қондырғыларда ыстық түйіршіктер мен агломераттарды тасымалдау үшін қолданылады. Вагонның соңғы қабырғалары белгілі бір бұрышта орналасқан, бұл жүктің гравитациялық қасиеттерін қолдана отырып, оны түсіруге мүмкіндік береді. Бұл вагонды жауын-шашыннан қорғауды қажет етпейтін жүктерді тасымалдау үшін де пайдалануға болады. Бұл ретте вагон бір мезгілде бір түрдегі жүктерді тасымалдауды жүзеге асыра алады, бұл тасымалдаудың тиімділігін төмендетеді.

Сонымен қатар, бұл вагонның құрылымы теміржол паромдарында тасымалдауға бейімделмеген, бұл оны халықаралық теміржол-су тасымалы кезінде қауіпсіз пайдалануға мүмкіндік бермейді.

Сондықтан хоппер вагонын пайдаланудың тиімділігі үшін олар тасымалдайтын жүктердің номенклатурасын кеңейту, сондай-ақ оларды тек магистральдық желілерде ғана емес, сонымен қатар халықаралық құрама жүктерді тасымалдауда да пайдалану мақсатында олардың тірек құрылымдарын жетілдіру маңызды. Сондықтан осы бағытта зерттеулер жүргізу өзекті болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Жұмыста [4] беріктікті қамтамасыз ету үшін 19-9862 үлгісіндегі хоппер вагонының жүк көтергіш құрылымын жетілдіру жүргізілді. Сонымен қатар, соңғы тік және ортаңғы бағандардың функциясын көлбеу соңғы қабырғаның көлденең бұрыштық орналасуымен күшейту ұсынылды.

Хоппер вагондарының қызмет ету мерзімін ұзартудың негіздемелері мақалада [5] келтірілген. Зерттеу 19-6930 үлгісіндегі хоппер вагонының мысалында жүргізілді. Алайда, авторлар оның жұмысының тиімділігін арттыру үшін хоппер вагонының тірек құрылымын жаңартуға назар аударmады.

«The Greenbrier Companies» компаниясы әзірлеген хоппер вагонының инновациялық құрылымының ерекшеліктері мақалада келтірілген [6]. Ұсынылған вагон корпусын түсіру автоматты жүйенің көмегімен 30 с-та жүзеге асырылды. Жүк ағынының жылдамдығын реттеуге болады. Алайда, бұл вагон жоғары температуралы жүктерді теміржол арқылы тасымалдауға бейімделмеген.

Жұмыстар [7; 8] жүк вагондарының перспективалық құрылымдарын жасауға арналды. Авторлар вагондардың кеңістіктік модельдерін және олардың беріктігін талдау нәтижелерін ұсынды. Бұл ретте вагондардың осы құрылымдары жүктердің бекітілген номенклатурасын тасымалдауға бейімделді, бұл олардың тасымалдау нарығында сұранысын азайтты.

Композиттік панельдерден жасалған жүк вагонының құрылым ерекшеліктері басылымда көрсетілген [9]. Вагон шанағының бөлшектерінің коррозиялық тозуын азайту үшін оларды коррозияға қарсы материалдармен жабу ұсынылды. Сонымен қатар, ыстық түйіршіктерді тасымалдау үшін хоппер вагонына ұсынылған модернизацияны қолдану қызығушылық тудырды.

Жұмыста [10] хоппер вагонының шанағын жақсарту үшін құрылымның негізгі элементтері ретінде дөңгелек құбырларды пайдалану ұсынылды. Беріктікті талдау нәтижелері келтірілген. Алайда, хоппер вагонының ұсынылған құрылымы оған бір уақытта әртүрлі жүк түрлерін тасымалдауға мүмкіндік бермеді. Яғни, вагон жоғары мамандандырылған және жүктің белгілі бір түрін тасымалдауға арналған, бұл оның пайдалану қажеттілігін төмендетеді.

Мақалада [11] дөңгелек құбырлар түріндегі тірек элементтері бар хоппер вагонының біріктірілген (сочлененный) түрін пайдалануға беру негіздері көрсетілген. Хоппер вагонының тірек құрылымын анықтау нәтижелері оны жобалау кезінде қабылданған шешімдердің орындылығын растады. Алайда, вагонның ұсынылған құрылымы бір уақытта әр түрлі жүк түрлерін бір бөлімде тасымалдауға мүмкіндік бермеді.

Жұмыста [12] полимерлі композициялық материалдарды пайдалана отырып, хоппер вагондарын жасау үшін вакуумдық инфузия процесін әзірлеу және оңтайландыру қарастырылды. Зерттеу 19-5167 үлгісіндегі хоппер вагонына қатысты жүргізілді. Корпус пен шатыр элементтерінде полимерлі композициялық материалдарды қолдану негізделген.

Басылымда функционалды «ұялы секциялық сэндвич панельдерін» қолдана отырып, хоппер вагонының құрылымын оңтайландыру мәселесі қарастырылған [13]. Ұсынылған әдіс хоппер вагонының материал сыйымдылығын прототиппен салыстырғанда 16 %-дан астамға төмендетуге мүмкіндік бергені анықталды. Алайда, ұсынылған хоппер вагондарының конструкциялары оларға әр түрлі жүктерді бір уақытта тасымалдауға мүмкіндік бермеді, бұл олардың пайдалану тиімділігін төмендетті.

Вагон жасауда перспективалы материалдарды пайдалану ерекшеліктері жұмыста көрсетілген [14]. Вагон шанағын құрайтын престелген элементтер оңтайландыру алгоритмін қолдана отырып жасалған. Сандық модельдеу нәтижелері ұсынылған.

Алюминий панельдерден жасалған теміржол вагоны шанағының құрылымы басылымда қарастырылған [15]. Бұл ретте құрылымдық оңтайландыру қолданылды. Ұсынылған шанақ дизайны оның массасын төмендетуге мүмкіндік берді. Алайда, вагондардың бұл конструкциялары жүктердің әртүрлі түрлерін бір уақытта тасымалдау мүмкіндігін қамтамасыз етпеді.

Вагон корпусының дизайнын жеңілдету, оның салмағын азайту және механикалық қасиеттерін жақсарту үшін авторлар басылымда сэндвич панельдерін Профильді парақпен ауыстыруды ұсынды. Вагон шанағының қаттылығы модальды талдау арқылы бағаланды. Ұсынылған панельдер вагон шанағының салмағын типтік құрылыммен салыстырғанда 600–700 кг-ға төмендетуге мүмкіндік бергені анықталды.

Жұмыста торлы өзегі бар көп қабатты құрылымдарды көп масштабты жобалау әдістемесі енгізілді [17]. Вагонды жобалау кезінде Солтүстік Америка стандарттары қолданылды. Дегенмен, ұсынылған вагон конструкциялары бір уақытта әртүрлі жүк түрлерін тасымалдауға мүмкіндік бермеді.

Вагондардың жүк көтергіш құрылымдарының, оның ішінде өзінің нормативтік пайдалану ресурсын сарқып алған хоппер вагондарының беріктігі жұмыста есептелген. Зерттелген жүк көтергіш құрылымдардың қызмет ету мерзімін ұзартуға болатындығы анықталды.

Жүктердің берілген номенклатурасын тасымалдау үшін вагондардың тірек құрылымдарын жаңғырту ұсынылды. Алайда, есептеулер бойынша авторлар пайдалану кезінде вагондардың тірек құрылымдарына әсер етуі мүмкін жылу жүктемелерін ескермеген.

Магистральдық желілерде де, теміржол-теңіз көлігімен тасымалдау кезінде де пайдалануға қабілетті вагондардың тірек құрылымдарын жасау негіздері жұмыста қарастырылды. Зерттеу платформалық вагон үшін жүргізілді. Алайда, авторлар хоппер вагонының жүк көтергіш құрылымын теміржол паромдары үшін техникалық бейімдеуге, атап айтқанда палубада сенімді бекітуге арналған құрылымдық элементтердің болуына назар аударылмады.

Вагон шанағының беріктігін есептеу басылымда жүргізілді. Вагон тораптарында ақаулардың пайда болуының негізгі себептері талданды. Вагонның тірек құрылымын жақсарту бойынша іс-шаралар ұсынылды.

Жұмыста BCNHL жүк вагонының құрылымын талдау (үлкен сыйымдылығы және салмағы аз жабық вагон) жүргізілді. BCNHL вагоны оралған жүктерді (цемент, тыңайтқыш, астық және т.б.) тасымалдауға арналған. Алайда, ұсынылған құрылымдық жетілдірулер осы вагондарда әр түрлі жүк түрлерін бір уақытта тасымалдау мүмкіндігіне ықпал еткен жоқ.

Вагонға жүктемені анықтау нәтижелері жұмыста ұсынылды. Бұл зерттеуді жүргізу кезінде авторлар нормативтік мәндермен шектелді. Вагонның тірек құрылымының беріктігін модельдеу нәтижелері келтірілген. Алайда, бұл вагон жоғары температуралы жүктерді тасымалдауға бейімделмеген.

Келесі жұмыста жетілдірілген вагонның беріктігіне талдау жасалды. Соққы жүктемелері кезінде алынған вагон кернеуіне қатысты қорытындылар жасалды.

Композиттік панельдерді пайдалану арқылы жүк вагонын модернизациялау мүмкіндігін талдау жұмыста жүргізілді. Вагонның тірек конструкциясы үшін ұсынылатын енгізудің орындылығы негізделген. Алайда бұл жұмыста жүк тасымалының тиімділігін арттыру үшін вагонды жаңғырту қарастырылмаған.

Басылымда жүк вагонын жаңарту кезінде сэндвич панельдерін пайдаланудың негіздемесі келтірілген. Жаңғыртудың артықшылықтары мен оны вагондарда одан әрі дамыту перспективалары атап өтілді.

Жұмыста әртүрлі жұмыс режимдерінде вагондардың негізгі түрлерін жүктеу анықталды. Өзінің нормативтік ресурсын сарқып алған жүк вагондарын одан әрі пайдалану негіздемесі берілді. Алайда, бұл вагондардың құрылымдары жоғары мамандандырылған және оларға бір уақытта әртүрлі жүк түрлерін тасымалдауға мүмкіндік бермеді.

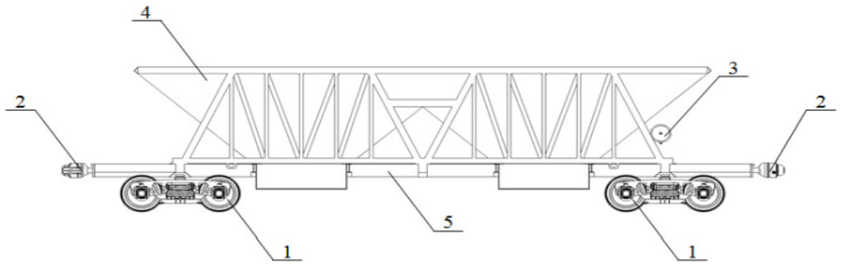
Буын үлгісіндегі вагондарды пайдалануға беру негіздемесі басылымда қарастырылды. Вагондардың динамикалық жүктемесі мен беріктігін анықтау нәтижелері ұсынылды. Дегенмен, ұсынылған вагондарға техникалық қызмет

көрсету үдерісі олардың дизайн ерекшеліктеріне байланысты пайдалану қиындықтарын тудырды.

Әдебиеттерге шолу хоппер вагондарының дизайнын жетілдіру мәселелері өте өзекті деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олар одан әрі дамуды қажет етеді.

Нәтижелер және талқылау

Әр түрлі жүк түрлерін бір уақытта тасымалдау мүмкіндігін қамтамасыз ету есебінен хоппер вагонын пайдалану тиімділігін арттыру мақсатында оның құрылымынын жетілдіру ұсынылады. Бұл шешім денені тік қабырға мен көлденең байланыстырушы таспалар арқылы бір-бірімен әрекеттесетін екі бөлек бөлікке бөлуден тұрады (сурет. 1).

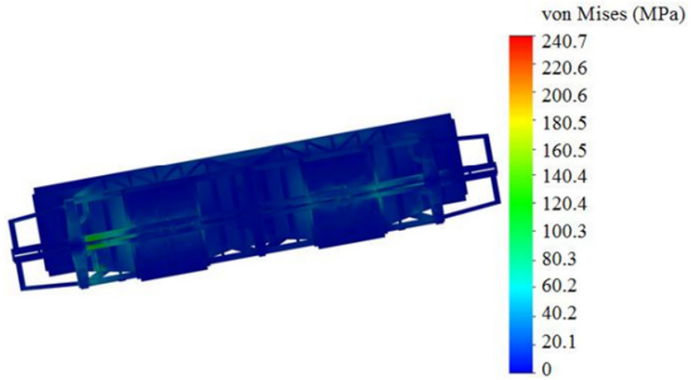


1-сурет– Екі секциялы хоппер вагон: 1 – шасси модулі;
2 – автоматты біріктіру модулі; 3 – тежеу жабдығының модулі;
4 – корпус модулі; 5 – жақтау (рама) модулі

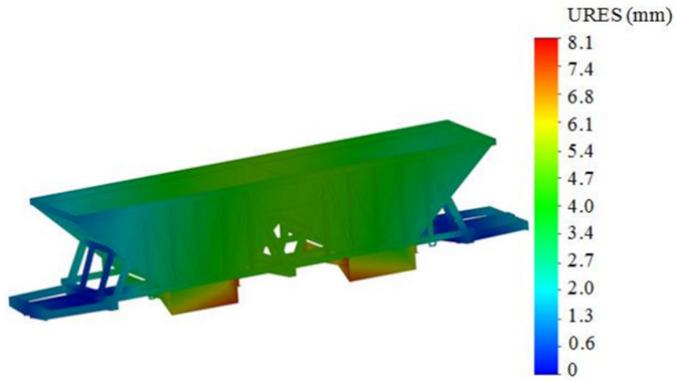
Жақтаудың қаттылығын арттыру үшін бөлімдер тірелген жерлерде орталық бөлікке қораптың ортаңғы арқалығы орнатылды. Бөлімдер тек жақтаудың консоль бөліктерінде ғана емес, сонымен қатар ортаңғы бөлігінде де тірелгендіктен, онда кернеулер мен қозғалыстардың жоғарылауы байқалды. Сондықтан 6 арқалықты орнату арқылы жақтаудың қаттылығын арттыруға бағытталған шешім ұсынылды. Бұл вагон құрылымына патенттік өтінім берілді.

Бұл ретте «Укрспецвагон» кәсіпорнында салынған 20-9749 үлгісіндегі хоппер-вагон прототип ретінде таңдалды. Жақсартылған хоппер вагоны секцияларының пайдалы көлемі 41 м^3 құрайды. Вагонның ені 3154 мм және рамалық арқалықтардың ұзындығы 13500 мм. Вагонның негізі 7800 мм. Вагонның бейнесі 4-суретте көрсетілген.

Екі секциялы хоппер вагонының беріктігін анықтау үшін SolidWorks Simulation соңғы нәтижелер әдісін қолдана отырып есептеу жүргізілді. Зерттеудің бірінші бастапқы кезеңінде есептеу бірінші режим (әсер ету) үшін жүргізілді (2 сурет). Хоппер вагонының соңғы-элементті моделі изопараметрлік тетраэдрлермен жасалды (3 сурет).



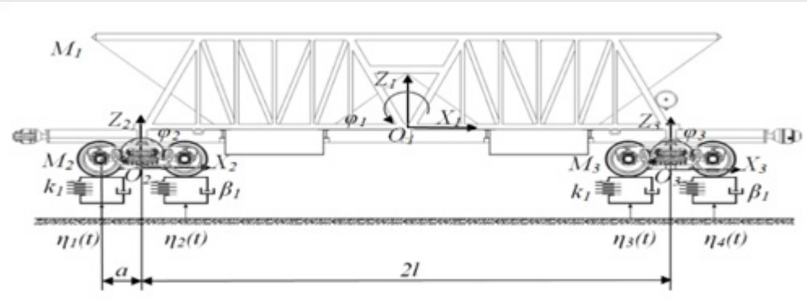
2-сурет – Хоппердің кернеулі күйі



3-сурет – Хоппер вагонының түйіндеріндегі орын ауыстырулар

Бұл жағдайда тор кернеудің ықтимал концентрациясы аймақтарында автоматты тығыздауды ескере отырып жасалды. Осылайша, тор модельге қатысты біркелкі болмады.

Екі секциялы хоппер вагонының тік жүктемесін анықтаудың мақсаты динамиканың негізгі көрсеткіштерін нормаланғандармен салыстыру арқылы оның қозғалыс барысын бағалау болып табылады. Хоппер вагонының тік жүктемесін анықтау үшін математикалық модельдеу жүргізілді. Модель хоппер вагонының тік жазықтықтағы келтірімдік және бұрыштық қозғалыстарын сипаттайды, өйткені ол түйіспелі соққылар бойымен қозғалады. Бұл жағдайда рельс жолы серпімді және тұтқыр болып саналады. Есептеу схемасы 2-суретте көрсетілген. Вагон бос күйінде қозғалатыны ескерілді.



4-сурет – Есептеу схемасы

Модельде 18-100 арбалардың техникалық сипаттамалары ескерілді.

$$M_1 \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = F_{FR}(\eta + \eta_1)$$

мұндағы M_1 хоппер вагонының инерция коэффициенттері (шанақ және екі арба); C1,1-тербелмелі жүйе компоненттерінің серпімділігінің сипаттамасы, Н/м; F_{FR}-дюймде пайда болатын үйкеліс күші / м; және ω-дюймде пайда болатын үйкеліс күші, м;

Есептеу кезінде жүк тиелген вагонның жүк көтергіш құрылымының салмағы шамамен 730 кН, ал арбалардың салмағы (18-100 моделі) 47 кН екендігі ескерілді. Серіппелі аспалардың (подвеска) қаттылығы 8000 кН/м, ал салыстырмалы үйкеліс коэффициенті 0,1 болды. Шынжыр табанның қаттылығы 100 000 кН/м, демпферлік коэффициенті 200 кН/м. кедір - бұдырлық амплитудасы 0,01 м, кедір - бұдырлық ұзындығы 3 м және кедір - бұдырлар арасындағы қашықтық 25 м болды.

Математикалық модельдің шешімі MathCad бағдарламасында Рунге-Кутта әдісін қолдану арқылы орындалды.

$$M_1 \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} q_1 + C_{1,3} q_3 + C_{1,5} q_5 = -F_{FR}(\Delta_1 + \Delta_2)$$

$$M_2 \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} q_2 + C_{2,3} q_3 + C_{2,5} q_5 = F_{FR} l(\Delta_1 + \Delta_2)$$

$$M_3 \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} q_{1,2} + C_{3,2} q_3 + C_{3,3} q_3 + B_{3,3} \frac{d}{dt} q_3 = F_{FR}\Delta_1 + k_1(\eta_1 + \eta_2) + \beta_1(\frac{d}{dt}\eta_1 + \frac{d}{dt}\eta_1)$$

$$M_5 \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} q_1 + C_{5,2} q_5 + C_{5,5} q_5 + B_{5,5} \frac{d}{dt} q_5 = F_{FR}\Delta_2 + k_1(\eta_3 + \eta_4) + \beta_1(\frac{d}{dt}\eta_3 + \frac{d}{dt}\eta_4)$$

$$M_6 \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} q_1 + B_{6,6} \frac{d}{dt} q_6 = -k_1 a(\eta_3 - \eta_4) + \beta_1 a(\frac{d}{dt}\eta_3 + \frac{d}{dt}\eta_4)$$

$$\Delta_1 = sign\left(\frac{d}{dt}\eta\sigma_1\right), \Delta_2 = sign\left(\frac{d}{dt}\eta\sigma_2\right)$$

мұндағы M_1–M_6 – хопер вагонының инерциялық коэффициенттері (шанақ және екі батпақ); масса үшін бұл коэффициенттер t-мен өлшенеді; және инерция моменттері үшін – $t \cdot m^2$; Cij-тербелмелі жүйе компоненттерінің серпімділігінің сипаттамасы, кY/м; βij-шашырау функциясы; a-арбаның доңғалақ базасының жарты ұзындығы, кН · с/м; l-вагонның жартылай негізі, м; σ-тербелмелі жүйе компоненттерінің серпімділігінің сипаттамасы. серіппелі суспензияның Серпімді Элементтерінің деформациясы, м; η-теміржол жолының кедір-бұдырлығы, м; qi-жалпыланған координаттар; ki-батпақтардың серіппелі суспензиясының қаттылығы, кн/м; βi-демпферлік Коэффициент, кН ·с/м; ал FFR-серіппелі жинақта пайда болатын үйкеліс күші, кН.

Бастапқы қозғалыстар мен жылдамдықтар нөлге тең болды. Алынған динамика көрсеткіштері рұқсат етілген мәндер шегінде болды. Масса центріндегі тірек құрылымына әсер ететін үдеулер 5,2 м/с^2 (0,53 г) болды, ал раманың шанаққа тіреу аймақтарындағы үдеу 8,4 м/с^2 болды (0,86 г). Арбалардың серіппелі ілгектеріне әсер ететін күштер 42,7 кН құрады. Тік динамика коэффициенті 0,6 болды.

Қорытынды

1 Негізгі пайдалану режимдерінде екі секциялы хоппер вагонының беріктігіне есептеу жүргізілді. Хоппер вагонындағы максималды кернеулер бірінші есептеу режимінде пайда болды (соққы) және 240,7 МПа құрады, бұл рұқсат етілгеннен 30 % төмен. 700°С температурада жүк тасымалдауды ескере отырып, екі

секциялы хоппер вагонының жылу есебі жүргізілді. Осылайша, ұсынылған вагон құрылымының беріктігі қамтамасыз етілді.

2 Екі секциялы хоппер вагонының тік жүк көтергіштігі анықталды. Масса орталығындағы тірек құрылымына әсер ететін үдеулер 5,2 м/с2 құрады. Тік динамиканың коэффициенті 0,6 болды. Вагонның қозғалысы «жақсы» деп бағаланды.

3 Теңіз тасымалы кезінде екі секциялы хоппер вагонының жүктемесі зерттелді. Хоппер вагонының тірек құрылымына әсер ететін жалпы үдеу 2,4 м/с2 (0,24 г) құрады.

Екі секциялы хоппер вагонының беріктігі есептелді. Максималды кернеулер 312,3 МПа болды және бекіту түйінінде пайда болды. Алайда, алынған кернеу мәндері нормативтен аспады және олардан 9,5% төмен болды.

Зерттеу нәтижелері теміржол көлігінің рентабельділігін арттыруға ықпал етеді. Сонымен қатар, жұмыс нәтижелері заманауи вагон конструкцияларын, соның ішінде халықаралық тасымалдарды жасау кезінде пайдалы болуы мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕН ТІЗІМІ

1 **Козырев, А. И.** Допустимые параметры неровностей на головке рельса. Путь и путевое хоз-во. – 2002. – № 1. – С. 13–14.

2 **Жакупова, М.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

3 **Birmann, F.** Neure Messung an Gleisen mit verschieden Unterschwellung // Eisenbahntechische Rundschau. – 2007. – Juli. – P. 229–246.

4 **Kaller, J. J.** The tangential force transmitted by two elastic bodies rolling over each other with pure crepage. Wear. – 2008. – Vol. 11.

5 **Козейчук, П. Г.** О величине забега при набегании оси. – Ж.-д. техника. – 2006. –№ 18.

6 **Коган, А. Я.** Вертикальные силы, действующие на путь. –Тр. ВНИИЖта.– Вып. 402. –2019. – 206 с.

7 **Коган, А. Я.** Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М. : Трансп. – 2007. – 326 с.

8 **Биттибаев, С. М., Мукашева, К. В.** Исследование динамики железнодорожных рельсов. Тр. Междунар. научно-практич. конф. «КазНТУ – образованию, науке и производству Республики Казахстан». – Алматы: КазНТУ. – 2019. – С. 303–305.

9 **Козырев, А. И.** Допустимые параметры неровностей на головке рельса. Путь и путевое хоз-во. – 2002. – № 1. – С. 13–14.

10 **Биттибаев, С. М. и др.** К вопросу динамики железнодорожного пути с неровностями. Тр. КарГТУ. – Караганда. – 2001. – С. 95–96.

11 **Жакупова, М. Б., Тулендиев, Т. Т.** Влияние размеров выщербины на боковой рабочей выкружке рельса на устойчивость движения колеса по рельсу. Вестн. КазАТК. – Алматы. – 2003. – № 7. – С. 78–83.

12 **Соколов, В. К., Фартусова, Т. В.** РШП RR 48 «СПЕНО»: работа и обслуживание. Путь и путевое хоз-во. – 2002. – № 6. – С. 5–7.

13 **Абдурашитов, А. Ю.** Профильное шлифование как один из факторов продления срока службы рельсов в пути. Вестн. ВНИИЖТ. – 2000. – № 6. – С. 28–38.

14 **Биттибаев, С. М., Бихожаева, Г. С., Махабаева, А. Т., Найманова, Г. Т.** Анализ результатов экспериментальных испытаний полнопрофильных рельсовых проб. Матер. II Междунар. научно-практ. конф. «Транспорт Евразии: Взгляд в XXI век». – Алматы. – 2002. – Т. 2. – С. 169–171.

15 **Порошин, В. Л., Бучко, В. М.** Работает КРШ. Путь и путевое хоз-во. – 1993. – № 6. – С. 10–13.

REFERENCES

1 **Kozyrev, A. I.** Dopustimye parametry nerovnostei na golovke relsa. [Permissible parameters of irregularities on the rail head] Püt i putevoe hoz-vo. – 2002. – № 1. – P. 13–14.

2 **Zhakupova, M.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovania. [Modeling the competence of participants in open education] [Text]. – Moscow : Nİİ şkölnyh tehnologi 2009. – 290 p.

3 **Biermann, F.** A new message and understanding of how to carry out higher education // Eisenbahntechische Rundschau. – 2007. – July. – P. 229–246.

4 **Kaller, J. J.** Tangential force transmitted by two elastic bodies rolling over each other with a clean bend. Wear and tear. – 2008. – Volume 11.

5 **Kozeychuk, P. G.** O velichine zabega pri nabeganii osi. [On the magnitude of the run when the axis is overrun]. – J.-d. tehnika. – 2006. –№ 18.

6 **Kogan, A. Ya.** Vertikälnye sily, deistvuiuşie na püt. [Vertical forces acting on the path]. – Tr. VNİİJta.– Vyp 402. – 2019. – 206 p.

7 **Kogan, A. Ya.** Dynamics of the track and its interaction with rolling stock. – Moscow : Transp. – 2007. – 326 p.

8 **Bittibaev, S. M., Mukasheva, K. V.** İssledovanie dinamiki jeleznodorojnyh relsov. [Investigation of the dynamics of railway rails]. Tr. Mejdunar. nauchno-praktich. konf. «KazNTU – obrazovaniu, nauke i proizvodstvu Respubliki Kazahstan». – Almaty: KazNTU. – 2019. – P. 303–305.

9 **Kozyrev, A. I.** Dopustimye parametry nerovnostei na golovke relsa. [Permissible parameters of irregularities on the rail head]. Püt i putevoe hoz-vo. – 2002. – № 1. – P. 13–14.

10 **Bittibaev, S. M. et al.** K voprosu dinamiki jeleznodorojnogo puti s nerovnostämi. [On the issue of the dynamics of a railway track with irregularities]. Tr. KarGTU. – Karaganda. – 2001. – P. 95–96.

11 **Zhakupova, M. B., Tulendiev, T. T.** Vlianie razmerov vyşerbiny na bokovoi rabochei vykrujke relsa na ustoichivöst dvijenia kolesa po relsu. [The influence of the

size of the notch on the lateral working edge of the rail on the stability of the wheel movement along the rail]. Vestn. KazATK. – Almaty. – 2003. – № 7. – P. 78–83.

12 **Sokolov, V. K., Khartusova, T. V.** RŞP RR 48 «SPENO»: rabota i obslujivanie. [R.R. 48 «SPENO»: work and service]. Püt i putevoe hoz-vo. – 2002. – № 6. – P. 5–7.

13 **Abdurashitov, A. Y.** Profilnoe şlifovanie kak odin iz faktorov prodlenia sroka slujby relsov v puti. [Profile grinding as one of the factors of extending the service life of rails in transit]. Vestn. VNİİJT. – 2000. – № 6. – P. 28–38.

14 **Bittibaev, S. M., Bikhozhaeva, G. S., Mahabaeva, A. T., Naimanova, G. T.** Analiz rezültatov eksperimentälnyh ispytani polnoprofilnyh relsovyh prob. [Analysis of the results of experimental tests of full-profile rail samples]. Mater. II Mejdunar. nauchno-prakt. konf. «Transport Evrazii: Vzgläd v HXI vek». – Almaty. – 2002. – Vol. 2. – P. 169–171.

15 **Poroshin, V. L., Buchko, V. M.** Rabotaet KRŞ. [KRSH works]. Püt i putevoe hoz-vo. – 1993. – № 6. – P. 10–13.

А. Б. Забиева[1], Ж. Р. Алипбаев[2], Г. Н. Байгужина[3],
А. Е. Тойлыбаев[4], А. Б. Сагатбекова[5]
[1,2,3]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева
[4]Академия логистики и транспорта имени М. Тынышпаева
[5]Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллин г. Астана

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ ДВУХСЕКЦИОННОГО ВАГОНА-ХОППЕРА

Для улучшения обеспечения возможности одновременной перевозки различных грузов, рекомендуется улучшить конструкции вагона-хоппера. Улучшение заключается в разделении кузова пополам за счет отдельных секций, взаимодействующих через вертикальную стенку и горизонтальные соединительные ремни. Двухсекционный бункер был рассчитан с использованием метода конечных элементов в SolidWorks Simulation для определения структурной прочности вагона.

Результаты исследования показали, что максимальная загрузка вагона хоппера происходит в первом конструктивном режиме (удар). Однако полученные напряжения были ниже допустимых 30%. Проведено моделирование для расчета показателей динамики вагона. Все полученные динамические показатели находились в предельно допустимых результатах. При перевозке вагона хоппера на железнодорожных паромах международного сообщения рекомендуется использовать агрегаты для крепления цепи. Исследование динамической нагрузки опорной конструкции вагона хоппера проводилось с помощью математического моделирования. Проведен прочностный анализ опорной конструкции вагона хоппера. Установлено, что напряжения в конструкции вагона хоппера не превышают нормативных значений. Результаты исследования способствуют повышению рентабельности железнодорожного транспорта. Кроме того, результаты работ могут быть полезны при создании современных вагонных конструкций, в том числе в международном сообщении

Ключевые слова: транспортная механика; вагон Хоппера; двухсекционный вагон; современный дизайн вагона; погрузка вагона; рентабельность железнодорожного транспорта.

****A. B. Zabiyeva[1], Zh. R. Alipbayev[2], G. N.Baiguzhina[3],***
A. E. Toilybayev[4], A. B. Sagatbekova[5]
[1,2,3]Eurasian national university named after L.Gumilyov
[4]Transport and logistic academy named after Tynyshpayev
[5]Kazakh agrotechnical university named after S. Seifullin

ANALYSYS OF THE STRUCTURAL STRENGHT OF A TWO SECTION HOPPER CAR UNDER OPERATING CONDITIONS

A design improvement for the hopper car has been proposed to allow for the simultaneous transportation of different types of cargo. The enhancement involves dividing the body into two compartments using separate sections that are connected through a vertical partition and horizontal connecting belts. The structural strength of the two-section hopper car was analyzed using the finite element method in SolidWorks Simulation.

The results of the study showed that the maximum load of the hopper car occurs in the first constructi e mode (shock). However, the resulting voltages were below the permissible 30%. Modeling was carried out to calculate the indicators of the dynamics of the car. All obtained dynamic indicators were in the maximum permissible results. When transporting a hopper car on railway ferries in international relations, it is recommended to use aggregates for fixing the chain. The study of the dynamic load of the supporting structure of the hopper car was carried out using mathematical modeling. The strength analysis of the supporting structure of the hopper car was carried out. It was found that the stresses in the design of the hopper car do not exceed the regulatory values. The results of the study contribute to increasing the profitability of railway transport. In addition, the results of the work can be useful in the creation of modern carriage structures, including in international communication

Keywords: Transport mechanics; hopper car; two-section car; modern car design; wagon loading; profitability of railway transport.

SRSTI 73.31.41
DOI

A. Kh. Mashekenova[1], *S. R. Baigereyev[2], I. A. Toropov[3], R. H. Iskakov[4]
[1,2,3]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk
[4]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3556-3033
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7773-5457
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0110-8927
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0095-1275
*e-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz

EXPERIMENTAL STUDY OF A NEW ROLLER STAND DESIGN FOR VEHICLE BRAKE DIAGNOSTICS

This article presents the results of experimental research aimed at improving diagnostic methods for braking systems in heavy-duty trucks. The relevance of the topic lies in the fact that most current diagnostic procedures are carried out under conditions far from those encountered in real-world operation-specifically, without load, although trucks rarely operate in an unloaded state. Under such testing conditions, evaluating braking efficiency based on specific braking force often proves inaccurate, which may lead to false conclusions regarding the technical condition of the vehicle and pose risks to road safety. To address this issue, a new design of a roller test stand was developed. The stand simulates actual axle loads through the use of electric winches and a pressure system. The conducted experiments demonstrated that the application of additional load significantly increases the reliability of measurements, reduces data scatter, and provides a more objective assessment of the braking system's condition. The findings suggest that this method should be integrated into regular vehicle inspection procedures. The proposed development can be employed in modernizing diagnostic equipment and updating regulatory frameworks, ultimately contributing to improved accuracy in brake performance evaluation and higher levels of transport safety.

Keywords: brake system diagnostics, heavy-duty vehicles, roller test stand, experimental research, vehicle safety.

Introduction

Amid the rapid development of the transportation industry and the growing volume of freight transportation, the requirements for the operational safety of motor vehicles - especially heavy-duty trucks-are becoming increasingly stringent. One of the most critically important components affecting road safety is undoubtedly the braking system, whose reliability and efficiency are essential for timely responses to road conditions and the prevention of accidents [1; 2; 3].

Technical diagnostics of vehicles during regular inspections or prior to operation allow for the timely identification of faults and the assessment of wear in key

components. However, as practice shows, current diagnostic methods for heavy truck braking systems have significant methodological shortcomings, which can lead to distorted results and, consequently, an inaccurate assessment of the vehicle's actual technical condition[4; 5; 6].

One of the main issues with current diagnostic practices is that trucks typically arrive for inspection in an unloaded state. While this is permitted by current regulations, it does not reflect real operating conditions. In everyday use, trucks usually operate partially or fully loaded, and the behavior of the braking system under these conditions differs significantly from that observed when the vehicle is empty during inspection [7; 8].

The primary parameter used to evaluate braking performance is the specific braking force, defined as the ratio of braking force to the vehicle's mass. In the absence of cargo, the vehicle's mass is significantly lower than during actual operation, and as a result, the calculated specific braking force can be artificially inflated. Although such values may formally meet regulatory standards, they do not reflect the real performance of the braking system under full load, when stopping distance increases and deceleration efficiency decreases [9].

In other words, diagnosing a vehicle without load creates an illusion of braking system functionality, while in real road conditions, it may be ineffective or even dangerous. This is particularly critical in mountainous terrain, on steep descents, or in emergency braking situations under full load [10].

Materials and methods

This situation calls into question the adequacy of current control methods and highlights the need to revise them in light of real-world operating conditions. The introduction of alternative approaches-such as load simulation using ballast or the application of correction factors in calculations-could yield more objective and reliable data during brake system diagnostics.

This article analyzes existing diagnostic practices for heavy truck braking systems, examines the impact of vehicle mass on the accuracy of results, and proposes possible ways to optimize methods to improve the reliability of technical assessments. Particular attention is given to comparing regulatory testing conditions with actual operating regimes, which is essential both for ensuring safety and for guiding regulatory standards for technical inspections.

The present study introduces innovative engineering solutions aimed at creating conditions that simulate actual axle loads, thereby increasing the accuracy of measurements during diagnostic procedures.

Figure 1 shows the design proposed for loading the rollers of the brake test stand.

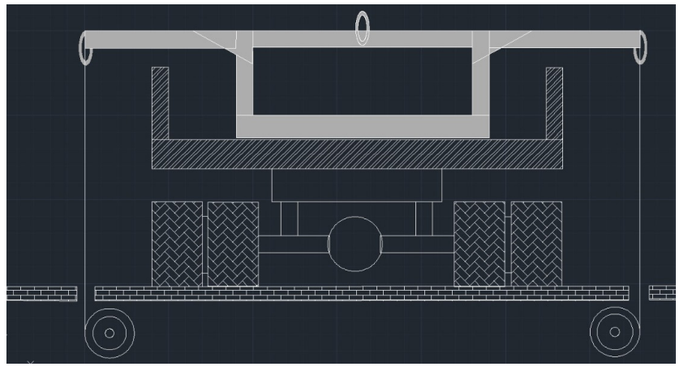


Figure 1 – Design proposed for loading brake tester rollers

The stand consists of several key components, each performing its own unique function. The main frame is the structural element on which all other components are mounted. It is made of high-strength materials that allow it to withstand the heavy loads exerted by the vehicle during testing. The loading device includes electric winches designed to apply load to the axles of a heavy truck. Each winch can generate a load of up to 20 tons per axle. The winches are mounted at a specific angle to ensure uniform distribution of the load across the vehicle's axles. Special lugs are installed in the center of the truck body, to which cables from the electric winches are attached. This solution allows the vehicle to be securely fixed on the stand and the load to be transmitted through the lugs to its axles. The lugs are made of high-quality materials that ensure the durability and safety of the structure. The controller manages the operation of the electric winches and monitors the testing process. Specialized software tracks braking force values and load dynamics in real time, allowing all changes to be accurately recorded and test results to be presented in a format convenient for analysis. The stand is also equipped with high-precision brake sensors that measure braking force, distribution of braking forces across the axles, and other parameters such as brake disc temperature. These sensors are connected to a monitoring system that transmits data to the controller for analysis. The operating principle of the diagnostic stand is to simulate real-world vehicle operating conditions with full load as accurately as possible, which enables comprehensive diagnostics of braking systems. The proposed solution involves the use of artificial weight loading through electric winches capable of simulating up to 20 tons per axle. The originality of this design lies in the development of a special structure that effectively distributes the simulated weight. This system is mounted directly in the center of the vehicle body, which is equipped with special lugs connected to winches that create significant upward pressure. Thus, the proposed technical solution aims to achieve the following objectives: increase the downforce of the vehicle on the surface of the test rig; simulate the maximum permissible load mass of the vehicle; significantly improve the accuracy of braking force measurements. Bench tests are an important part of the brake system diagnostics process, as they make it possible not only to check the

operation of braking mechanisms, but also to assess their condition under real operating conditions. The use of special test stands with strain gauges and dynamometers allows full control over braking force data and the dynamic performance of the braking system. The testing process includes the following stages: vehicle preparation, which involves checking the technical condition of the braking elements, adjusting the braking system, and preparing the test stand; load setup, which includes the installation and adjustment of manual winches to create the necessary vertical force; conducting tests to measure braking forces and torques under various loads; and data collection and analysis, using strain gauges and data acquisition systems to determine braking force and torque indicators. The test results help identify weak points in the braking system and suggest measures to eliminate them (Table 1).

Table 1 – Downforce depending on vehicle mass

Vehicle Mass (t)	Downforce (kN)	Rear Axle Load (kN)	Braking Force (kN)	Braking Torque (kN·m)
10	45	38.2	53.5	9.3
12	60	46.7	67.1	11.4
14	88	58.6	84.7	13.5

Results and discussion

As part of the experiment, various parameters were studied, such as vehicle mass, clamping force, rear axle load, and the corresponding braking forces. These data are essential for analyzing the performance of the braking system and its characteristics under different operating conditions.

Figure 2 shows the influence of vehicle mass (10–14 t) on several mechanical parameters: downforce, rear axle load, braking force, and braking torque.

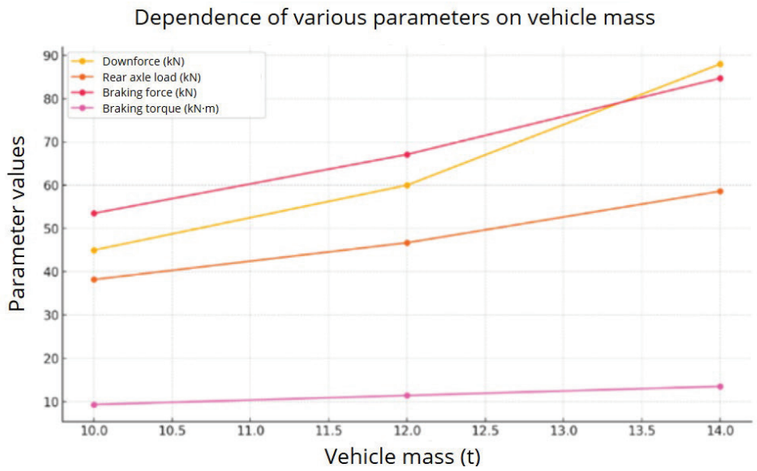


Figure 2 – Dependence of various parameters on vehicle mass

All parameters increase with vehicle mass. Downforce and braking force demonstrate the most significant growth, indicating increased aerodynamic and braking demands. Rear axle load also rises steadily, reflecting greater load distribution on the axle. Braking torque shows a moderate increase, suggesting higher requirements for braking systems.

These trends highlight the necessity of adapting braking and load-bearing components in line with vehicle mass to ensure safety and performance.

Figure 3 presents the relationship between vehicle mass and four parameters: downforce, rear axle load, braking force, and braking torque.

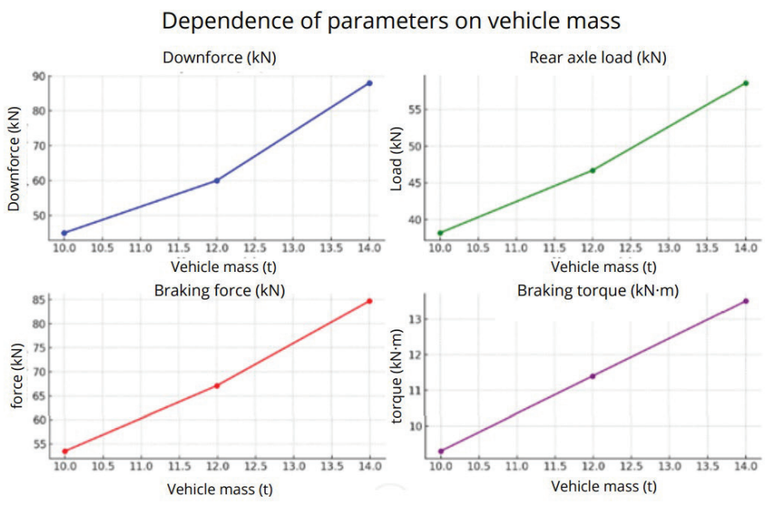


Figure 3 – Dependence of Downforce, Rear Axle Load, Braking Force, and Braking Torque on Vehicle Mass

As vehicle mass increases from 10 to 14 t, all parameters show a clear linear growth. The downforce increases sharply, especially between 12 and 14 t, indicating rising aerodynamic effects. The rear axle load and braking force also increase steadily, reflecting higher demands on load-bearing and braking systems. The braking torque exhibits a linear trend with a moderate rate of increase.

These results confirm that heavier vehicles require proportionally enhanced structural and braking capabilities to maintain performance and safety.

Figure 4 shows the dependence of braking force on vehicle mass.

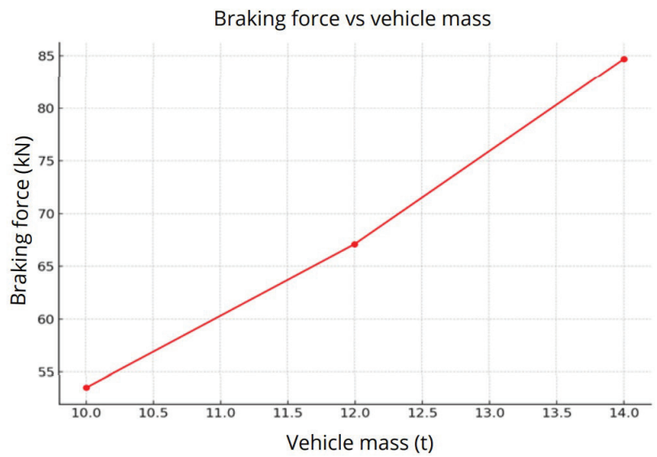


Figure 4 – Dependence of braking force on vehicle mass

As the mass increases from 10 to 14 t, the braking force rises linearly from approximately 54 to 85 kN. This indicates a direct relationship, emphasizing the need to adapt braking systems for heavier vehicles.

The graph presented in Figure 5 demonstrates the relationship between the braking torque and the level of pressing force.

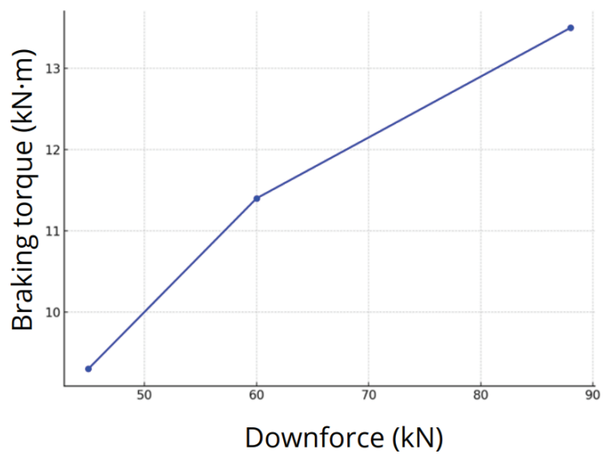


Figure 5 – Dependence of braking torque on pressing force

It is evident that as the pressing force increases, the braking torque also rises significantly. Moreover, a comparison of the graph lines indicates a substantial improvement in braking efficiency when a pressing mechanism is applied, compared to a scenario without such pressing.

Conclusions

The experimental studies and analysis of the obtained data have demonstrated the crucial role that diagnostic conditions play in providing an accurate assessment of the braking efficiency of heavy-duty trucks. One of the key factors significantly affecting the results is the presence of additional pressing force (load) that simulates real operating conditions of the vehicle. The test results showed that applying additional pressing force:

– significantly reduces data scatter, indicating greater stability and repeatability of the results;

– improves the objectivity of specific braking force measurements, allowing for a more accurate assessment of the actual condition of the braking system;

– aligns diagnostic conditions more closely with real-world operational modes, thus increasing the reliability of technical inspections.

Therefore, a well-founded conclusion can be drawn that the traditional approach of diagnosing braking systems in an unloaded state does not fully reflect their effectiveness under actual working conditions. This may lead to results that are formally acceptable but practically unreliable and insufficient to ensure an adequate level of safety.

Considering the observed patterns and the practical significance of the obtained data, it is recommended to implement a diagnostic methodology using additional pressing force as a mandatory component of regular technical inspections of heavy trucks. This approach would significantly enhance the accuracy, reliability, and engineering soundness of the braking system assessments, ultimately improving overall transportation safety.

The implementation of this methodology requires corresponding adjustments to regulatory requirements and standards, as well as retrofitting of testing stands and improvement of personnel qualifications. However, the potential effect in terms of accident prevention and increased reliability of commercial vehicles makes these measures both necessary and timely.

REFERENCES

1 **Baigereyev, S. R.** Mathematical model of independent departure of a vehicle from a roller brake stand after tests // Science and technology of Kazakhstan. – 2022. – №3. – P. 118–129. – https://doi.org/10.48081/JIRT6053

2 **Šarkan Branislav, Jaśkiewicz Marek, Kiktová Monika.** The impact of the truck loads on the braking efficiency assessment. // Open Engineering. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 105–112. – https://doi.org/10.1515/eng-2020-0014

3 **Huang, W., Tan, S., Chu, R., Fan, G., Zhu, P., Liu, D., Jin, X., Li, Z., Qiu, F., & Ji, S.** Research on the Friction Loss of a Loading Brake Tester with Adjusted Shaft Distance. // Machines. – 2025. – Vol.13(3). – P. 170. – https://doi.org/10.3390/machines13030170

4 **Huang, W. Y., Yu, M. J., Fu, W. J., Fan, Y. Y., Wang, Q., Sun, P.** Analysis of influencing factors on testing results of vehicle roller anti-force brake testing platform. // J. Jiangsu Univ. Nat. Sci. Ed. – 2016. – Vol. 37. – P. 497–502.

5 **Lin, X. T., Zhang, H. B., Zheng, X. X.** Research on static and dynamic braking force verification method of roller opposite force type brake testers. // Shanghai Meas. Test. – 2019. – Vol. 46. – P. 24–26.

6 **Stokłosa, J., Marek, B.** Influence of tire pressure on the vehicle braking distance. // Arch. Automot. Eng. Arch. Motoryz. – 2022. – Vol. 97. – P. 60–73.

7 **Momani, W., Fayyad, S. M.** Comparison stand tests and road tests of brake systems under various conditions. // Int. J. Mech. Eng. – 2021. – Vol. 6. – P. 84–90.

8 **Shan, H. M., Zhang, L. B., Zhang, Y. N.** Experimental study on the relationship between lifting height and axle load of loading brake table. // Mech. Des. Manuf. Eng. – 2020. – Vol. 49. – P. 87–91.

9 **Li, S. M., Zhang, J. S., Chen, C. F., Wang, L., Zhang, Y.** Comparative analysis of impact factors on flat plate and anti-force rolling brake testing platform tests. // China Meas. Test. – 2015. – Vol. 41. – P. 125–128.

10 **Firdaus, R. M., Supriyo, B., Suharjono, A.** Analysis of braking force efficiency measurements for various braking strategy applied for vehicle tested on roller brake tester. // J. Phys. Conf. Ser. –2020. – Vol. 1517. – P. 012079.

А. Х. Машекенова[1], *С. Р. Байгереев[2], И. А. Торопов[3], Р. Х. Искаков[4]

[1,2,3]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

[4]Торайғыров Университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

АВТОКӨЛІКТЕРДІҢ ТЕЖЕУ ЖҮЙЕЛЕРІН ДИАГНОСТИКАЛАУҒА АРНАЛҒАН РОЛИКТІК СТЕНДТІҢ ЖАҢА КОНСТРУКЦИЯСЫН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Мақалада ауыр жүк көліктерінің тежеу жүйелерін диагностикалаудың әдістерін жетілдіруге бағытталған эксперименттік зерттеу нәтижелері ұсынылған. Тақырыптың өзектілігі - қазіргі кездедиагностикалық сынақтардың көпшілігі нақты пайдалану жағдайларынан алшақ, яғни көлік жүктемесіз жағдайда жүргізілетіндігінде. Мұндай жағдайда тежеу тиімділігін бағалау, әсіресе, арнайы салмақтық күшке негізделген көрсеткіштер, жиі бұрмалануы мүмкін. Бұл көліктің техникалық жағдайын дұрыс бағаламауға және жолдағы қауіпсіздікке қауіп төндіруге алып келеді. Зерттеу аясында электрлі лебёдкалар мен қысып ұстайтын құрылғылар арқылы көлік осьтеріне жұмыс жүктемесін имитациялайтын жаңа роликті стенд конструкциясы әзірленді. Жүргізілген сынақтар қосымша жүктеменің өлшеу нәтижелерінің нақтылығын арттыратынын, мәліметтер шашырауын азайтатынын және тежеу жүйесінің күйін объективті бағалауға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Алынған нәтижелер бұл әдістемені техникалық бақылау рәсімдеріне енгізудің тиімді екенін дәлелдейді. Ұсынылған құрылым диагностикалық стендтерді жаңғыртуға және нормативтік базаны жетілдіруге үлес қоса алады, бұл өз кезегінде көліктегі қауіпсіздікті арттыруға септігін тигізеді.

Кілтті сөздер: тежегіш жүйелерді диагностикалау, ауыр жүк көліктері, роликтік стенд, эксперименттік зерттеулер, көлік қауіпсіздігі.

А. Х. Машекенова[1], *С. Р. Байгереев[2], И. А. Торопов[3], Р. Х. Искаков[4]
[1,2,3]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск
[4]Торайгыров Университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ РОЛИКОВОГО СТЕНДА ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на совершенствование методов диагностики тормозных систем тяжёлых грузовых автомобилей. Актуальность темы обусловлена тем, что большинство диагностических испытаний в настоящее время проводится в условиях, далеких от реальных - без нагрузки, при которой эксплуатация грузовиков практически не осуществляется. В подобных условиях оценка эффективности торможения, основанная на удельной тормозной силе, часто оказывается некорректной, что может привести к ошибочным выводам о техническом состоянии автомобиля и созданию потенциальной угрозы безопасности дорожного движения. В рамках работы разработана новая конструкция роликового стенда, позволяющая имитировать рабочую нагрузку на оси транспортного средства за счёт применения электрических лебёдок и системы прижима. Проведённые испытания показали, что применение дополнительной нагрузки повышает достоверность измерений, снижает рассеивание данных и позволяет получить более объективную картину состояния тормозной системы. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности внедрения предлагаемой методики в регламентные процедуры технического контроля. Разработка может быть использована в рамках модернизации диагностических стендов и нормативной базы, обеспечивая повышение точности оценки эффективности торможения и, как следствие, уровня безопасности на транспорте.

Ключевые слова: диагностика тормозных систем, тяжёлые грузовые автомобили, роликовый стенд, экспериментальные исследования, безопасность транспортных средств.

FTAMP 73.29.81
DOI

****А. О. Оралбекова[1], Б. С. Ахметов[2], В. А. Лахно[3], Г. Т. Еркелдесова[4], А. О. Токсанбаева[5]***
[1,2,4,5]«Халықаралық көліктік – гуманитарлық университеті» мекемесі, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[3]Өмір және қоршаған орта ғылымдарының ұлттық университеті, Украина, Киев қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4030-0740
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5622-2233
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9695-4543
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6527-7180
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2132-4171
e-mail: ayaulym83@mail.ru

ҚАЗАҚСТАН ТЕМІР ЖОЛДАРЫНДА ӘРТЕКТІ АҒЫНДАРДЫ ЖОСПАРЛАУ АВТОМАТИЗАЦИЯСЫ МІНДЕТТЕРІНІҢ МӘСЕЛЕЛЕРІН ТАЛДАУ

Бұл мақалада Қазақстан темір жолдарында әртекті ағындарды жоспарлауды автоматтандыру мәселелері қарастырылады, олардың ел экономикасы үшін маңыздылығы ескеріледі. Көлік ағындарының әртүрлі сипаттамаларын, соның ішінде жүк пен жолаушылар ағындарының түрлі түрлерін, инфрақұрылым шектеулерін, экономикалық және уақыттық факторларды ескеретін математикалық модельдерді (ММ) және интеллектуалды көлік жүйелерін (ИКЖ) әзірлеу мен енгізуге бағытталған алдыңғы зерттеулерге шолу жүргізілді. Қолданыстағы тәсілдерді талдау негізінде олардың шектеулері анықталып, көлік ағындарын басқару әдістері мен модельдерін жетілдірудің перспективалық бағыттары ұсынылды. Қазақстан темір жол көлігінің (ҚТЖ) тиімділігін арттыру үшін кешенді тәсіл мен заманауи ақпараттық технологияларды қолданудың маңыздылығына ерекше назар аударылды. Көліктің барлық түрлерінде, соның ішінде теміржол көлігінде (РР) біркелкі емес көлік ағындарын жоспарлаудың заманауи мәселелері (бұдан әрі – НТП аббревиатурасы) көбінесе максималды ағындар мәселелерінде оңтайлы шешімдерді табуға келіп тіреледі. Қазақстанның (бұдан әрі ҚР) темір жолдарындағы нақты көлік ағындары негізінен біртекті емес, өйткені олардың құрамына меншік, функционалдық мақсаты (жолаушылар ағыны және жүк ағындары), тасымалдау талаптары, сондай-ақ қызмет көрсету ерекшеліктері мен уақыт параметрлері сияқты әртүрлі сипаттамалары бар элементтер кіреді.

Кілтті сөздер: теміржол көлігі (ТЖК), автоматтандыру, әртекті көлік ағындары, математикалық модельдер, интеллектуалды көлік жүйелері, жоспарлау, көлік инфрақұрылымы.

Кіріспе

Экономикалық теория көлікті қоғамның қызмет етуін қамтамасыз ететін маңызды құралдардың бірі және өндірістік үдерістің негізгі құрамдас бөлігі ретінде қарастырады. Көлік екі негізгі қызметті атқарады: өндіріс ішіндегі және айналым саласында. Өндіріс ішіндегі көлік кәсіпорындар ішінде жұмысшылар мен еңбек құралдарын тасымалдауды қамтамасыз етіп, технологиялық процестердің тиімді орындалуына ықпал етеді. Ал айналым саласындағы көлік, тарихи даму барысында дербес салаға бөлініп шыққан, өнімдерді өндірушілер мен тұтынушылар арасында тасымалдауды жүзеге асырады, бұл аумақтық еңбек бөлінісімен тығыз байланысты. Қазіргі әлемде айналым саласындағы жүк тасымалдау негізінен жалпы пайдаланымдағы көлік түрлерімен жүзеге асырылады, оған теміржол көлігі (ТЖК), теңіз, автомобиль және әуе көлігі, сондай-ақ құбыр желілері мен жоғары вольтты электр беру желілері сияқты мамандандырылған көлік түрлері жатады. Қазақстан Республикасының (ҚР) Статистика агенттігінің 2024 жылғы деректеріне сәйкес, теміржол көлігі (ТЖК) елдегі жалпы жүк тасымалы көлемінің 55 %-нан астамын құрайды, бұл Қазақстан экономикасының шикізаттық құрылымымен байланысты. Теміржол арқылы тасымалданатын негізгі өнімдер – көмір, астық, мұнай және кен сияқты жаппай жүктер, олардың автомобиль көлігімен тасымалдануы экономикалық тұрғыдан тиімсіз. Евразияның орталығында орналасқан, теңізге шығу мүмкіндігі шектеулі және автомобиль инфрақұрылымы дамып келе жатқан Қазақстан үшін теміржол көлігі ел экономикасында шешуші рөл атқарады. Қазақстан Республикасының қазіргі даму жағдайында теміржол көлігінің (ТЖК) миссиясы – жүк тасымалы саласындағы экономиканың қажеттіліктерін тиімді қанағаттандыру және шығындарды барынша азайту. Оның жұмысының маңызды бағалау критерийлері тек қызмет құнымен ғана шектелмей, сондай-ақ қауіпсіздік, жылдамдық және қызмет көрсету деңгейі сияқты сапа көрсеткіштерімен анықталады. Айта кету керек, COVID-19 пандемиясынан кейінгі жағдай Қазақстанға өнеркәсіп саласында оң динамиканы көрсетуге мүмкіндік берді, бұл теміржол тасымалы тарифтерінің өсуін тежеу нәтижесінде отандық өндірушілердің бәсекеге қабілеттілігін сақтауға және экспорттық мүмкіндікті нығайтуға ықпал етті. Алайда көлік инфрақұрылымының, соның ішінде теміржол желісінің жағдайы Қазақстан Республикасының әлеуметтік-экономикалық дамуының маңызды факторы болып қала береді. Қазақстан теміржол желісінің тығыздығы төмен болғанына қарамастан (1-кестені қараңыз), ел барлық негізгі индустриалды және урбанизацияланған өңірлерді тиімді байланыстырып, көршілес мемлекеттермен көлік қатынасын қамтамасыз етеді. Бұл, өз кезегінде, ел ішіндегі экономикалық біртұтастық пен халықаралық саудадағы теміржол көлігінің (ТЖК) маңыздылығын айқындайды. Ал қашықтыққа тасымалдау бойынша баламалардың шектеулігі және шикізат пен өнімді тасымалдауға жоғары сұраныс жағдайында, Қазақстан Республикасында теміржол көлігі алдағы уақытта жүк және жолаушылар тасымалы нарығында басым рөл атқаруды жалғастырады.

1-кесте – Посткеңестік мемлекеттердің теміржол ұзындығы (км) (статистика органдарының деректері негізінде құрастырылған)

Мемлекеттер	2019	2022	2024
Әзербайжан	2127	2126	2120
Армения	840	837	837
Казақстан Республикасы	15660	15700	15700
Ресей Федерациясы	84700	85000	85000
Түрікменстан	2170	2169	2169
Өзбекстан	3655	3656	3656
Қырғызстан	422	424	424

Осылайша, теміржол көлігі (ТЖК) ҚР экономикасында стратегиялық маңызды орын алады, бұл, өз кезегінде, жоспарлау мен басқаруды тиімді автоматтандыруды талап етеді, оның ішінде ТКЖ көлік желілеріндегі біртекті емес ағындармен, ал жоспарлауды автоматтандырудың жаңа әдістерін әзірлеу және енгізу, шикізат экономикасының ерекшелігі мен географиялық ерекшеліктерін ескере отырып, тасымалдарды оңтайландыруды қоса алғанда, елдегі көлік қызметтерінің тиімділігі мен сапасын арттыру үшін релевантты бағыттар болып табылады.

Көліктің барлық түрлерінде, оның ішінде темір жол көлігінде (ТЖК) біртекті емес көлік ағындарын жоспарлаудың қазіргі заманғы міндеттері (бұдан әрі - БЕКА аббревиатурасын пайдаланамыз) ең жоғары ағындардың міндеттерінде оңтайлы шешімдерді іздеуге жиі әкеледі [1, 105–111-бб.; 2, 113–127-бб.;]. Қазақстанның (бұдан әрі - ҚР) темір жолдарындағы нақты көлік ағындары біркелкі емес, өйткені меншік тиесілігі, функционалдық мақсаты (жолаушылар ағыны және жүк ағыны), тасымалдауға қойылатын талаптар, сондай-ақ сервис ерекшеліктері мен уақытша параметрлер сияқты әртүрлі сипаттамалары бар элементтерді қамтиды. Сондықтан тасымалдарды ұтымды ұйымдастыру үшін осындай ағындардың негізгі талаптары мен қасиеттерін қанағаттандыратын біртекті процестер қалыптастырылады.

Осыған байланысты соңғы онжылдықтарда көлік үдерістеріне арналған көптеген математикалық модельдер (бұдан әрі – ММ) әзірленді, соның ішінде оларды оңтайландыру және жоспарлауды ұтымды етуге бағытталған модельдер [2, 113–127-бб.].

Көліктегі жаһандық цифрландыру жағдайында заманауи талдау құралдары мен ақпараттық-коммуникациялық технологиялар (АКТ) көлік ағындарының жекелеген элементтерінің ерекше талаптары мен қасиеттерін, сондай-ақ олардың өзара әрекеттесуін есепке алу мүмкіндіктерін қамтамасыз етеді.

Көлік ағындарын ұйымдастыру және басқару мәселелерін шешудің өзекті бағыты – автоматтандырылған басқару жүйелерімен (АБЖ) интеграцияланған интеллектуалды көлік жүйелерін (бұдан әрі – ИКЖ) теміржол көлігінде (ТЖК) енгізу болып табылады. Бұл жүйелер үлкен көлемдегі деректерді талдау негізінде басқару процестерін автоматтандыруға мүмкіндік береді.

Қазақстан Республикасының теміржол көлігінде (ТЖК) көлік ағындарының әртектілігін есепке алу маңызды мәселелердің бірі болып қала береді [6, 9–12-бб.; 7, 150–152-бб.; 8, 130–134-бб.; 9, 268–286-бб.]. Мысалы, жүк тасымалын басқару

міндеттері вагон парктерінің көптеген иелерінің, оның ішінде шетелдік меншік иелерінің болуымен күрделене түседі. КСРО ыдырағаннан кейін вагон парктері ТМД елдері арасында бөлініп, пайдалану мен өзара есеп айырысудың жаңа ережелерін ескеру қажеттілігі туындады, бұл вагон ағындарын оңтайлы басқару сияқты міндеттерді едәуір қиындатты. Сонымен қатар, бірқатар зерттеулерде [10, 608 бб.; 11, 213–223-бб.; 12, 14–15-бб.;] сұрыптау станцияларында (СС) пойыздарды құрастыру және тарқату міндеттеріне ерекше назар аударылады. Мұнда вагондардың әртүрлі меншік санаттарын және олардың қозғалыс реттілігіне қойылатын талаптарды ескере отырып, пайдалану шығындарын барынша азайту қажет. Осыған сәйкес, "шетелдік меншік иелерінің вагондары" сияқты жаңа санаттарды енгізу теміржол көлігін басқарудың автоматтандырылған жүйелерімен (ТЖК АБЖ), атап айтқанда, сұрыптау станциялары (СС) үшін жоспарлау мен басқарудың жаңа әдістері мен технологияларын әзірлеуді талап етті. Бұл әдістер мен технологиялар мемлекетаралық келісімдер талаптарын және өзара есеп айырысу ерекшеліктерін ескеруі қажет.

Осыған байланысты, Қазақстан теміржол көлігі желілерінде әртекті ағындарды жоспарлауды автоматтандыру міндеттері қолданыстағы математикалық модельдерді жетілдіруді, озық ақпараттық технологияларды (АТ) енгізуді және ағын элементтерінің ерекше қасиеттері мен олардың өзара әрекеттесуін ескеретін жаңа басқару тәсілдерін жасауды талап етеді. Теміржол көлігінде (ТЖК) «әртекті ағындар» термині [1, 105-111-бб.] көлік ағындарының әртүрлі сипаттамалары мен қасиеттерін білдіреді, оған әртүрлі жүк түрлері, жолаушылар, сондай-ақ олардың тасымалдауға қойылатын талаптарының әртүрлілігі кіреді. [2, 113-127-бб.] деректеріне сәйкес, ағындардың әртектілігі олардың физикалық, уақыттық, құндық және басқа да параметрлеріндегі айырмашылықтардан көрінеді. Мысалы, әртүрлі жүк санаттарынан (сусымалы, контейнерлік, сұйық және т.б.) тұратын ағындар, тасымалдау жылдамдығы мен жайлылығына түрлі талаптары бар жолаушылар ағындары, сондай-ақ басымдықтары, маршруттары және инфрақұрылым өткізу қабілеттілігіне қатысты шектеулері әртүрлі ағындар бар. Сонымен қатар, әртектілік маусымдық, уақыт аралықтары, географиялық ерекшеліктер сияқты тасымалдау шарттарының айырмашылықтарымен де байланысты болуы мүмкін. Осылайша, әртекті ағындарды жоспарлау – бұл көлік желілерінде мұндай әртүрлі ағындарды тиімді басқару үшін маршруттарды, кестелерді және ресурстарды әзірлеу және оңтайландыру үдерісі. Бұл, өз кезегінде, теміржол желілерінің өткізу қабілеті, уақыт шектеулері, тасымалдау қауіпсіздігі талаптары (мысалы, қауіпті жүктер үшін), экономикалық аспектілер (мысалы, тарифтер мен шығындар), сондай-ақ тасымалдау үдерісіне қатысушылардың (жүк жөнелтушілер, тасымалдаушылар, жолаушылар) жеке талаптары сияқты көптеген факторларды есепке алуды қамтиды. Әртекті тасымал ағындарын (ӘТА) жоспарлау күрделі математикалық модельдер мен алгоритмдерді қолдануды талап етеді. Бұл модельдер мен алгоритмдер теміржол көлігін басқарудың автоматтандырылған жүйелеріне (ТЖККБ АЖ) және/немесе интеллектуалды көлік жүйелеріне (ИКЖ)

енгізілген жағдайда, әртүрлі ағын түрлеріне байланысты көптеген критерийлер мен шектеулерді ескеруге мүмкіндік береді.

[1, 105–111-бб.; 2, 113–127-бб.; 3, 194–197-бб.; 4, 201–207-бб.; 5, 302–307-бб.; 6, 9–12-бб.] зерттеулерінде көрсетілгендей, көлік ағындарын жоспарлаудың классикалық әдістері көбінесе әртектіліктің ерекшеліктерін ескермейді, бұл ресурстардың тиімсіз пайдаланылуына және ТЖК тасымалдары кезінде қызмет көрсету сапасының төмендеуіне әкеледі. Сондықтан, теміржол көлігінің автоматтандырылған басқару жүйелері мен интеллектуалды көлік жүйелері үшін әртүрлі талаптар мен тасымалдау шарттарын есепке алатын арнайы модельдер мен алгоритмдерді әзірлеу өзекті міндет болып табылады.

Қорытындылай келе, теміржол көлігіндегі (ТЖК) әртекті тасымал ағындарын (ӘТА) жоспарлау – бұл түрлі математикалық әдістерді, соның ішінде графтар теориясын, оңтайландыру әдістерін, бұлыңғыр жиындар теориясын, интервалдық талдау және кибернетикалық модельдеу әдістерін интеграциялауды талап ететін күрделі міндет. Осы әдістерді қолдану көлік ағындарын басқарудың тиімді стратегияларын әзірлеуге мүмкіндік береді, олар жалпы және жеке талаптарды ескеріп, нәтижесінде Қазақстанның теміржол көлік жүйесінің тиімділігі мен сенімділігін арттыруға ықпал етеді.

Мәселенің қойылуы.

Қазақстан темір жолдарында әртекті көлік ағындарын жоспарлауды автоматтандыру – шикізаттық экономика жағдайында көлік жүйесінің тұрақты дамуын қамтамасыз етудің негізгі міндеттерінің бірі. Ағындардың әртектілігі тасымалданатын жүктердің сипаттамаларының әртүрлілігімен, жолаушылар маршруттарымен, инфрақұрылымдық шектеулермен және экономикалық факторлармен байланысты, ал қолданыстағы математикалық модельдер, әдетте, ағындардың біртектілігі туралы жеңілдетілген болжамдарға негізделеді, бұл болжау мен жоспарлау дәлдігінің төмендеуіне әкеледі. Қазақстан үшін теміржол көлігінің стратегиялық маңыздылығын ескере отырып, осы саладағы алдыңғы зерттеулерді талдау, олардың кемшіліктерін анықтау және дамудың перспективалық бағыттарын белгілеу өзекті болып табылады. Бұл шолу мақаласы заманауи технологияларды, соның ішінде интеллектуалды көлік жүйелері мен автоматтандырылған басқару жүйелерін интеграциялау қажеттілігіне назар аударады, олар көлік ағындарының әртектілігін ескеруге және оларды басқаруды оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістер

Төменде қарастырылған 2-кесте Қазақстан Республикасының теміржол көлігіндегі (ТЖК) әртекті тасымал ағындарын (ӘТА) жоспарлаудың негізгі ерекшеліктерін жүйелеуге арналған және бұл үдерістің күрделілігі мен көпфакторлылығын көрсетеді. Мұндай талдаудың өзектілігі инфрақұрылым, экономикалық орта және қауіпсіздік талаптарының үнемі өзгеріп отыру жағдайында әртүрлі сипаттамаларға ие көлік ағындарын (жүк және жолаушылар тасымалын) тиімді басқаруға кешенді тәсілді қолдану қажеттілігімен байланысты болды. Сонымен қатар, 1-кестеге теміржол желілерінің өткізу қабілеті,

маусымдық тасымал қарқындылығының ауытқулары, сондай-ақ көлік үдерісіне қатысушылардың жеке қажеттіліктері сияқты факторларды енгізу, сөзсіз, заманауи автоматтандырылған басқару жүйелері (АБЖ) мен интеллектуалды көлік технологияларын қолдануды талап етеді. Сондықтан, жалпы алғанда, 2-кестені зерттеу барысында осы аспектілерді қорытындылауға мүмкіндік береді және әртекті тасымал ағындарын басқаруды оңтайландыруға бағытталған АБЖ мен интеллектуалды көлік жүйелері (ИКЖ) үшін математикалық модельдер мен алгоритмдерді одан әрі дамытуға негіз болады.

Жүк тасымалдарын, транспорттық процестің барлық қатысушыларының мүдделерін ескере отырып, ҚР темір жол транспорты бойынша жүзеге асыру, қазіргі заманғы темір жолдағы тасымал ағындарына тән факторлар мен қасиеттердің әртүрлілігін ескеруге қабілетті жаңа математикалық модельдер (ММ) мен оңтайлы жоспарлау әдістерін әзірлеуді және қолдануды талап етеді. Конкуренция жағдайында компромисс шешімдерін іздеуді талап ететін міндеттер туындайды, олар параллель тиімділікті, экономикалық тиімділікті және тасымалдау процесінің қатысушыларының жеке талаптарын қанағаттандыруды қамтамасыз етеді. Тасымалдау құралдары біртекті элементтер ретінде қарастырылатын классикалық тәсіл тасымалдау міндеттерін шешу үшін жеткіліксіз, өйткені әрбір тасымалдау құралдарының ерекше қасиеттерін, мысалы, вагон паркіне меншік құқықтарының заңдық аспектілерін ескеру қажет. Бұл Қазақстанның теміржол тасымалдау ағындары үшін әсіресе өзекті, өйткені вагон паркі құрамының біртекті еместігі, сондай-ақ жүк жөнелтушілер мен тасымалдаушылардың талаптарының әртүрлілігі жоспарлаудың күрделілігін туындатады.

2- кесте – Қазақстан темір жолындағы НТП жоспарлаудың ерекшеліктерін жүйелеу (автормен құрастырылған)

Әртектілік категориясы	Қысқаша сипаттама	Есепке алу үшін негізгі факторлар	АБЖ және ИКЖ ролі
Жүктің түрлері	Әртүрлі жүк категориялары (ұнтақ, контей-нерлік, сұйық, қауіпті).	Тасымалдауға қойы-латын нақты талаптар (мысалы, қауіпті жүк-тердің қауіпсіздігі (ҚЖ), жүктердің үйлесімділігі.	Жүктің, маршруттардың қасиеттерін есепке алуды автоматтандыру, қауіпсіздік нормаларын бақылау.
Жолаушы-ағындары	Жылдамдық, жайлылық және сапар құнына ерекше талаптар қоятын әртүрлі жолаушылар топтары.	Маршруттарды дифференциялау, уақыт бойынша басымдықтар, жайлы жағдайларды қамтамасыз ету.	Кестелерді оңтайландыру және жолаушы-лардың таң-дауын есепке алу үшін ИКЖ-ні пайдалану.
Уақытша сипаттамалар	Тасымалдау уақыт аралық-тарының әртек-тілігі (маусым-дық өзгерістер, шындық жүкте-мелер).	Шындық жүктемелер мен маусымдық өзгерістерді есепке алу, кестені инфрақұрылымның өткізу қабілетімен сәйкестендіру.	АБЖ ағындарды болжауға және қайта бөлуге көмектеседі, жүктемені барынша азайтады.

Географиялық ерекшеліктер	Жер бедері мен климаттық жағ-дайларға байла-нысты маршрут-тардағы айырма-шылықтар	Пайдалану шарттарын ескере отырып, мар-шруттарды оңтайлан-дыру.	ИКЖ маршруттарды нақты уақыт режимінде тал-дауды қамта-масыз етіп, кедергілер неме-се жағдайдың өзгеруі туралы ескертеді.
Теміржол көлігі (ТЖК) инфра-құрылымының шектеулері	Теміржол желі-лерінің өткізу қабілеті, стан-циялардағы шектеулер.	Ағындарды бөлу, кідірістерді барынша азайту, инфрақұрылым ресурстарын тиімді пайдалану.	АБЖ-гі модель-дер инфрақұры-лымның жүкте-месін болжауға және ресурс-тарды қайта бөлуге ұсыныс жасауға көмек-теседі.
Тарифтер мен шығындар	Тасымалдаудың құндық пара-метрлері(мыса-лы, инфрақұры-лымды пайдала-ну тарифтері, қызмет көрсету шығындары).	Экономикалық тиімділікті есепке алу, маршруттар бойынша шығындарды минимизациялау.	АБЖ экономи-калық параметр-лерді жоспарлау модельдеріне интеграциялауға мүмкіндік бере-ді, шығындар мен табыстар-дың арақаты-насын оңтайландырады.
Маусымдық тасымалдар	Маусымдық факторлардың тасымал сипат-тарына әсері (мысалы, күзгі кезеңде ауыл-шаруашылық өнімдерін тасы-малдаудың ар-туы).	Жыл мезгіліне байла-нысты тасымалдаудың интенсивтілігінің өз-герісін болжау.	АБЖ және ИКЖ маусымдық өзге-рістерді ескере отырып, тасы-малдау жоспар-ларын болжауға және түзетуге көмектеседі.
Жеке талаптар	Жүкжіберушілердің, тасымалдау-шылардың және жолаушылардың талаптары (мы-салы,жедел жет-кізілімдер, қауіп-сіздік).	Уақытша тасымалдау процесіне қатысушы-лардың әр категория-сы үшін бірегей пара-метрлерін есепке алу.	АБЖ-гі барлық процеске қаты-сушылардың деректерін біріктіру олар-дың талаптарын ескеруге және жедел өзгеріс-тер енгізуге мүмкіндік бе-реді.
Ағындардың басымдықтары	Жүк тасымалда-ры басымдықта-рының айырма-шылығы, мыса-лы, жедел жүк-тер немесе ба-сымдықты жо-лаушылар мар-шруты.	Шұғыл немесе маңыз-ды ағындарға басым қызмет көрсетуді қам-тамасыз ету.	АБЖ нақты уақыт режимін-де ағын басым-дықтарын басқа-рады, қақтығыс-тарды азайтады.
Қауіпсіздік талаптары	Қауіпті жүктерді тасымалдау не-месе жолаушы-лардың қауіпсіз-дігін қамтамасыз ету үшін қолда-нылатын арнайы шаралар.	Нормалар мен стан-дарттарды сақтау, төтенше жағдайлардың алдын алу.	ИКЖ қауіпсіздік бұзушылықта-рын бақылау және алдын алу жүйелерін енгі-зеді.

Жалпы түрде жабық (1) – (4) моделі, мысалы, [13, 207 бб.; 14, 354-363 бб.] жұмыстарына сәйкес, қосымша жинақтау белгілерін енгізуді, соның ішінде «қашықтықтар» матрицасын қысқарту арқылы, көлік құралдарының гетерогендігін ескеруді қамтиды. Мұндай және төменде қарастырылатын басқа модельдер көпкритериалды жоспарлау тапсырмасын білдіреді, мұнда әр критерий көлік процесінің белгілі бір қасиеттеріне сәйкес келеді. Сондықтан, мұндай

модельді әзірлеу Қазақстанның теміржол желілеріндегі жүк ағындарын басқару үшін оңтайлы шешімдер жасау кезінде принципті кезең болып табылады.

$$F_c(\bar{X}) = \sum_{k=1}^{K}(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^{n} * C_{ij}^{(k)}) \Rightarrow \frac{min}{x_{ij} \in D_x} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{m}(\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^{(k)}) = \sum_{k=1}^{k} a_i^{(k)},\ i = 1,2,\dots,m; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{K}(\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{(k)}) = b_j,\ j = 1,2,\dots,n; \quad (3)$$

$$\sum\nolimits_{i=1}(\sum\nolimits_{i} a_i^{(k)}) = \sum\nolimits_{j} b_j, \quad (4)$$

x_{ij}^{n} – A_i пунктінен тасымалдау көлемі; $a_i^{(k)}$ – (k) иесінің вагондар саны; қажеттілігі.

(1) – (4) есебіңің моделі қосымша жиынтық белгілерді енгізу есебінен ғана емес, сонымен қатар «қашықтық» матрицасының қысқаруы есебінен де жалпыланады.

[15, 175-179 бб.] зерттеуде жолаушылар теміржол тасымалдарына сұраныста болжау үшін, бұл салада жоспарлаудың тиімділігін арттыру және операцияларды оптимизациялау мақсатында математикалық модельдерді қолдану мәселесі қарастырылады. Авторлар көліктік жұмыс көлемін дәл және сенімді болжаудың теміржол көлігін тиімді жоспарлау мен операцияларды оптимизациялауда принципті маңызы бар екенін атап өтеді. Олар көліктік жұмыс нәтижелерінің болжамдары жиі нақты мәндерден ерекшеленетінін, себебі қолданылатын математикалық модельдердің жеткіліксіздігімен байланысты екенін көрсетеді. Осы практикалық қажеттілікке жауап ретінде авторлар тарихи деректер негізінде жолаушылар теміржол тасымалдарына сенімді болжаулар жасауға мүмкіндік беретін тиімді математикалық модельді әзірлеу мақсатында жүргізілген зерттеу нәтижелерін ұсынады. Зерттеуде осындай эмпирикалық деректер түріне арналған бірнеше модель ұсынылып, олардың таңдалу критерийлері анықталған.

Қолданылатын үлгілерге маусымдық аңғал, экспоненциалды тегістеу (ETS), Бокс–Кокс түрлендіруімен күй-кеңістік экспоненциалды тегістеу, ARMA қателері, тригонометриялық тренд және маусымдық құрамдас бөліктер (TBATS) және авторегрессивті біріктірілген жылжымалы орташа (ARIMA) кіреді.

[16, 57-63 бб.] еңбегінде теміржол жүк тасымалын басқаруда цифрлық технологияларды енгізу мәселесі қарастырылады. Авторлар қазіргі заманғы цифрлық теміржол жүйелерінің ерекшеліктерін ескеретін математикалық модельдерді (ММ) әзірлеу қажеттілігіне назар аударады. Зерттеуде цифрлық

трансформация жағдайында жүк тасымалын жоспарлау және ұйымдастыру мәселелеріне баса мән беріледі. Мақалада жүк тасымалдау процестерінің математикалық сипаттамасы ұсынылған, ол жүк ағындарын, теміржол желісінің өткізу қабілетін, жылжымалы құрам мен инфрақұрылымның пайдалану параметрлерін ескеруді қамтиды.

Нәтижелер мен талқылау

Авторлар теміржол көлігін басқарудың тиімділігін арттыру үшін цифрлық технологияларды қолданудың басымдылығын ерекше атап өтеді, оның ішінде мониторинг жүйелері мен маршруттарды оңтайландыру құралдары бар. Сондай-ақ, жүк ағындарын неғұрлым дәл болжауға және кідірістер мен бос тұрып қалу тәуекелдерін азайтуға мүмкіндік беретін цифрлық платформа мен математикалық модельдеу әдістерін біріктіруге негізделген тәсіл ұсынылады. Авторлардың айтуынша, ұсынылған математикалық модельдерді қолдану маршруттар мен кестелерді жоспарлауды жақсартады, пайдалану шығындарын азайтады және басқа көлік түрлерімен өсіп келе жатқан бәсекелестік жағдайында теміржол көлігінің бәсекеге қабілеттілігін арттырады. Мұндай тәсіл тасымалдау шарттарының өзгеруіне бейімделіп, көлік үдерісіне қатысушылардың сұраныстарына жедел жауап бере алатын «ақылды» теміржолды дамытуға ықпал етеді.

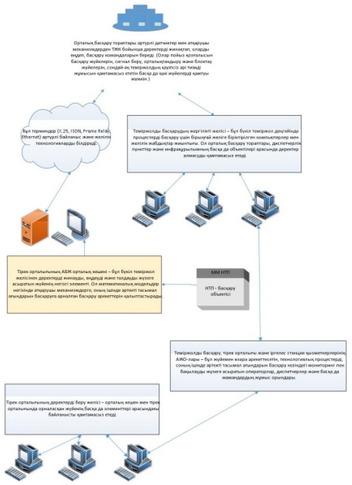
[17, 154–165 бб.] еңбегінде теміржол көлігінің (ТЖК) жұмыс тиімділігін арттыруға бағытталған заманауи әдістер мен модельдер ұсынылған. Авторлар теміржол желісін жоспарлау, басқару және пайдалану процестерін оңтайландыруға мүмкіндік беретін математикалық тәсілдерді зерттейді. Негізгі назар маршруттау, ресурстарды бөлу және жүк пен жолаушылар тасымалы барысында туындайтын шығындарды барынша азайту мәселелеріне аударылған.

[18, 136–141 бб.] зерттеулерінде пойыз қозғалысын басқару жүйелері және жүк ағындарын бақылауға арналған цифрлық платформалар сияқты заманауи ақпараттық технологияларды енгізу мәселелері қарастырылады. Бұл технологиялар зерттеуде ұсынылған математикалық тәсілдермен біріктірілген. Авторлар мұндай технологиялар жетілдірілген модельдеу әдістерімен үйлестірілгенде, ресурстарды неғұрлым тиімді пайдалануға және теміржол тасымалының сенімділігін арттыруға ықпал ететінін атап өтеді.

Қорытындылай келе, жоғарыда жүргізілген зерттеулерге талдау жүк және жолаушылар тасымалы ағындарын басқару мәселелерін шешуге арналған әртүрлі тәсілдерді қамтитынын көрсетті. Біз талдаған жұмыстар маршруттарды оңтайландыру және вагондарды бөлу мәселелерін ғана емес, сонымен қатар логистика стратегияларын әзірлеу мен көлік ағындарын болжауды, оның ішінде әртекті тасымал ағындарын (ӘТА) да қамтиды. Дегенмен, зерттеулердің көпшілігі орташа алынған модельдерге негізделген, онда ағындар біртекті қасиеттері мен талаптары бар деп қарастырылады. Мұндай тәсіл белгілі бір әмбебаптыққа ие болғанымен, әртекті ағындарға қатысты мәселелерді шешуде шектеулерге тап болады. Бұл әртүрлі жүк сипаттамаларына, жылжымалы құрам түрлеріне, пайдалану шарттарына және жүк иелерінің талаптарына байланысты өзгешеліктерден туындайды.

Әртекті ағындар, мысалы, [1, 105-111 бб.; 2, 113-127 бб.; 3, 194-197 бб.; 4, 201-207 бб.; 5, 302-307 бб.; 6, 9-12 бб.; 7, 150-152 бб.; 8, 130-134 бб.; 9, 268-286 бб.; 10, 608 бб.; 11, 213-223 бб.; 12, 14-15 бб.; 13, 207 бб.; 14, 354-363 бб.] еңбектерінде көрсетілгендей, тасымалдауды жоспарлау дәлдігі мен тиімділігін арттыру үшін нақтылауды қажет ететін негізгі аспект болып табылады. Мысалы, тасымалданатын жүк түрлерінің, вагон иелерінің, маршруттардың және пайдалану шарттарының айырмашылықтарын ескере отырып, ағындарды бөлу көлік жүйесінің жекелеген элементтерінің ерекшеліктерін есепке алуға мүмкіндік беретін неғұрлым күрделі модельдер мен әдістерді қолдануды талап етеді.

Алдыңғы зерттеулерді талдау көрсеткендей, біртұтас модельдерге негізделген дәстүрлі тәсілдер көлік ағындары параметрлерінің белгісіздігі мен жоғары динамикасы жағдайында төмен тұрақтылықты көрсетеді. Мұндай модельдер, әдетте, масштабтаудың шектеулі мүмкіндіктеріне ие және вагон паркін сипаттайтын факторлар, инфрақұрылымның өткізу қабілеті, тарифтік саясаттың экономикалық аспектілері және логистикалық шектеулер сияқты көптеген өзара байланысқан факторларды тиімді түрде есепке ала алмайды. Нәтижесінде, оларды әртекті тасымал ағындарын (ӘТА) жоспарлау міндеттерін шешуге қолдану нақты пайдалану жағдайларын шамадан тыс жеңілдетуге және қабылданатын шешімдердің сапасының төмендеуіне әкеледі.



1-сурет – Тасымалдау қар-қындылығының артуы жағдайында темір жолдардағы әртекті ағын-дарды жоспарлау автоматтандыру міндетін шешуге арналған АБЖ модульдік архитектурасының сызбасы

Модельдер ансамблі, керісінше, әртүрлі тәсілдерді қолдануға мүмкіндік береді, мұнда әрбір әдіс белгілі бір сыныптағы міндеттерді шешуге оңтайландырылған. Мысалы, желілік модельдер маршруттар мен ағындарды оңтайландыруды қамтамасыз етсе, бұлдыр-логикалық ат ағындар туралы деректерді дәйекті

түрде өңдеуге, олардың өзгерістерін болжауға және басқару шешімдерін әзірлеуге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе Қазақстан Республикасында тасымал қарқындылығының өсуі жағдайында маңызды, өйткені көлік желілеріне жүктеме артып, жоспарлаудың жеделдігі мен дәлдігіне қойылатын талаптар күшейе түсуде.

Осылайша, ұсынылған нақтылаулар қолданыстағы модельдердің кемшіліктерін жоюға бағытталған. Вагондардың пайдалану сипаттамаларын ескеру, оларды құн матрицасы негізінде санаттарға бөлу, сондай-ақ вагондардың үйлесімділігіне қатысты шектеулерді енгізу әзірленген модельдердің Қазақстан Республикасының теміржол көлігінің нақты пайдалану жағдайларына барынша сәйкес келуін қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулердің нәтижесінде мынадай қорытындылар жасалды.

1 Алдыңғы зерттеулердің шолуы мен талдауы теміржолдардағы әртүрлі ағындарды жоспарлауды автоматтандырудың Қазақстанның шикізат экономикасы жағдайында күрделі және өзекті міндет екенін растады. Қазақстанның теміржолдарында транспорттық ағындарды заманауи жоспарлаудың маршруттардың географиялық ерекшеліктерін, жүк тасымалдау қарқындылығының маусымдық ауытқуларын, сондай-ақ тасымалдау процесінің қатысушыларының жеке талаптарын ескеруі қажет екендігі көрсетілді.

2 Автоматтандырылған басқару жүйелерін (АБЖ) және интеллектуалды транспорттық жүйелерді (ИТЖ) пайдаланудың негіздемесі, қозғалыс ағындарын оңтайландырумен қатар, жүк түрлеріндегі, қозғалмалы құрамның (ҚС) сипаттамаларындағы және теміржол көлігі (ТЖК) инфрақұрылымының ерекшеліктеріндегі айырмашылықтармен байланысты олардың гетерогенділігін ескере алатындығы көрсетілді.

3 Қолданыстағы математикалық әдістер мен модельдердің, атап айтқанда, осы санаттағы тапсырмаларда кеңінен қолданылатын граф теориясы, сызықтық бағдарламалау және желілік талдау әдістерінің, әртүрлі вагондардың пайдалану сипаттамалары, жүк тасымалдау тарифтері, пайдалану шарттарын сақтамау үшін айыппұлдар, маршруттағы вагондардың үйлесімділігі сияқты факторларды ескеруге жеткіліксіз бейімделгені анықталды. Теміржол көлігі (ТК) РК-дағы жүк тасымалдарын болжау мен жоспарлаудың дәлдігін арттыру үшін транспорттық желінің әр элементінің жеке ерекшеліктерін ескеретін жаңа математикалық модельдерді (ММ) әзірлеу және барларын дамыту қажеттілігі негізделген.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Скалозуб, В. В., Паник, Л. А.** Моделирование неоднородных транспортных потоков с переменными тарифами // Транспортные системы и технологии перевозок. – 2015. – № 10. – С. 105–111.

2 **Скалозуб, В. В., Паник, Л. А.** Реализация динамических, конкурентных и нечетких моделей планирования многопродуктовых потоков в транспортных

сетях. : Наука и прогресс транспорта // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2018. – № 3 (75). – С. 113–127.

3 **Паник, Л. А.** Автоматизация планирования неоднородных динамических потоков в транспортных сетях. Наука и прогресс транспорта // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2011. – № 36. – С. 194–197.

4 **Скатков, А. В., Тарасова, А. В.** Системный анализ и оптимизация потоков в логистических неоднородных задачах // Оптимизация производственных процессов. – 2013. – № 14. – С. 201–207.

5 **Копылова, Е. В.** Оптимизация пригородных пассажирских перевозок на основе методологии организации неоднородного (многоструйного) пассажиропотока // Фёдор Петрович Кочнев-выдающийся организатор транспортного образования и науки в России. – 2021. – С. 302–307.

6 **Гималетдинов, К. В., Демеуова, К. Ж., Бейсахметова, Ж. А.** Вопросы эффективности использования железнодорожных транспортных коридоров республики Казахстан // Universum экономика и юриспруденция. – 2019. – № 5 (62). – С. 9–12.

7 **Высоцкая, В.** Перспективы развития транзитного потенциала Казахстана железнодорожным транспортом // Экономика и бизнес теория и практика. – 2020. – № 12–1. – С. 150–152.

8 **Блинцов, С. М., Кенжебаева, Г. Ж.** Проблемы логистизации железнодорожного транспорта Казахстана // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2012. – № 1. – С. 130–134.

9 **Жуковицкий, И. В., Косолапов, А. А.** Моделирование в процессе проектирования информационных систем на железнодорожном транспорте // монография. – 2016. – С. 268–286.

10 **Михалёва А. И.** Системные технологии моделирования сложных систем // монография под общей редакцией проф. - Днепр : НМетАУ-ИВК «Системные технологии», ISBN 978-966-2596-19-9. – 2016. – С. 608.

11 **Косолапов, А. А.** Информатизация общества: философско–антропологические проблемы : Наука и прогресс транспорта // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2015. – № 4 (58). – С. 213–223.

12 **Скалозуб, В. В., Солтысюк, О. В., Чередниченко, М. С., Фокша, К. С.** Математическое моделирование процессов эксплуатации парков различных форм собственности // Вестник Белорусского государственного университета транспорта Наука и транспорт. – 2007. – № 1–2. – С. 14–15.

13 **Скалозуб, В. В., Соловьев, В. П., Жуковицкий, И. В., Гончаров, К. В.** Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий) : учебное пособие // – Д. : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – 2013. – С. 207.

14 **Borucka, A., Mazurkiewicz, D., Łagowska, E.** Mathematical modelling as an element of planning rail transport strategies // Transport. – 2021. – № 36(4). – P. 354–363.

15 **Zhuravleva, N. A., Gulyi, I. M., Polyanichko, M. A.** Mathematical description and modelling of transportation of cargoes on the base digital railway : In Environment. Technologies. Resources // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – 2019. – June. – № 2. – P. 175–179.

16 **Vojtek, M., Kendra, M., Zitrický, V., Široký, J.** Mathematical approaches for improving the efficiency of railway transport // Open Engineering. – 2020. – № 10(1). – P. 57–63.

17 **Chislov, O., Bogachev, V., Zadorozhniy, V., Kravets, A., Bakalov, M., Bogachev, T.** Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system // Transport problems. – 2021. – № 16. – P. 154–165.

18 **Shramenko, N. Y., Shramenko, V. O.** Mathematical model of the logistics chain for the delivery of bulk cargo by rail transport // Scientific newsletter of the National University of Medicine. – 2018. – № 5. – P. 136–141.

19 **Anghinolfi, D., Paolucci, M., Sacone, S., Siri, S.** Freight transportation in railway networks with automated terminals: A mathematical model and MIP heuristic approaches // European journal of operational research. – 2011. – № 214(3). – P. 588–594.

REFERENCES

1 **Skalozub, V. V., Panik, L. A.** Modelirovanie neodnorodnyh transportnyh potokov s peremennymi tarifami. Transportnye sistemy i tehnologii perevozok [Modeling of heterogeneous transport flows with variable tariffs.] // Transport systems and transportation technologies. – 2015. – № 10. – P. 105–111.

2 **Skalozub, V. V., Panik, L. A.** Realizaciya dinamicheskih, konkurentnyh i nechetkih modelej planirovaniya mnogoproduktovyh potokov v transportnyh setyah [Implementation of dynamic, competitive and fuzzy models for planning multi-commodity flows in transport networks] // Science and progress of transport : Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2018. – № 3 (75). – P. 113–127.

3 **Panik, L. A.** Avtomatizaciya planirovaniya neodnorodnyh dinamicheskih potokov v transportnyh setyah [Automation of planning of heterogeneous dynamic flows in transport networks.] // Science and progress of transport : Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2011. – № 36. P. 194–197.

4 **Skatkov, A. V., Tarasova, A. V.** Sistemnyj analiz i optimizaciya potokov v logisticheskih neodnorodnyh zadachah [System analysis and optimization of flows in heterogeneous logistics problems] // Optimization of production processes. – 2013. – № 14. – P. 201–207.

5 **Kopylova, E. V.** Optimizaciya prigorodnyh passazhirskih perevozok na osnove metodologii organizacii neodnorodnogo (mnogostrujnogo) passazhiropotoka [Optimization of suburban passenger transportation based on the methodology of organizing a heterogeneous (multi-jet) passenger flow] // Fedor Petrovich Kochnev

is an outstanding organizer of transport education and science in Russia. – 2021. – P. 302–307.

6 **Gimaletdinov, K. V., Demeuova, K. Zh., Beisakhmetova, Zh. A.** Voprosy effektivnosti ispolzovaniya zheleznodorozhnyh transportnyh koridorov respubliki Kazahstan [Issues of the efficiency of using railway transport corridors of the Republic of Kazakhstan] // Universum : economics and jurisprudence. – 2019. – № 5 (62). – P. 9–12.

7 **Vysotskaya, V.** Perspektivy razvitiya tranzitnogo potenciala Kazahstana zheleznodorozhnym transportom [Prospects for the Development of Kazakhstan's Transit Potential by Rail Transport] // Economy and Business : Theory and Practice. – 2020. – № 12(1). – P. 150–152.

8 **Blintsov, S. M., Kenzhebaeva, G. Zh.** Problemy logistizacii zheleznodorozhnogo transporta Kazahstana [Problems of Logistics Development in Kazakhstan's Rail Transport] // Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev. – 2012. – № 1. – P. 130–134.

9 **Zhukovitsky, I. V., Kosolapov, A. A.** Modelirovanie v processe proektirovaniya informacionnyh sistem na zheleznodorozhnom transporte [Modeling in the Process of Designing Information Systems in Rail Transport] // Monograph. – 2016. – P. 268–286.

10 **Mikhaleva, A. I.** Sistemnye tehnologii modelirovaniya slozhnyh sistem [System technologies for modeling complex systems] // Monograph edited by prof. - Dnepr : NMetAU-IVK «System technologies». ISBN 978-966-2596-19-9. – 2016. – P. 608.

11 **Kosolapov, A. A.** Informatizaciya obshestva: filosofsko–antropologicheskie problemy [Informatization of society: philosophical and anthropological problems] // Science and progress of transport : Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 4 (58). – P. 213–223.

12 **Skalozub, V. V., Soltysyuk, O. V., Cherednichenko, M. S., Foksha, K. S.** Matematicheskoe modelirovanie processov ekspluatacii parkov razlichnyh form sobstvennosti [Mathematical modeling of the processes of operation of parks of various forms of ownership] // Bulletin of the Belarusian State University of Transport : Science and Transport. – 2007. – № 1–2. – P. 14–15.

13 **Skalozub, V. V., Soloviev, V. P., Zhukovitsky, I. V., Goncharov, K. V.** Intellektualnye transportnye sistemy zheleznodorozhnogo transporta (osnovy innovacionnyh tehnologij) [Intelligent transport systems of railway transport (fundamentals of innovative technologies)] // manual - D. : Publishing house of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. – 2013. – P. 207.

14 **Borucka, A., Mazurkiewicz, D., Łagowska, E.** Mathematical modelling as an element of planning rail transport strategies // Transport. – 2021. – № 36(4). – P. 354–363.

15 **Zhuravleva, N. A., Gulyi, I. M., Polyanichko, M. A.** Mathematical description and modelling of transportation of cargoes on the base digital railway : In Environment. Technologies. Resources // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – 2019. June. – № 2. – P. 175–179.

16 **Vojtek, M., Kendra, M., Zitrický, V., Široký, J.** Mathematical approaches for improving the efficiency of railway transport // Open Engineering. – 2020. – № 10(1). – P. 57–63.

17 **Chislov, O., Bogachev, V., Zadorozhniy, V., Kravets, A., Bakalov, M., Bogachev, T.** Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system // Transport problems. – 2021. – № 16. – P. 154–165.

18 **Shramenko, N. Y., Shramenko, V. O.** Mathematical model of the logistics chain for the delivery of bulk cargo by rail transport // Scientific newsletter of the National University of Medicine. – 2018. – № 5. – P. 136–141.

19 **Anghinolfi, D., Paolucci, M., Sacone, S., Siri, S.** Freight transportation in railway networks with automated terminals : A mathematical model and MIP heuristic approaches // European journal of operational research. – 2011. – № 214(3). – P. 588–594.

А. О. Оралбекова[1], Б. С. Ахметов[2], В. А. Лахно[3],
Г. Т. Еркелдесова[4], А. О. Токсанбаева[5]
[1,2,4,5]Учреждение «Международный транспортно-гуманитарный университет» Республика Казахстан, г. Алматы
[3]Национального университета биоресурсов и природопользования, Украина, г. Киев

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПОТОКОВ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ КАЗАХСТАНА

В статье рассматриваются вопросы автоматизации планирования неоднородных потоков на железных дорогах Казахстана, учитывая их значимость для экономики страны. Проведен обзор предшествующих исследований, направленных на разработку и внедрение математических моделей (ММ) и интеллектуальных транспортных систем (ИТС), позволяющих учитывать разнородные характеристики транспортных потоков, включая различные типы грузов и пассажиропотоков, ограничения инфраструктуры, экономические и временные факторы. На основании анализа существующих подходов, выявлены их ограничения и предложены перспективные направления для совершенствования методов и моделей управления транспортными потоками с учетом их неоднородности. Сделан акцент на необходимости комплексного подхода и применения современных информационных технологий для повышения эффективности функционирования железнодорожного транспорта (ЖДТ) Казахстана. Современные задачи планирования неоднородных транспортных потоков (далее используем аббревиатуру – НТП) на всех видах транспорта, в том числе железнодорожного транспорта (ЖДТ), часто сводятся к поиску оптимальных решений в задачах максимальных потоков. Реальные транспортные потоки на железных дорогах Казахстана (далее РК) преимущественно неоднородны, так как включают элементы с различными характеристиками, такими как принадлежность собственности,

функциональное назначение (пассажиропотоки и грузопотоки), требования к транспортировке, а также особенности сервиса и временные параметры. Поэтому для рациональной организации перевозок формируются однородные процессы, удовлетворяющие основным требованиям и свойствам подобных потоков.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт (ЖДТ), автоматизация, неоднородные транспортные потоки, математические модели, интеллектуальные транспортные системы, планирование, транспортная инфраструктура.

***A. O. Oralbekova[1], B. S. Akhmetov[2], V. A. Lakhno[3],
G. T. Erkeldesova[4], A. O. Toksanbaeva[5]***
[1,2,4,5]Institution «International Transport and Humanitarian University», Republic of Kazakhstan, Almaty
[3]National University of Life and Nature Management, Ukraine, Kyiv

ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF AUTOMATION OF PLANNING OF HETEROGENEOUS TRAFFIC FLOWS ON THE RAILWAYS OF KAZAKHSTAN

The article considers the issues of automation of planning of heterogeneous flows on the railways of Kazakhstan, taking into account their importance for the economy of the country. A review of previous studies aimed at the development and implementation of mathematical models (MM) and intelligent transport systems (ITS) is conducted, allowing to take into account heterogeneous characteristics of traffic flows, including various types of cargo and passenger flows, infrastructure limitations, economic and time factors. Based on the analysis of existing approaches, their limitations are identified and promising directions for improving the methods and models of traffic flow management are proposed, taking into account their heterogeneity. Emphasis is placed on the need for an integrated approach and the use of modern information technologies to improve the efficiency of the railway transport (RT) of Kazakhstan. Modern problems of planning heterogeneous transport flows (hereinafter we use the abbreviation – NTP) on all types of transport, including rail transport (RR), often come down to finding optimal solutions in problems of maximum flows Real transport flows on the railways of Kazakhstan (hereinafter RK) are predominantly heterogeneous, as they include elements with different characteristics, such as ownership, functional purpose (passenger flows and freight flows), transportation requirements, as well as service features and time parameters.

Keywords: rail transport, automation, heterogeneous transport flows, mathematical models, intelligent transport systems, planning, transport infrastructure.

ҒТАМР 73.31.41
DOI

***А. Т. Төленов[1], Б. Ж. Шойбеков[2], Ғ. Ж. Бекболатов[3],
Б. А. Омаров[4], Б. Қ. Қайролла[5]***
[1,2,3,4]М.Әуезов атындағы ОҚУ, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.
[5]Қазақстан ғылым және технологиялар институты,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9159-4566
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4109-0554
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2968-5686
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3347-4232
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3883-7124
*e-mail: tulenov-2011@mail.ru

АВТОМОБИЛЬДІ ПАЙДАЛАНУДАҒЫ ОНЫҢ ЖҰМЫСЖАСАУЫН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТЕТІН ШЫҒЫНДАРДЫҢ ӨЗГЕРУІ

Автокөліктердің жұмыс жасау қабілеттілігін қамтамасыз ететін шығындар көліктік логистиканың тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Бұл шығындардың уақыт өте келе өзгеруі, әсіресе автомобильдің жүріп өткен жолына байланысты экспоненциалды түрде артуы, көліктік қызметтер мен тасымалдау саласындағы маңызды мәселе болып табылады.

Бұл мақалада автокөлікті көліктік логистикада пайдалану кезінде оның жұмысын қамтамасыз етуге жұмсалатын шығындардың өзгерісі зерттеледі. Жұмысжасау қабілетін қамтамасыз ететін шығындар автомобильдің жүріп өткен жолына, техникалық жағдайына, жұмыс істеу режиміне және басқа факторларға байланысты айтарлықтай өзгеріп отырады. Зерттеу барысында автомобильдің жұмысын қамтамасыз ету үшін қажетті шығындардың мөлшері мен динамикасы талданды. Тозу қисығының өзгеруі, атап айтқанда, жөндеу жұмыстарында автомобильдің түрлі түйіндестерінің тозу деңгейі, мысалы, қозғалтқыш, дөңгелектер, рульдік басқару және тежеу жүйелері жөнінде ақпарат берілді. Зерттеу нәтижесінде, автомобильдің жұмысының қамтамасыз етілуіне байланысты шығындар жүрілген жолға пропорционалды түрде экспоненциалды өсетіні анықталды. Бұл мақалада сондай-ақ автомобильдің жұмысжасау қабілетіне әсер ететін факторлар мен олардың байланысын сипаттайтын математикалық модельдер ұсынылды. Алынған деректер автокөліктердің тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету мақсатында жөндеу шығындарын алдын ала болжауға және жоспарлауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: жұмысжасау қабілеті, жөндеу шығындары, тозу қисығы, жөндеу жұмыстары, жүрілген жол, техникалық жағдай.

Кіріспе

Автокөлікті көліктік логистикада пайдалану процесінде оның жұмысжасауын қамтамасыз ететін шығындар тасымалдаудың өзіндік құнның маңызды бөлігін құрайды, осы тұрғыдан алғанда оның мөлшері және пайдалану процесінде оның өзгеруі тәжірибеде үлкен қызығушылық туындатады.

Қалыпты жағдайда жұмысжасау тек қана жол және климаттық жағдаймен, жұмыс атқару режимімен, жүктің түрімен анықталмайды, сонымен қатар автомобильдің техникалық жағдайымен, ұйымдастыру жұмыстарының деңгейімен және автокәсіпорынның материалды-техникалық базасымен анықталады, және де автомобильдің жұмысжасауын қамтамасыз ететін шығындар оның жүріп өткен жолына байланысты экспоненциалды түрде жоғарылайды [1; 2].

Автокөліктердің жұмыс жасау қабілеттілігін қамтамасыз ету үшін қажетті шығындар көліктік логистика мен тасымалдау саласындағы маңызды мәселелердің бірі болып табылады. Бұл шығындар, әсіресе автомобильдің жүріп өткен жолына байланысты экспоненциалды түрде өзгеруі, көліктің жалпы тиімділігін және тасымалдау қызметінің өзіндік құнын айтарлықтай әсер етеді. Техникалық жағдайы, ұйымдастыру деңгейі, көліктің пайдалану мерзімі және климаттық факторлар автомобильдің жұмыс жасау қабілеттілігін қамтамасыз ететін шығындардың өзгеруіне ықпал етеді.

Бұл мәселе көліктердің тиімділігі мен пайдалану мерзімін ұзартуға, сондай-ақ жөндеуге қажетті шығындарды оңтайландыруға бағытталған зерттеулерде үлкен қызығушылық туғызады. Атап айтқанда, автомобильдің жүріп өткен жолы мен оның компоненттерінің тозуы арасындағы тәуелділіктерді тереңірек зерттеу, жөндеу жұмыстарының шығындарын алдын ала болжау және көліктердің жұмыс жасауды қамтамасыз етудегі шығындардың өзгеру динамикасын түсіну маңызды болып табылады [2; 3].

Тақырыптың өзектілігі осы тұрғыда айқын көрінеді: автомобильдер мен көліктік құралдардың жұмыс жасау қабілеттілігін қамтамасыз ету үшін шығындарды тиімді басқару көліктік логистиканың тұрақтылығын және экономикасын арттыруға мүмкіндік береді. Сондықтан, осы мәселелерді зерттеу және нақты мәліметтер негізінде шешімдер ұсыну бүгінгі күнде маңызды болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу барысында автомобильдердің жұмысын қамтамасыз ету үшін қажетті шығындар мен олардың өзгеру динамикасы зерттелді. Материал ретінде автокөліктердің нақты деректері мен жөндеу жұмыстарының шығындары алынды. Зерттеу үшін КамАЗ-5410 және КамАЗ-5511 маркалы автокөліктер қолданылды. Жөндеу жұмыстарынан алынған деректер автомобильдің жүріп өткен жолына байланысты модельденді. Шығындардың экспоненциалды өзгерісін сипаттау үшін математикалық модельдер қолданылды. тозу қисығының өзгерісін бағалау үшін $S = S_0 e^{bl}$ формуласы пайдаланылды. Бұл модель автомобильдің түйіндестерінің тозуын және оған байланысты жөндеу шығындарын анықтауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

Автомобильдің жұмысжасауын қамтамасыз ететін шығындардың өзгеруі көлікті пайдалану кезеңінде бірнеше түрлі факторлардың әсерінен болады. Бұл факторлар арасында автомобильдің конструкциясы, жүргізу шарттары, жүргізушінің дағдылары мен жұмыс режимі, сондай-ақ автомобильдің қызмет көрсетумен қамтамасыз етілу деңгейі маңызды орын алады [4; 5].

Біріншіден, автомобильдің жұмысжасауын қамтамасыз ететін шығындар оның конструкциялық ерекшеліктерімен тығыз байланысты. Автокөлік түріне және оның бөлшектеріне байланысты әр түрлі құрылымдық сипаттамалар мен сапалық көрсеткіштер шығындардың деңгейін анықтайды. Мысалы, ауыр жүк тасымалдайтын көліктер мен жеңіл жолаушы көліктерінің жұмыс істеу шарттары мен технологиялық талаптары әртүрлі болғандықтан, олардың шығындары да өзгеше болады. Бұған қоса, автомобильдің жүк көтеру қабілеті мен қозғалтқыштың қуаты да оның пайдалану шығындарының өсуіне әсер етеді [6].

Екіншіден, автомобильдің жұмысын қамтамасыз ететін шығындардың өзгеруі жол жағдайларына және климаттық факторларға да байланысты. Әр түрлі климаттық аймақтарда көліктердің техникалық жағдайы мен жұмыс істеу қабілеті әртүрлі болуы мүмкін. Мысалы, суық климатта мотордың дұрыс жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін көлікке қосымша жылыту жүйелерін енгізу қажет болады. Сонымен қатар, жолдардың сапасы, яғни тегіс немесе қиын жағдайдағы жолдар көліктің жұмысын қамтамасыз ету үшін жұмсалатын шығындарға әсер етеді. Тегіс және сапалы жолда жүретін көлікке қарағанда, тасты немесе топырақты жолда жүрген автомобильдің техникалық қызмет көрсету шығындары әлдеқайда жоғары болуы мүмкін.

Үшіншіден, жүргізушінің тәжірибесі мен жұмыс режимі де шығындардың деңгейіне айтарлықтай әсер етеді. Кәсіби жүргізушілер көлікті дұрыс жүргізу және техникалық жағдайын сақтауға көп көңіл бөледі. Олар автомобильдің техникалық ақауларын ерте кезеңдерде анықтап, олардың ауқымын шектей алады, бұл өз кезегінде ұзақ мерзімді эксплуатацияға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жүргізушінің дұрыс жүргізу әдістері мен жүріс режимі де жүк көлігінің ұзақ мерзімді тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді. Тез тоқтау немесе бастапқы жылдамдықты асыру сияқты әрекеттер көліктің тозуын жылдамдатуы мүмкін.

Төртіншіден, автомобильдің қызмет көрсету деңгейі де оның жұмысжасауын қамтамасыз ететін шығындарды өзгертуге әсер етеді. Автокөлік техникалық қызмет көрсету мен жөндеудің дұрыс ұйымдастырылған жүйесі арқылы өз қызметін жақсы атқара алады. Бұл жүйеге арнайы кәсіби мамандарды, жоғары сапалы бөлшектерді, заманауи құрал-жабдықтарды және уақытында жасалатын профилактикалық жұмыстарды енгізу қажет. Бұның барлығы көліктің техникалық жағдайының дұрыс болуын қамтамасыз етіп, оның жұмысының үздіксіздігін сақтауға көмектеседі. Жөндеу жұмыстарын дұрыс жоспарлау және уақытылы жүргізу көліктің ұзақ мерзімді пайдалануына ықпал етеді, сонымен қатар шығындарды азайтады.

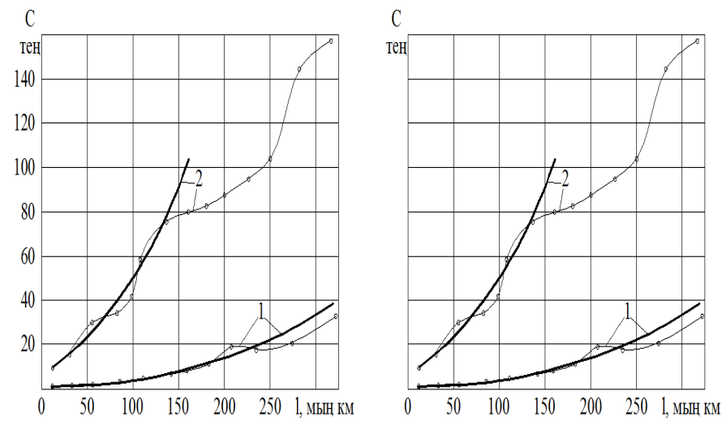
Қорытындылай келе, автомобильдің жұмысжасауын қамтамасыз ететін шығындардың өзгеруіне әсер ететін факторлар көп, әрі әрқайсысы өзара байланысты. Бұл факторлар автомобильдің конструкциясы мен жұмыс жағдайынан бастап, жүргізуші мен қызмет көрсету деңгейіне дейінгі аралықта әр түрлі ықпал етеді. Бұл мәселелердің дұрыс шешілуі автомобильдің жұмысын тиімді ұйымдастыруға мүмкіндік береді және көліктің ұзақ мерзімді эксплуатациясын қамтамасыз етеді.

Жүргізілген зерттеулердің негізінде [7; 8] автомобильді пайдалану процесіндегі автокөліктің жұмысжасауын қамтамасыз ететін жөндеу жұмыстарының шығындарын сипаттайтын тозудың қисық сызығының елеулі иілуі көрініс табады, яғни біркелік өзгеруінің бұзылуы. Бортты автомобильдерде айтып өткен тозу сызығындағы иілулер 137,5 және 212,5 мың км байқалады. Өзі аударғыш жүк көлігінде бұл жағдай 112,5; 187,5 және 262,5 мың км орын алған.

Автомобиль қозғалтқышына байланысты оны жөндеуге жұмсалатын шығындардың өзгеруі, мысалы автомобиль-тартқыш үшін жүрілген жолына байланысты 137,5 және 262,5 мың км болып келсе, өзі аударғыш жүк көлігі қозғалтқышын жөндеу үшін параметрлерінің өзгеруі 112,5; 187,5 және 262,5 мың км болып келеді.

Автомобильдердің дөңгелектері мен күпшектері айқындалған иілулер өзі аударғыш жүк көлігі үшін 162,5 мың км және 287,5 мың км. Автомобиль-тартқыш үшін иілулер 187,5 мың км болып табылады (1-сурет).

Рульдік басқару мен тежеу жүйесіне және электржабдықтарды жөндеуге жаратылатын шығындардың өзгеруі автомобильдің жүрген жолына өте аз мөлшерде тәуелді болып келеді. Осы айтылған тәуелділік тізбектеліп байланысқан түйіндестіктің техникалық жағдайының өзара әрекеттестігінің әсерінен болып табылады. Физикалық тұрғыдан алғанда бұл құбылыс барлық тізбектеліп байланысқан түйіндестердің біреуін жөндеу барысында, олардың қарқынды тозуының төмендеуінен болып келеді [9, 117-124-бб.]. Бұл жағдай әсерлі түрде трансмиссиялық түйіндестердің тозу қисық сызығында көрініс табады.



1-КамАЗ-5410; 2-КамАЗ-5511

1-сурет 1 – Автомобильдерді пайдалану процесіндегі дөңгелектер мен күпшектерді жөндеу шығындарының өзгеруі

Жөндеуге жаратылатын шығындардың азаюын, шамамен түйіндестердің біреуінің жөндеуден кейінгі тозу қисығының қарқындылық дәрежесінің төмендеуінен білеміз. Айта кету керек, осы уақытқа дейін автомобиль бойынша жалпы тозу қисығы жасалмаған, бұл жағдай алдағы уақыт құзырында болып табылады. Барлық тізбектеліп байланысқан түйіндестердің тозу қисығын келесі формуламен анықтауға болады:

$$S = S_0 e^{bl} \quad (1)$$

мұндағы S_0-координаттардың бастапқы жағдайына келтірілген тозық; l- автомобильдің жүріп өткен жолы, км.

Ағымдағы жөндеу жұмыстарын жүргізу барысында (мысалы, бөлшекті ауыстыру) түйіндестің тозуы жүріп өткен l_i жол бойынша S_i деп алған жағдайда координаттардың бастапқы жағдайына келтірілген тозық S_{0i} болады [10, 365-368-бб.]. Бөлшекті алдыңғы кезектегі алмастырудың шығындары (оның бағасы, жөндеу жұмысшыларының еңбекақысы, автомобильдің жөндеуде тұруына байланысты шығындар) C_i болып қалыптасады (есептеулерді жеңілдету үшін бөлшектің қалдық бағасын ескермеуге болады). Олай болса түйіндесті, агрегаттың торабын ағымдағы жөндеудің шығындарын төмендегі формуламен анықтаймыз, ол тозыққа пропорционалды түрде өседі:

$$C_i = C_{0i}e^{bl_i} \quad (2)$$

Келтірілген тәуелділікте C_i және l_i белгілі болғандықтан, параметр b тозудың тәуелділігі жүрілген жолға байланыстылығының негізінде C_{0i} анықтауға мүмкіндік туындайды. Егер бұл жағдайда кезекті жөндеу жұмыстары жүргізілген болса берілген C_i және b бойынша, C_{0i} жүрілген жол мөлшері l_i - ге байланысты болып келеді.

Қорытынды

Жоғарыда келтірілген мәліметтер бойынша келесі қорытынды жасауға болады:

1 Тәжірибелік жағдайда автомобильдің жұмысжасау қабілеттілігін қамтамасыз етудегі жүрілген жолға байланысты экспоненциалды тәуелділіктің параметрлері тек қана аралық жөндеу периодында өзгермейді, яғни автомобильдің жүрілген жолына байланысты түйіндестердің тозуының экспоненциалды тәуелділігінің параметрлері өзгеріссіз болған жағдайда көрініс табады.

2 Түйіндестің жұмысжасау қабілеттілігін қамтамасыз етуге жаратылатын шығындарының тәуелділік параметрлерін тозу қисығының негізінде анықтауға болады, жұмысжасау қабілеттілігін қамтамасыз ететін параметрлер мен шығындарды жөндеуаралық периодтың бастапқы және соңғы кезеңдерінде анықтауға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Ковалев, Р. Н., Степанов, А. С., Черницын, С. А.** Повышение эффективности эксплуатации транспортных средств путем прогнозирования потребности в запасных частях [Текст] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6(часть 7). – С. 1361–1364.

2 **Тахтамышев, Х. М., Белов, С. А., Гукетлев, Ю. Х.** Обоснование методов прогнозирования потребности в запасных частях автомобилей в условиях функционирования автотранспортных предприятий [Текст] // Вестник Евразийской науки. - 2023. - Т. 15. - № 3.

3 **Балгабеков, Т. К., Кошмаганбетова, А. С.** Факторы, влияющие на эффективность эксплуатации грузовых автомобилей [Текст] // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 12–2. – С. 190–194.

4 **Киричок, А., Турченюк, М.** Современные подходы к расчёту затрат и себестоимости при планировании на автотранспортном предприятии [Текст] // International Journal of New Economics and Social Sciences. – 2017. – № 1(5). – P. 72–90.

5 **Gössling, S., Kees, J., Litman, T.** The lifetime cost of driving a car [Text] // Ecological Economics. – 2022. – Vol. 194. – P. 22–28.

6 **Danilecki, K., Smurawski, P., Urbanowicz, K.** Optimization of Car Use Time for Different Maintenance and Repair Scenarios Based on Life Cycle Assessment [Text] // Applied Sciences. – 2023.

7 **Туленов, А. Т., Шойбеков, Б. Ж.** Повышение работоспособности автотранспортных средств с разработкой математических моделей, обеспечивающие требуемый уровень вероятности безотказной работы / А. Т. Туленов, Б. Ж. Шойбеков // Материалы международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения - 19: 30 лет Независимости Казахстана» / ЮКУ им.М.Ауэзова. – Шымкент, 2021. – Т. 7. – С. 167–170.

8 **Максименко, А. Н.** Обеспечение работоспособности машины с учетом изменений технико-экономических показателей на этапе эксплуатации ее жизненного цикла [Текст] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 2(35). – С. 31–40.

9 **Зорин, В. А.** Основы работоспособности технических систем: учеб. для вузов / В. А. Зорин. – М. : Академия, 2009. – 208 с.

10 **Проников, А. С.** Параметрическая надежность машин: учеб. для вузов / А. С. Проников. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 559 с.

REFERENCES

1 **Kovalev, R. N., Stepanov, A. S., Chernicyn, S. A.** Povy`shenie e`ffektivnosti e`kspluatacii transportny`x sredstv putem prognozirovaniya potrebnosti v zapasny`x chastyax. [Improving vehicle operational efficiency by forecasting spare parts requirements] [Text]. Fundamental research. – 2014. – № 6 (Vol. 7). – P. 1361–1364.

2 **Taxtamy`shev, X. M., Belov, S. A., Guketlev, Yu. X.** Obosnovanie metodov prognozirovaniya potrebnosti v zapasny`x chastyax avtomobilej v usloviyax funkcionirovaniya avtotransportny`x predpriyatij. [Substantiation of methods of forecasting the need for spare parts of motor vehicles in the conditions of functioning of motor transport enterprises] [Text]. Bulletin of Eurasian Science. – 2023. – Vol. 15. – № 3.

3 **Balgabekov, T. K., Koshmaganbetova, A. S.** Faktory`, vliyayushhie na e`ffektivnost` e`kspluatacii gruzovy`x avtomobilej. [Factors affecting the efficiency of truck operations] [Text]. International Journal of Experiential Education. – 2016. – № 12–2. – P. 190–194.

4 **Kirichok, A., Turchenyuk, M.** Sovremenny`e podxody` k raschyotu zatrat i sebestoimosti pri planirovanii na avtotransportnom predpriyatii. [Modern approaches to calculating costs and cost of production in planning at a road transport enterprise] [Text]. International Journal of New Economics and Social Sciences. – 2017. – № 1(5). – P. 72–90.

5 **Gössling, S., Kees, J., Litman, T.** The lifetime cost of driving a car [Text]. Ecological Economics. – 2022, Vol. 194. – P. 22–28.

6 **Danilecki, K., Smurawski, P., Urbanowicz, K.** Optimization of Car Use Time for Different Maintenance and Repair Scenarios Based on Life Cycle Assessment [Text]. Applied Sciences. – 2023.

7 **Tulenov, A. T., Shojbekov, B. Zh.** Povy`shenie rabotosposobnosti avtotransportny`x sredstv s razrabotkoj matematicheskix modelej, obespechivayushhie

trebuemy`j uroven` veroyatnosti bezotkaznoj raboty`. [Improving the serviceability of motor vehicles with the development of mathematical models that provide the required level of probability of failure-free operation] / A. T. Tulenov, B. Zh. Shojbekov // Materials of the international scientific-practical conference 'Auezov Readings - 19 : 30 years of Independence of Kazakhstan' / M. Auezov SKU. – Shymkent, 2021. – Vol. 7. – P. 167–170.

8 **Maksimenko, A. N.** Obespechenie rabotosposobnosti mashiny` s uchetom izmenenij texniko-e`konomicheskix pokazatelej na e`tape e`kspluatacii ee zhiznennogo cikla. [Ensuring machine operability taking into account changes in technical and economic indicators at the operation stage of its life cycle] [Text]. Bulletin of the Belarusian-Russian University. – 2012. – № 2(35). – P. 31–40.

9 **Zorin, V. A.** Osnovy` rabotosposobnosti texnicheskix sistem : uchebnik dlya stud. vy`ssh. ucheb. zavedenij. [Fundamentals of performance of technical systems: textbook] / V. A. Zorin. – Moscow : Akademiya, 2009. – 208 p.

10 **Pronikov, A. S.** Parametricheskaya nadezhnost` mashin [Parametric reliability of machines] / A. S. Pronikov. – Moscow : N. E. Bauman Moscow State Technical University, 2002. – 559 p.

А. Т. Туленов[1], Б. Ж. Шойбеков[2], Г. Ж. Бекболатов[3],
Б. А. Омаров[4], Б. К. Кайролла[5]
[1,2,3,4]ЮКУ им. М. Ауэзова, Республика Казахстан, г. Шымкент
[5]Казахстанский институт науки и технологий, Республика Казахстан, г. Павлодар

ИЗМЕНЕНИЕ ЗАТРАТ В ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

Затраты, обеспечивающие работоспособность автомобилей, способствуют повышению эффективности транспортной логистики. Изменение этих затрат во времени, особенно экспоненциальный рост с увеличением пробега автомобилем, является важной проблемой в сфере транспортных услуг и перевозок.

В данной статье исследуется изменение затрат на обеспечение работы автотранспорта при его эксплуатации в транспортной логистике. Затраты, обеспечивающие работоспособность, существенно различаются в зависимости от пройденного автомобиля пути, технического состояния, режима работы и других факторов. В ходе исследования были проанализированы размеры и динамика затрат, необходимых для обеспечения работы автомобиля. Была представлена информация об изменении кривой износа, в частности, об уровне износа различных узлов автомобиля в ремонтных работах, таких как двигатель, колеса, рулевое управление и тормозные системы. Исследование показало, что затраты, связанные с обеспечением работоспособности автомобиля, растут экспоненциально пропорционально пройденному пути. В этой статье также были предложены математические модели, описывающие факторы, влияющие на работоспособность автомобиля, и их взаимосвязь. Полученные данные позволяют заранее прогнозировать и планировать затраты на ремонт с целью обеспечения эффективной работы автотранспорта.

Ключевые слова: работоспособность, затраты на ремонт, кривая износа, ремонтные работы, пройденный путь, техническое состояние.

A. Tulenov[1], B. Shoibekov[2], G. Bekbolatov[3], B. Omarov[4], B. K. Kairolla[5]
[1,2,3,4]M. Auezov SKU, Republic of Kazakhstan, Shymkent
[5]Kazakhstan Institute of Science and Technology, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

CHANGE OF COSTS IN CAR OPERATION PROVIDING ITS SERVICEABILITY

The costs that keep vehicles running contribute to the efficiency of transportation logistics. The variation of these costs over time, especially the exponential growth with increasing vehicle mileage, is an important issue in transport services and transportation.

In this article the change of expenses on maintenance of work of motor transport at its operation in transport logistics is investigated. Costs ensuring serviceability vary significantly depending on the distance travelled by the vehicle, technical condition, mode of operation and other factors. The study analysed the size and dynamics of the costs required to ensure the operation of the vehicle. Information was provided on the changes in the wear curve, in particular, the level of wear of various components of the car in repair work, such as the engine, wheels, steering and braking systems. The study showed that the cost associated with maintaining the serviceability of a vehicle increases exponentially proportional to the distance travelled. This paper also proposed mathematical models describing the factors affecting vehicle operability and their interrelationships. The obtained data allow predicting and planning repair costs in advance in order to ensure efficient operation of vehicles.

Keywords: serviceability, repair costs, wear curve, repair works, travelled distance, technical condition.

МРНТИ 73.29.11
DOI

*Р. С. Устемирова[1]
[1]Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2559-6899
e-mail: raigul_1980@mail.ru

ТЕМІР ЖОЛ ҚИСЫҚТАРЫНАН ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚПЕН ӨТУ КЕЗІНДЕ ЖОЛАУШЫ ВАГОНЫНЫҢ ЕҢКЕЮІН РЕТТЕУ ТУРАЛЫ

Қисықтардағы жылжымалы құрам шанағының көлбеуін реттеу бірнеше мәселелерге алып келуі мүмкін, олар: тұрақтандырудың жеткіліксіздігі: қисықтардағы жылжымалы құрам шанағының қатты қисаюы жолаушыларға ыңғайсыздық тудыруы мүмкін және кинетоз деп аталатын ауыр жағдайдың пайда болу қаупін арттырады; техникалық мәселелер: гидравликалық немесе пневматикалық жүйелер уақыт өте келе тозуы немесе сынуы мүмкін, бұл үнемі техникалық қызмет көрсетуді және бөлшектерді ауыстыруды қажет етеді.

Мақалада теміржол желісінің қисық телімдерінде пойыздар қозғалысының жоғары жылдамдығын сақтау мәселелері қарастырылған. Пойыздың қозғалыс жылдамдығы жоғарылаған кезде қисық телімнен өту кезеңінде жолаушыларға теріс әсер ететін күштер синхронды түрде күшейеді. Теміржол желісінің қисық телімдерінен өту кезінде артық орталықтан тепкіш күші бар вагон бұрылу қисықтығына қатысты сыртқа қарай еңкейе бастайды, нәтижесінде жолаушылар ыңғайсыздықты сезінеді.

Мақалада жолаушылар жылжымалы құрамының вагондарын жоғары жылдамдықта бұрылуды жүзеге асыру үшін теріс бағытта көлбеу күйге келтіру ұсынылады.

Бұл ұсыныс вагон шанағының екі белгілі еңкейту жүйесінің – активті (мәжбүрлі) және пассивті (инерциялық) еңкейту жүйелердің артықшылықтарын біріктіруден тұратын техникалық шешімге негізделген. Бұл жағдайда еркін айналатын роликтерде орналасқан вагонның шанағына осы күштің артық мәнін өтей отырып, орталықтан тепкіш күшке қатысты кері бағытта айналмалы қозғалыс беріледі. Вагон шанағын бұру арбалардағы корпустың төменгі жағында орналасқан серво-жетектердің көмегімен жүзеге асырылады.

Кілтті сөздер: жылдам қозғалыс, вагонның еңкею жүйелері, шанақтың еңкеюін реттеу, еңкею бұрышы, шанақтың бұрылу механизмі.

Кіріспе

Теміржол көлігінің өндірістік қызметінің басты жетістігі болып, оның қуатын арттыру, жүк және жолаушылар ағындарын ұлғайту, тасымалдауды жеделдету есебінен көлікпен қамтамасыз етуді арттыру болып табылады.

2019 жылы Қазақстан темір жолдары желісінің ұзындығы 16 040 км-ге жетті, оған 4 216 км электрлендірілген телім және 4 900 км қос жолды телім кіреді. Оның ішінде соңғы жылдары шамамен 4700 км жол жаңартылды [1].

Жылдам жолаушылар қозғалысын енгізу арқылы қалалар арасындағы жолаушылар қатынасын жақсарту ерекше өзекті мәселе болып саналады. «Қазақстан темір жолы» Ұлттық компаниясы» Акционерлік қоғамы (ҚТЖ) пойыздар қозғалысының жылдамдығын үнемі арттырып отырады. 2012 жылдан 2017 жылға дейін желі бойынша орташа жылдамдық 41,9 км/сағ-тан 44,2 км/сағ-қа дейін өсті [2]. Жыл сайын теміржол инфрақұрылымын нығайтуға бөлінетін қаражатты талдау көрсеткендей, жүріс уақытын одан әрі қысқарту барған сайын үлкен қаражатты талап етеді.

Қазіргі уақытта Қазақстанда «Тальго» вагондарынан құрылған жолаушылар пойыздарының бағыттары жұмыс істейді, олар Алматы мен Астанадан, басқа да теміржол бағыттары бойынша, оның ішінде көрші елдерге жылдам жүруді қамтамасыз етеді. Жыл сайын осындай пойыздармен маршруттар саны артып келеді.

Жоғары жылдамдықты жолаушылар қозғалысын ұйымдастыру магистралдық желі басқармасы 2010 жылы ҚТЖ басшылығының тапсырмаларына сәйкес бастады. Жоғары жылдамдықты жолаушылар қозғалысын қамтамасыз ету үшін магистралдық инфрақұрылымды дайындауға арналған іс-шаралар жоспары әзірленген және ол 2015 жылға дейін екі кезеңде орындалуы тиіс болған: 140 км/сағат жылдамдықпен және 2020 жылға дейін 200 км/сағат жылдамдықпен қозғалысты ұйымдастыру [3], дегенмен бүгінгі күнге дейін жолаушылар тасымалының жылдамдығы белгіленген мақсатқа жетпеді.

Материалдар мен әдістер

Теміржол көлігінің жылдамдығын арттыруға ұмтылысы қисық сызықты телімде қозғалыс кезінде жоғары жылдамдықты қамтамасыз ету мәселесіне байланысты. Жолдың түзу телімдерінің ұзындығы бүкіл темір жол желісінің шамамен 80 % құрайды, бірақ та әзірге ең жоғары қозғалыс жылдамдығына теміржол желісінің ұзындығы 11 % ғана қол жеткізілді [4]. Мысалы, ұзындығы 1333 км «Астана – Алматы» телімінде 81 бөлім пункті, 245 шағын радиусты қисық, 63 өткел орналасқан.

Вагон корпусының қисаюын реттеу - бұл пойыздарға жолаушыларға ыңғайсыздық сезінбестен жоғары жылдамдықпен бұрылуға мүмкіндік беретін технология. Еңкейетін пойыздардың алғашқы сәтті шешімдерін 1970 жылдары Испаниядағы Талго компаниясы әзірледі және 1980 жылдардың басында коммерциялық тұрғыдан қолдануды бастады.

Жолаушыларға орталықтан тепкіш күштердің әсерін азайту үшін қолданыстағы теміржол құрылымы жолдың қисық сызықты телімдерінде белгілі бір мөлшерде сыртқы рельстің көлбеуі болатындай етіп салынған. Сонымен бірге мұндай көлбеулер пайда болған орталықтан тепкіш күштердің орнын тек белгілі бір төмен жылдамдыққа дейін толтыра алады.

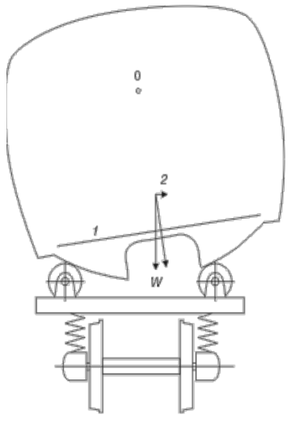
Құрамның қозғалыс жылдамдығын арттыру оның қозғалыс бағытына қатысты әрекет етуші бүйірлік күштерді пропорционалды түрде арттырады, бұл жолдың қисық сызықты телімінен өту кезінде жолаушыларға жағымды әсер етпейді.

Қисық телімде қозғалу кезінде артық орталықтан тепкіш күші бар вагон бұрылу қисықтарына қатысты сыртқа қарай еңкейе бастайды, бұдан вагон шанағының дұрыс емес еңкейту нәтижесінде жолаушылар ыңғайсыздықты сезінеді, сонымен қатар, вагон кшанағының «дұрыс емес» қимасында корпустың берілген қозғалыс профилінен қажетсіз асып кету орын алады.

Бұл жағдайда жолаушыларға әсер ететін артық орталықтан тепкіш күштің шамасы шамалы елеусіз болуы үшін вагон шанағының жағдайын кері бағытта реттеу қажет. Және де жүрдек пойыздан жолға түсетін жүктемелер өте жоғары болмауы және жолдың жай-күйін жарамды ұстап тұруға арналған пайдалану шығындарының күрт өсуіне әкеп соқтырмауы маңызды. Бұл дегеніміз, қисықтардан өткен кезде жоғары доғалық жылдамдықты жүзеге асыру үшін вагонға доғаның ішіне бағытталған көлбеу позиция беру керек.

Осы уақытқа дейін бұл үшін екі жұмыс режимі қолданылды: рельсті көлік құралының вагондары басқарушы және атқарушы элементтердің көмегімен көлденең бойлық оське қатысты бұрылыс доғасының ішіндегі тиісті бұрышқа еңкею беретін активті еңкейту жүйесін қолданды; немесе рельсті көлік құралының вагоны маятник тәрізді тербелу мүмкіндігімен ілінетін пассивті еңкейту жүйесі қолданылды, ал ішке бағытталған еңкейу қозғалысының доғасының бойлық осі әрқашан көлік құралының ауырлық центрінен жоғары болады [5].

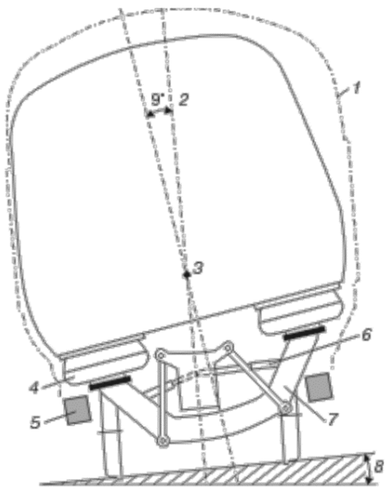
Вагон корпусының пассивті еңкею жүйесінің типтік мысалы 1-суретте схема түрінде көрсетілген [6].



1-сурет – Вагон корпусының пассивті еңкею жүйесі бар 381 сериялы электр пойызының құрылымдық схемасы:
1– шанақ еденінің деңгейі; 2 – орталықтан тепкіш күштің бағыты

Қ. С. Мұстапаев «пассивті жүйелер қисықтардағы әрекет ететін күштерді түрлендіруден гөрі қабылдайды» деп санайды [7]. А. М. Бржезовский мен В. И. Омельяненконың зерттеулеріне сәйкес «олар денені кішкене бұрышқа, әдетте 3–4° еңкейтуге мүмкіндік береді және көлденең үдеудің 45 % – на дейін өтей алады (мысалы, Talgo пойызы). Алайда, үлкен көлбеу бұрышы қисықтардың өту жылдамдығын едәуір арттыруға мүмкіндік береді, бірақ бұған тек активті (мәжбүрлі) көлбеу жүйелермен қол жеткізуге болады. Бірінші буынның активті жүйелері мәселенің шешімін айтарлықтай алға тартты: британдық эксперименттік APT электр пойызында еңкею бұрышы 9°-қа дейін, ал Pendolino итальяндық пойыздарында 10,5°-қа дейін жеткізілді. Мұндай бұрыштар вагонның шанағына әсер ететін және оны бойлық оське қатысты мәжбүрлеп бұратын жетек құрылғылары бар домкраттар жүйесін қолданумен қамтамасыз етіледі. Бұл жағдайда вагонның көлденең бағытта қозғалысы белгілі бір доға бойымен жүреді, осылайша ол жылжымалы құрамның габаритінен асып кетпейді. Ол үшін шанақты арбаларға жанасатын аралық элементтер арқылы тіреу қажет» [8, 9].

2 – суретте көрсетілген APT пойызы вагон шанағының классикалық активті қисаю жүйесінің мысалы болып табылады.



2-сурет – Вагон шанағының активті қисаю жүйесі бар пойыздың сызбасы:
1-вагон шанағының габариті; 2-тік ось пен 3-көлбеу осі арасындағы шанақтың еңкею бұрышы; 4-пневморессор; 5-арбаның жақтауы;
6-шанақты еңкейтуге арналған домкрат; 7-арба арқалығы

Нәтижелер және талқылау

Жолдың қисық бөлігінде қозғалыс кезінде вагон шанағын еңкейтудің аталған әдістерінің әрқайсысының кемшіліктері бар: пассивті еңкейту жүйелерін қолданған кезде вагонның бұрылу бұрышы аз болады; активті еңкейту жүйелерін қолданған

кезде қажетті көлбеу бұрышқа қол жеткізуге болады, және де қолданылатын түріне байланысты басқару жүйелері мен бұрылу механизмі қымбатқа түсуі мүмкін. Вагонның айналу полюсінің орналасуына байланысты оның жалпы өлшемдері бірдей емес болуы екі әдіс үшін де ортақ кемшілік болып табылады.

Кейбір зерттеушілердің бұл конструкцияның кемшіліктері оның өте күрделі болуы мен жоғары құны, өндірістің төмен өнімділігі және жұмыс кезінде төмен экономикалық тиімділік болып табылады деп есептейді.

Сонымен қатар, құрылғыда гидравликалық цилиндр мен гидравликалық жіктеуші қолданылады және олардың жұмыс істеуі үшін локомотивте қосымша гидравликалық жүйенің болуын керек. Олар әдетте локомотивтерде жоқ және қосымша энергия мен техникалық қызмет көрсету шығындарын қажет етеді. Құрылғы локомотивте бар жүйелерді (мысалы, тежегіш) жетек үшін пайдаланбайды» [10].

Пассивті еңкейту жүйелер қолданған кезде, активті еңкейту жүйелермен салыстырғанда, шығындар айтарлықтай төмендейді.

Осыған байланысты 1-ВМ габаритті екі арбалы төрт осьті жолаушылар вагонының мысалында көрсетілген екі жүйенің артықшылықтарын біріктіруден тұратын әдіс ұсынылады (3-суретті қараңыз).



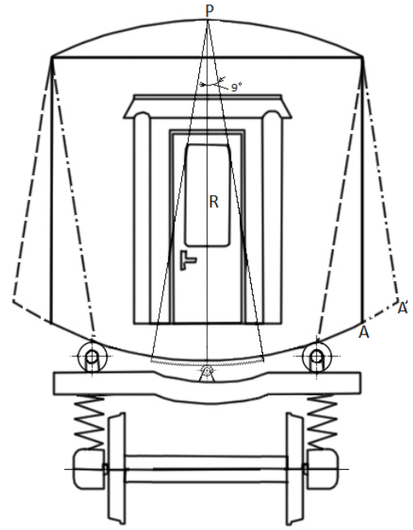
3-сурет – 1 ВМ габаритті жолаушылар вагоны

Бұған келесі тәсілге сәйкес қол жеткізіледі.

1-суретте көрсетілген пассивті жүйеге қисық сызық бойымен қозғалу кезінде беріліс механизмі арқылы көлбеу реттегішті құрайтын активті еңкейту жүйе элементтері қолданылады. Бұрылу механизмі вагон шанағының бұрылыс доғасына қатысты сыртқы жағына еңкейіп, бұрылыс доғасының ішкі жағына еңкейтуге ұмтылысын реттейді. Сонымен қатар, бұл тәсіл аталған қозғалысты қамтамасыз ету үшін кеңінен танымал механизмдер мен элементтерді қолданады. Тісті берілістер көптеген механизмдер мен машиналарда кеңінен қолданылады. Тісті берілістердің артықшылықтарына мыналар жатады: олардың жинақы болуы, техникалық қызмет көрсетудің қарапайымдылығы, беріктігі мен сенімділігі, беріліс коэффициентінің тұрақтылығы. Осыған байланысты тісті берілістер басқа механикалық берілістер арасында кең таралды.

Вагонның негізіне бекітілген доғаның шеңберінің радиусы оның биіктігіне және тісті доңғалақтың радиусына тең болатындығын ескере отырып

Вагонның негізіне бекітілген доғаның шеңберінің радиусы оның биіктігіне тең екенін және вагонды қажетті бағытта айналдыратын беріліс радиусы одан әлдеқайда аз екенін ескере отырып, есептеулерде айналмалы қозғалысты үдемеліге айналдыратын сыртқы ілінісі бар тісті беріліс тәсілін қолдануға болады. Мысалы, 1-ВМ габаритті жолаушылар вагоны үшін полюстен негізге дейінгі биіктік R=3250 мм (4-суретті қараңыз), ол тісті доңғалақ радиусынан 20 есе асады.



4-сурет – Көлбеу реттегіші бар жолаушылар вагоны:
Р-вагонның полюсі (вагонның жоғарғы нүктесі); R-вагонның айналу шеңберінің радиусы (полюстен негізге дейінгі биіктік)

Айналу жылдамдығы салыстырмалы түрде төмен болған кезде ашық берілістерде тік тістері бар тісті доңғалақтар қолданылады, олардың беріліс коэффициенті келесі өрнекпен анықталады

$$i = \frac{z_2}{z_1}, \qquad (1)$$

мұндағы z_1 и z_2 – бұрыштық жылдамдық және беріліс тістерінің саны.

Бұл жағдайда жоғары дәлдіктегі тісті берілістер үшін айналмалы жылдамдықтар 15 м/с дейін құрайды. Мұндай берілістер ең ұтымды болып табылады және ондаған мың кВт-қа дейінгі қуаттарды беру үшін қолданылады, олар 9° - қа дейінгі бұрылу бұрышын өтеу үшін қисықтардан өткен кезде вагондардың айналуын қамтамасыз ете алады.

Біздің жағдайда, еңкею (қисаю) бұрышы 9° болғанда, вагон жақтауының шеткі сыртқы нүктесі шамамен 0,5 м қозғалады және А/ күйіне өтеді. Тиісінше, тісті берілістердің қажетті айналмалы жылдамдығы 0,25 м/с аспайды.

Ол үшін тісті механизм түріндегі еңкею (қисаю) компенсаторлары әр арбаның жақтауына орнатылып, вагон шанағының арасына орналастырылады. Тиісінше, 1-ВМ вагонның екі арба шанағы үшін бұл механизм екі жерде орнатылады. Беріліс механизмінің айналмалы қозғалысы жеке электр сервомоторының көмегімен жүзеге асырылады. Басқару сигналдары сервоқозғалтқыштарға жалпы басқару блогынан келеді, онда олар пойыздың жүру жылдамдығы, құрамның ұзындығы, қисық радиусы және сыртқы рельстің белгілі бір көлбеу бұрышын қамтамасыз ету үшін үйінді биіктігінің шамасы сияқты параметрлерді есептеу арқылы қалыптасады.

Алғашқы екі параметр қозғалыс басталар алдында басқару жүйесіне салынады, ал соңғы екеуі – жолдың әрбір учаскесі (бөлім пункттер, қисықтар, өткелдер) геометриялық сипаттамалары бар алдын ала анықталған және басқару бағдарламасына енгізілген теміржол маршруттарының дерекқорында сақталады. Пойыз қозғалған кезде орнатылған навигациялық жүйе вагондардың сервоқозғалтқыштарын басқарады, сондай-ақ қозғалыс процесінде құрамды GPS сигналдары арқылы үнемі түзетіледі.

Ұсынылған жүйенің жұмыс принципі келесідей: вагондардың арба мен тік оське қатысты позициясын басқару жүйесі бар теміржол құрамы жолдың көлденең бағытында, жолдың қисық сызықты учаскесінен өту кезінде келесідей жұмыс істейді: жолаушылар пойызының локомотив машинисі локомотивті іске қосады және жолаушыларды отырғызу алдында бүкіл жүйенің жарамдылығын тексереді: көлбеу бұрышын қолмен орнатады (мысалы, 30) және құрамның барлық вагондарын бұру механизмдерін қосады, алдымен бір жаққа, содан кейін бастапқы қалыпқа қайтарады; сол сияқты екінші жаққа да. Бұл ретте әрбір арбаның сервожетектеріне кернеу беріледі, одан олар қажетті позицияларды алады: вагонның теміржол төсеміне қатысты перпендикуляр орналасуы кезінде-еңкейту реттегіші нөлдік күйде болады; вагонның позициясы вагон полюсінен төмен түсірілген вертикальға қатысты ауытқу кезінде –еңкейту реттегіші вагонды қарама-қарсы бағытта, яғни қисық центріне қарай бұра бастайды. Бұл жағдайда сервожетектер айнала бастайды және айналу моменттерін жасай бастайды, олар жетек берілістерімен вагондардың негізінде бекітілген доға тәрізді дөңгелекке беріледі. Құрамды маршрут бойынша жібермес бұрын машинист автоматты жұмыс режиміне қояды.

Теміржол құрамы жолдың қисық сызықты теліміне кірген кезде бірінші вагонның сервоқозғалтқыштарына жылжымалы құрамның кинематикалық параметрлерін және жол учаскесінің статикалық параметрлерін сипаттайтын, орамның оңтайлы бұрышына және доға тәрізді дөңгелектің айналу жылдамдығына түрлендірілетін сигнал түседі. Бұл жағдайда екі арба вагоны жағдайында әр арбаға орналастырылған екі сервоқозғалтқыш синхронды түрде айналады, яғни бірдей сигнал алады. Сол сияқты, вагондардың шанағын айналдыратын қалған

сервожетек те жұмыс істейді: олар жолдың қисық сызықты бөлігіне кірген сәттен бастап одан шығуға дейін.

Вагон жолдың қисық сызықты телімінен шықпас бұрын, бірінші вагонның алғашқы екі арбасының серво жетектерінің қайтарушы сәті вагонды тік күйге қайтара бастайды.

Нәтижесінде барлық көрсетілген қозғалыстар жолдың қисық сызықты телімдерінде оның қозғалысы кезінде жолаушылар поездары вагондарының шанақтарының еңкеюін автоматты реттеуге әкеледі. Атап айтқанда, вагон шанағының ең қолайлы жағдайы максималды еңкейтудің орнына аударылу қамтамасыз етіледі. Вагондар үшін де, жолаушылар үшін де осындай қолайлы жағдай жасалған кезде, жалпы осындай учаскелерде пойыздың қозғалыс жылдамдығын арттыру мүмкіндігі пайда болады. Нәтижесінде рельстерге доңғалақ жоталарының бүйірлік қысымы төмендейді; «вагон-арба-доңғалақ-рельс» бірыңғай жүйесіне теріс әсер ететін бүйірлік динамикалық жүктемелер төмендейді; жолдың қисық сызықты теліміндегі қозғалыс кезінде теміржол құрамының қозғалысына қарсылық төмендейді; дөңгелектердің, рельстердің және басқа бөліктердің тозуы төмендейді; вагондардың жүрісі артады; отын немесе электр энергиясын тұтыну азаяды; пайдалану және жөндеу шығындары азаяды, ең бастысы – жолаушылардың әл-ауқатына теріс әсер азаяды.

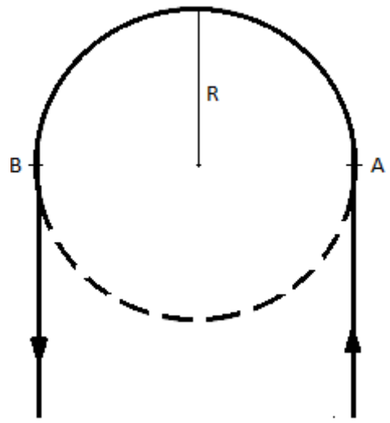
Бұл ретте теориялық есептеулерде Е. Т. Әуесбаевтың жұмысында көрсетілгендей өтпелі қисықтың ең аз ұзындығының критерийін де ескеру қажет [11] және 1-кестеге сәйкес көрсетілген параметрлердің бір-біріне тәуелділігін белгілеу қажет.

1-Кесте – Пойыз жылдамдығының теміржол жолының геометриялық параметрлеріне тәуелділігі

Параметрлер	Мәндер					
Пойыз жылдамдығы, км / сағ	115	120	120	130	135	140
Дөңгелек қисықтың радиусы, м	600	800	1000	1200	1500	2000
Сыртқы рельстің көтерілуі, мм	150	110	70	40	30	10
Өтпелі қисықтың минималды ұзындығы, м	100	80	70	40	30	0

- пойыздың жылдамдығы-100 км/сағ;
– дөңгелек қисықтың радиусы-500 м.

Мұндай жағдайларда локомотив қисыққа (А нүктесінде) еніп, одан (В нүктесінде) шамамен бір минут ішінде (56 сек) шығады (5- суретті қараңыз). Доғаның максималды ұзындығы $\overset{\frown}{AB}$ 1570 м құрайды, 30 вагон құрамына енген кезде ұзындығы 735 м құрайды, бұл жағдайда композиция 83 секундта жолдың қисық сызықты бөлігінен толығымен шығады.



5-сурет – R=500 м радиусы бар қисықтағы жылжымалы құрамның қозғалысының сызбасы

Бойлық оське қатысты және бұрылыс полюсі төмен орналасқан кезде тербелмелі қозғалыстарда жайлылықты арттыру мақсатында шанақтың еңкейту реттегішін вагонның серіппелі ілу жүйесінде орналастыра отырып, қосымша көлденең серіппелерді қарастыруға болады. Айналу механизмінің жетегінде көлбеу бұрыштарын шектейтін командалық аппараттар бар. Сонымен қатар, көлденең серіппелер энергия алмасуды және көлбеу қозғалысты демпферлеуді қамтамасыз етеді, ал өз осьтеріне қатысты еркін айналатын екі роликті доңғалақ «балама немесе кумулятивті түрде интегралды бойлық үлкейтуге, сондай-ақ тік апаттық тірек/көтерілуден қорғауға және қисықтардан өткен кезде вагонның көлденең қимасының жылдамдыққа тәуелді шектелуіне» мүмкіндік береді [5].

Ол үшін роликті дөңгелектер резеңке бандаждармен немесе қажетті бойлық люфт және бойлық бағытта қажетті қаттылықты қамтамасыз ететін бағыттағыштары бар арнайы пішінде жасалады.

Бұрылу механизмі апатқа ұшыраған кезде немесе электр энергиясын беруді тоқтатқан кезде, вагонның бұрылған шанағы бастапқы орнына оралады, өйткені ауырлық орталығы айналу осінен шамамен 1625 мм төмен орналасқан.

Айналу механизмінің жетегі вагон шанағының, жолаушылардың, багаждың және жабдықтың салмағынан жылжымалы роликті клиптердің салмағынан, роликті тіректердегі үйкеліс күштерінен және жетектің анықталмаған қозғалысы кезіндегі динамикалық моменттердің қосындысына тең айналу моментін дамытады. Сондай-ақ, есептеулерде вагон шанағына көрсетілетін Қазақстанның климаттық жағдайындағы жел жүктемесін ескеру қажет. Электр қозғалтқышының қуатын табу үшін дискіні іске қосу кезеңінде айналмалы массалардың инерция күштерінен динамикалық момент те анықталады.

Шағын және орта радиустардың қисықтарында пойыздардың қозғалысы кезінде жағымсыз факторларды еңсеруге арналған шығындарды келесі формула бойынша анықтау ұсынылады:

$$\Delta З = (R^1 - R)\left[365n\left(\frac{l_t}{60}k_t + l_m + k_m\right) + G\left(\gamma e_y + \alpha e_p \frac{1.5 l_p}{\omega}\right)\right]10^{-2} \quad (2)$$

мұндағы R^1 – пойыздардың жылдамдығын шектемейтін қисық радиусы, м;
R – бар қисықтың радиусы, м;
n – қозғалыс жылдамдығы қисық радиусымен шектелетін пойыздар саны;
l_t – жолаушының жолда бір сағатты жоғалту құны;
l_m – бір пойыздың құны;
e_y – 1 млн т•км брутто жүктерді тасымалдауға арналған пайдалану шығыстары;
e_p – рельстердің тозуын ескеретін шығыстар;
k_p – қисық параметрлерін ескеретін коэффициент;
α – айналу бұрышының мәні;
G – жүк кернеулігі, млн т ,брутто/жыл;
ω – рельстердің тозуы рұқсат етілген мөлшерден пайызбен;
γ – пайдалану шығындарын бөлудің пропорционалдылық коэффициенті.

2-формула бойынша жасалған есептеулер шығындарды дәл бағаламайды, алайда олар әр түрлі радиустағы қисықтарды қалпына келтіру шығындарының айырмашылығын жеткілікті дәлдікпен белгілей алады.

Қорытынды

Осылайша, вагон корпусының еңкейту реттегішін қолдана отырып ұсынылған тәсіл вагон рамасының бұрылыс доғасына көлбеу бұрышын ұлғайту арқылы 1-ВМ вагондары бар жолаушылар пойыздарының жүру жылдамдығын арттыруға мүмкіндік береді, бұл, сайып келгенде, Жолаушылар тасымалы жылдамдығын арттыру, сондай-ақ жылжымалы құрамның механикалық жүйесінің барлық өзара әрекеттесетін бөліктерінің тозуын азайту мәселесін шешеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Оценка железнодорожного сектора для Казахстана. Центральноазиатское региональное экономическое сотрудничество, март 2021 г. Источник: https://www.carecprogram.org/uploads/CAREC-RSA-RU-KAZ-FA_1JUL2021.pdf

2 Дереккөз: Министерство национальной экономики РК, 2019.

3 Поедем быстрее : к 2014 году организация скоростного движения будет осуществлена со скоростью до 140 км/ч. // «Қазақстан теміржолшысы», 2011, № 49 (1416). – С. 4.

4 **Мусаева, Г. С.** Взаимодействие железнодорожного пути подвижного состава на скоростном участке железной дороги: автореф. дисс. … д-ра техн. наук: 05.22.06. – Алматы: 2007. – 30 с.

5 **Шнайдер, Р.** Устройство компенсации крена кузова вагона рельсового транспорта при прохождении кривых. Европейский патент № 0128126. Опубл. 15.01.93 г. Бюл. № 2.

6 **Дубровская, Т. А.** Обоснование проектных решений при реконструкции железных дорог для скоростного движения пассажирских поездов: дисс. … канд. техн. наук: 05.22.06. – М., 2014. – 156 с.

7 **Мустапаев, К .С.** Исследование перспектив внедрения скоростного движения поездов на железных дорогах Казахстана при взаимодействии пути и подвижного состава : дисс. … канд. техн. Наук : 05.22.07. – Алматы, 2010. – 125 с.

8 **Бржезовский, А. М.** Воздействие на путь вагонов электропоезда «Аллегро» (Pendolino SM6), оборудованных системой активного принудительного наклона кузова в кривых // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 5. – С. 16–23.

9 **Омельяненко, В. И.** Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирского движения // Локомотив-информ. – Харьков: Техностандарт. – 2008. – № 5. – С. 12–17.

10 Патент №2281872, Российская Федерация, МПК B 61 F 5/48, передние или задние тележки для локомотивов и моторных вагонов / [Никифоров Николай Иванович (RU), Никифоров Сергей Николаевич]; заявитель(и): [Никифоров Николай Иванович]. – Заявл. [2005-03-11]; опубл. [20.08.2006]. – 1 с.

11 **Ауесбаев, Е. Т.** Теория и практика подготовки железнодорожного пути к скоростному пассажирскому движению: автореф. дисс. … д-ра техн. наук: 05.22.06. – Алматы, 2004. – 45 с.

REFERENCES

1 Ocenka zheleznodorozhnogo sektora dlya Kazaxstana. Central`noaziatskoe regional`noe e`konomicheskoe sotrudnichestvo [Assessment of the railway sector for Kazakhstan. Central Asian Regional Economic Cooperation], mart 2021 g. Istochnik: https://www.carecprogram.org/uploads/CAREC-RSA-RU-KAZ-FA_1JUL2021.pdf

2 Istochnik: Ministerstvo nacional`noj e`konomiki RK, 2019.

3 Poedem by`stree : k 2014 godu organizaciya skorostnogo dvizheniya budet osushhestvlena so skorost`yu do 140 km/ch. // [Let’s go faster: by 2014, the organization of high-speed traffic will be carried out at speeds up to 140 km/h.] «Қазақстан temirzholshy`sy`», 2011, № 49 (1416). – P. 4.

4 **Musaeva, G. S.** Vzaimodejstvie zheleznodorozhnogo puti podvizhnogo sostava na skorostnom uchastke zheleznoj dorogi [Interaction of the railway track of rolling stock on the high-speed section of the railway]: avtoref. diss. … d-ra texn. nauk: 05.22.06. – Almaty`: 2007. – 30 p.

5 **Shnajder, R.** Ustrojstvo kompensacii krena kuzova vagona rel`sovogo transporta pri proxozhdenii krivy`x [A device for compensating the roll of a railcar body during the passage of curves]. Evropejskij patent № 0128126. Opubl. 15.01.93 g. Byul. № 2.

6 **Dubrovskaya, T. A.** Obosnovanie proektny`x reshenij pri rekonstrukcii zhelezny`x dorog dlya skorostnogo dvizheniya passazhirskix poezdov [Justification

of design solutions for the reconstruction of railways for high-speed passenger train traffic]: diss. … kand. texn. nauk: 05.22.06. – M., 2014. – 156 p.

7 **Mustapaev, K. S.** Issledovanie perspektiv vnedreniya skorostnogo dvizheniya poezdov na zhelezny`x dorogax Kazaxstana pri vzaimodejstvii puti i podvizhnogo sostava [A study of the prospects for the introduction of high-speed train traffic on the railways of Kazakhstan in the interaction of track and rolling stock]: diss. … kand. texn. nauk: 05.22.07. – Almaty`, 2010. – 125 p.

8 **Brzhezovskij, A. M.** Vozdejstvie na put` vagonov e`lektropoezda «Allegro» (Pendolino SM6), oborudovanny`x sistemoj aktivnogo prinuditel`nogo naklona kuzova v krivy`x //[Impact on the path of the Allegro electric train cars (Pendolino SM6) equipped with a system of active forced tilt of the body in curves] Vestnik VNIIZhT. – 2012. – № 5. – P. 16–23.

9 **Omel`yanenko, V. I.** Poezda s naklonyaemy`mi kuzovami dlya skorostnogo passazhirskogo dvizheniya // [Trains with tilted bodies for high-speed passenger traffic] Lokomotiv-inform. – Xar`kov: Texnostandart. – 2008. – № 5. – P. 12–17.

10 Patent №2281872, Rossijskaya Federaciya, MPK V 61 F 5/48, perednie ili zadnie telezhki dlya lokomotivov i motorny`x vagonov [Patent № 2281872, Russian Federation, IPC B 61 F 5/48, front or rear bogies for locomotives and motor cars] / [Nikiforov Nikolay Ivanovich (RU), Nikiforov Sergey Nikolaevich]; applicant(s): [Nikiforov Nikolay Ivanovich]. — Cl. [2005-03-11]; publ. [20.08.2006]. — 1 p.

11 **Auesbaev, E. T.** Teoriya i praktika podgotovki zheleznodorozhnogo puti k skorostnomu passazhirskomu dvizheniyu: avtoref [Theory and practice of railway track preparation for high-speed passenger traffic]. diss. … d-ra texn. nauk: 05.22.06. – Almaty`, 2004. – 45 p.

Р. С. Устемирова
Международный транспортно-гуманитарный университет,
Республика Казахстан, г. Алматы

О РЕГУЛИРОВАНИИ НАКЛОНА ПАССАЖИРСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ СКОРОСТНОМ ПРОХОЖДЕНИИ ПО КРИВЫМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ УЧАСТКАМ

В статье рассмотрены вопросы сохранения высокой скорости движения поездов на кривых участках железнодорожной линии. При повышении скорости передвижения поезда синхронно усиливается влияющие боковые в сторону движения силы, отрицательно действующие на пассажиров в период прохождения криволинейного участка. Вагон с избыточной центробежной силой при движении по кривому участку начинает наклоняться во внешнюю сторону по отношению к кривизне поворота, что в результате неправильного наклонения кузова пассажирам чувствуется дискомфорт. Предлагается придать наклонное положение вагону пассажирского подвижного состава в отрицательную сторону для осуществления поворота на высоких скоростях.

Указанное предложение основано на техническом решении, заключающимся в объединении преимуществ двух известных систем наклона кузова вагона – активной (принудительной) и пассивной (инерционной). При этом кузову вагона, расположенного на свободновращающихся роликах, придается вращательное движение в обратную сторону по отношению к центробежной силе, компенсируя избыточное значение этой силы. Поворот кузова вагона осуществляется с помощью сервоприводов, расположенных снизу кузова на тележках.

Ключевые слова: скоростное движение, системы наклона вагона, регулирование наклона кузова, угол наклона, механизм поворота вагона.

R. S. Ustemirova
International university of transport and humanities,
Republic of Kazakhstan, Almaty

ON COMPENSATION OF THE INCLINED POSITION OF A RAILWAY PASSENGER CAR WHEN PASSING CURVES WITH HIGH SPEED

In this paper, the issues of maintaining a high speed of train movement on curved sections of the railway track are considered. Increasing the driving speed simultaneously increases the forces acting lateral with respect to the direction of travel, which act unpleasantly on passengers during the passage of curves. A car passing with excessive centrifugal force along a curve, in the presence of an elevation on the track, tends to lean outward with respect to the arc. turn. As a result of the wrong direction of the angle of inclination, comfort is reduced.

It is proposed to give the car of a rail vehicle for the implementation of increased arc speeds an inclined position directed inside the arc.

In this paper, it is proposed to combine the advantages of an active tilting system along which the rail vehicle car was rolled relative to the horizontal rodoline base by the corresponding angle of inward rotation with the help of control and actuating elements, and the advantages of a passive roll system, along which the rail vehicle car was suspended with the possibility of swinging. like a pendulum, and the longitudinal axis of the inward roll motion is always above the center of gravity of the vehicle.

Keywords: high-speed movement, carriage tilt systems, body tilt control, tilt angle, carriage rotation mechanism.

ХИМИЧЕСКАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

МРНТИ 14.35.09
DOI

А. Ф. Вахгельт[1], *Е. В. Исаева[2], И. О. Муравлев[3],
О. М. Пономарева[4], Ю. П. Похолков[5]
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, Российская Федерация, г. Томск
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1121-3356
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4463-5812
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1454-2065
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-2379
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1310-8227
*e-mail: naiden@tpu.ru

СОЗДАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ КОММУНИКАТИВНОСТИ НА ИНОСТРАННОМ ЯЗЫКЕ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ С ВЫСШИМ ОБРАЗОВАНИЕМ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

В статье описывается уникальная экспериментальная методика развития коммуникативности на иностранном языке будущих инженеров, которая реализуется в Томском политехническом университете. Пилотный проект предполагает создание условий («компрессии») в процессе подготовки специалистов с высшим образованием в области техники и технологии, обеспечивающих необходимый уровень их коммуникативности в профессиональной/предметной сфере на иностранном языке без выделения дополнительных часов и занятий на его изучение. Методика основывается на интеграции языковых элементов непосредственно в содержание инженерных дисциплин, что позволяет избежать искусственного разделения языковой и профессиональной подготовки. Такой подход способствует более органичному освоению иностранного языка и повышает мотивацию студентов. Студентам предоставляется возможность повысить свой уровень владения профессиональным иностранным языком в рамках занятий по естественно-научных, общеинженерных и профессиональных дисциплинам в форме интерактива на английском языке в течение 10–15 минут в конце каждого занятия – «Итог», а также путем выделения часов из самостоятельной работы студентов на недельный «Интенсив» по инженерной тематике на английском языке. Проект еще в процессе реализации, но уже можно отметить первые положительные результаты и повышение уровня англоязычной коммуникативности студентов экспериментальной группы.

Ключевые слова: коммуникативность, английский язык, особенности преподавания, методика обучения, студент, интенсив.

Введение

В настоящее время иностранный язык является неотъемлемой частью программ высшего профессионального образования на всех уровнях от бакалавриата до аспирантуры, что указано в государственных образовательных стандартах. Вместе с тем, время, отведённое на его изучение, является недостаточным для того, чтобы выпускник технического ВУЗа имел хороший уровень коммуникативных компетенций, которые позволили бы ему быть подготовленным к профессиональной деятельности в международной среде.

К настоящему моменту разработано достаточно большое количество, в том числе инновационных методик преподавания иностранного языка для профессиональных целей [1; 2; 3; 4; 5]. Но чаще всего данные технологии нацелены на их использование в рамках занятий по (профессиональному) иностранному языку, которые хоть и непосредственно связаны с иноязычной коммуникацией будущих инженеров, имеют ограниченные временные рамки (чаще всего первые 1–2 учебные курсы). Таким образом к моменту окончания университета не все выпускники технических вузов имеют достаточный уровень коммуникативности на иностранном языке в предметной области для будущей профессиональной деятельности.

Как показывает практический опыт преподавания языков в технических ВУЗах, существует необходимость учета целого ряда особенностей у студентов инженерных специальностей [6; 7; 8]. В частности, делается вывод о том, что необходимо в обучении студентов английскому языку подходить комплексно, то есть с поэтапным применением современного спектра методик обучения [9]. Авторами предлагается методика интенсификации преподавания и изучения английского языка для студентов технических вузов. Поэтому, необходимо опираться на имеющийся личный опыт студентов, учитывая специфику выбранного направления, осуществлять важные виды языковой деятельности на уроках профессиональной подготовки, постепенно расширяя знания лексики по профессиональной тематике. Данное требование оформлялось в трудах классических лингвистов — М.В. Ляховицкий, Е.В. Рощина и других, которые предлагали обучение в вузе сделать максимально приближенным к практикориентированной среде [10]. На основе проведённых исследований получены и обобщены результаты инновационного подхода к преподаванию и обучению английского языка в Томском политехническом университете. Этот инновационный подход к преподаванию языков может масштабироваться и внедряться в образовательную деятельность повсеместно.

Повышение требований к уровню коммуникативности выпускников инженерных высших учебных заведений на иностранных языках является весьма значимым вызовом высшей школе, особенно в условиях необходимости обеспечения импортозамещения в области техники и технологии [11–13]. Применяемые в настоящее время технологии изучения иностранных языков и объём времени, предусмотренный для их изучения, не позволяют сформировать у студентов необходимый уровень коммуникативности на иностранном языке,

а, следовательно, не позволяют выпускникам вуза без труда использовать иностранный язык в профессиональной деятельности, успешно, устно и письменно, коммуницировать в профессиональной сфере на иностранном языке. Усугубляется эта ситуация и тем, что большая часть преподавательского состава вузов не владеет профессиональным иностранным языком в степени достаточной для успешного использования его в своей профессиональной предметной деятельности. Всё это не способствует мотивированию студентов к использованию иностранного языка в процессе изучения дисциплин учебного плана.

Ответ на указанный вызов может быть найден при использовании в учебном процессе в вузе «встроенной» технологии освоения профессионального (предметного) английского языка, экспериментальное апробирование которой реализуется на базе Учебно-научного центра «Системный анализ и управление в инженерном образовании» Томского политехнического университета в рамках пилотного эксперимента по программе «Приоритете 2030».

Цель экспериментального проекта – разработать и апробировать систему эффективной организации преподавания английского языка для студентов инженерных специальностей ТПУ, обеспечивающую заданный уровень их коммуникативности на английском языке.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс взаимосвязанных задач:

– разработать и реализовать план проведения эксперимента по реализации встроенной в текущий учебный процесс технологии освоения иностранного языка на различных этапах обучения студентов, обучающимся на различных инженерных образовательных программах;

– разработать и апробировать численные методы оценки уровня коммуникативности студентов инженерных вузов на английском языке;

– обосновать и установить требования к уровням коммуникативности на английском языке студентов на различных этапах обучения;

– разработать методические материалы для преподавателей («предметников»), регламентирующие технологии встраивания иностранного языка в учебный процесс по предмету;

– провести серию научно-методических семинаров по обсуждению результатов эксперимента.

В первом приближении, суть инновационной образовательной технологии освоения профессионального (предметного) английского языка, на внедрении которой построен эксперимент, заключается в использовании иностранного языка в интерактивном режиме при проведении групповых занятий по конкретным дисциплинам, в частности, при обсуждении итогов каждого проведённого занятия (10 – 15 минут).

Включение, встраивание английского языка в учебный процесс при изучении/освоении естественно-научных, общеинженерных и профессиональных дисциплин не приводит к сокращению временного ресурса, выделенного для изучения самих дисциплин, но позволяет создать условия для развития коммуникативности

студентов в предметной области. Использование совмещённого с остальными дисциплинами процесса освоения английского языка приведёт к повышению мотивации преподавателей к изучению иностранного языка и, в конечном итоге, к созданию в вузе языковой среды, позволяющей в целом повысить качество подготовки выпускников, укрепить инновационный имидж ТПУ, повысить его конкурентоспособность и привлекательность в мире.

Материалы и методы

В современных условиях в учебных программах технических специальностей по той или иной причине уменьшено количество часов, выделяемых на изучение иностранного языка. В результате этого уровень коммуникативных компетенций на английском языке является недостаточным для выпускников, попадающих в производственную среду, где используется английский язык (это передовые компании, использующие новейшие технологии и научные коллективы).

К этому приводит ряд факторов, таких, как:

– снижение объёма учебных поручений по изучению иностранного языка (при низком существующем уровне);

– недостаточное внимание предметной и профессиональной сферам при изучении иностранного языка;

– преимущественное развитие пассивных форм использования иностранного языка в процессе обучения;

– общий уровень языковой подготовки выпускников в профессиональной сфере остаётся низким;

– отсутствие управления языковой средой в вузе.

Для преодоления проблемы было высказано следующее предположение: включение английского языка в учебный процесс и самостоятельную работу студентов при изучении общеинженерных и профессиональных дисциплин позволит существенно повысить уровень коммуникативности студентов/выпускников ТПУ на английском языке в предметной и профессиональной сферах.

Для проверки этого предположения был проведён эксперимент при следующих условиях:

– Иностранный язык – английский.

– Набор дисциплин – общеинженерные, профессиональные.

– Число дисциплин – 24.

– Число преподавателей-предметников из числа, обеспечивающих дисциплины «Профессиональный английский язык» – 19.

– Число преподавателей английского языка – 2.

– Численность студентов в группе – не более 15 человек.

– Число студентов экспериментальной группы – 207.

– Проводится контроль результатов – на входе в эксперимент и по итогам обучения в семестрах (длительность обучения 3 семестра).

– Количество направлений инженерной подготовки – 7

– Электроэнергетика и электротехника.

– Химическая технология материалов современной энергетики.

– Биотехнологии.

– Химическая технология Chemical Engineering.

– Оптотехника.

– Прикладная геология.

– Нефтегазовое дело.

Был предложен следующий алгоритм проведения эксперимента.

1 Использовать английский язык в заключительной части каждого группового занятия по дисциплине (10–15 минут для подведения итогов на лекции, практическом занятии, семинаре, коллоквиуме, лабораторной работе) в интерактивном формате, с количеством слушателей не более 15 человек (предоставление студентам возможности для развития коммуникативности и освоения профессионального/предметного глоссария на английском языке). Проведение занятий в формате «Итог» обеспечивают преподаватели-предметники.

2 Организовывать однонедельные интерактивные интенсивные занятия («Интенсив» по методикам Д.Ю. Петрова) по конкретной тематике профиля или предмета подготовки, в рамках объема часов самостоятельной работы студентов [14], под руководством преподавателя (предоставление студентам возможности для развития коммуникативности и освоения профессионального/предметного глоссария на английском языке в компактной и интенсивной форме). Проведение занятий в формате «Интенсив» реализуется за счет совместной работы («тандема») преподавателей-предметников и специалистов-лингвистов.

3 Обеспечить эксперимент преподавателями профильных дисциплин, обладающими необходимой квалификацией, использующих профессиональный английский при обучении студентов в интерактивном формате (программы повышения квалификации, мастер-классы и т.п.).

4 Обеспечить программу преподавателями английского языка, обладающими необходимой квалификацией для проведения интенсивных занятий с использованием профессионального глоссария.

5 Организовать периодический контроль уровня коммуникативности студентов на английском языке в профессиональной предметной сфере.

Результаты и обсуждение

Эксперимент был запущен в осеннем семестре 2023-2024 уч.г. На данный момент идёт третий и последний семестр апробации. Можно говорить о следующих промежуточных результатах:

– разработаны методические документы по оценке уровня коммуникативности студентов на профессиональном (предметном) английском языке, общего освоения студентами английского языка и профессионального словаря;

– разработаны методические материалы по развитию коммуникативности студентов на профессиональном (предметном) английском языке в процессе СРС и выполнения творческих проектов;

– описаны регламенты проведения различных видов занятий по предметам (дисциплинам) инженерной образовательной программы, включающей

«встроенную» технологию освоения профессионального (предметного) английского языка студентами ТПУ;

– обсуждаются рекомендации по стимулированию профессорско-преподавательского состава к использованию иностранного языка в предметной области;

– спроектированы новые программы повышения квалификации ППС в области использования профессионального английского языка в учебном процессе;

– проводятся научно-методические семинары по обсуждению результатов эксперимента;

– разработаны методики проведения занятий «Итог» (15 минут в конце занятия при подведении итога);

– разработаны методики проведения занятий «Интенсив».

Выводы

Основные выводы и ожидаемые последствия реализации эксперимента:

1 Концепция впервые предлагает совершенствование компетенций студентов собственно по профессиональному иностранному языку, т.е. языку в сфере профессиональной/предметной деятельности.

2 Предлагаемый инструмент («встроенная» технология освоения иностранного языка) при изучении/освоении естественно-научных, общеинженерных и профессиональных дисциплин позволяет увеличить временной ресурс для освоения английского языка, без сокращения времени, выделенного для изучения профильных дисциплин.

3 Главным критерием освоения и использования иностранного языка студентами в профессиональной/предметной деятельности является развитие у них коммуникативности, т.е. способности коммуницировать на иностранном языке, передавать и принимать информацию в профессиональной/предметной сфере.

4 Использование «встроенной» технологии в учебном процессе при изучении/освоении естественно-научных, общеинженерных и профессиональных дисциплин усиливает возможности достижения запланированных по данным дисциплинам результатов обучения:

– во время обсуждения на английском языке итогов каждого проведенного занятия (10 –15 минут), когда акцент делается на результативности занятия;

– во время проведения «интесивов» на иностранном языке, когда студенты выполняют реальные задания и проекты из предметной/профессиональной области.

5 Совершенствование организационного плана проведения занятия, включающего подведение итогов, акцентирование внимания студентов на результатах содержательной составляющей в предметной области способствует развитию культуры преподавания, закреплению знаний у обучающихся и повышению качества образования студентов.

6 Повышение привлекательности (для абитуриентов) учебных программ за счет применения новых технологий обучения английскому языку.

7 Использование предложенной встроенной технологии освоения английского языка приводит к повышению мотивации преподавателей к изучению иностранного языка и, в конечном итоге, к развитию в вузе языковой среды, позволяющей в целом повысить качество подготовки инженеров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Савина, В. В.** Актуальные проблемы формирования мотивации к иноязычной активности у студентов неязыкового вуза // Глобальный научный потенциал. – 2024. – № 4–2 (157). – С. 17–21.

2 **Волчек, О. С.** Применение интегрированного подхода в обучении английскому языку студентов инженерных вузов // Сборник : Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции. / Под редакцией С. У. Увайсов.– Москва. – 2022. – С. 30–34.

3 **Насретдинова, Р. Р.** Обучение коммуникации на английском языке студентов юридического профиля // Международный научный журнал «Символ науки».– 2016. – № 8. – С. 127–131.

4 **B. Sanyasi Rao, I. S. V Manjula, G.** Suvarna Lakshmi. English Language proficiency of the professional students & Expectation of the Engineering Industry // Research Journal Of English (RJOE)V. – 2020. – Vol. 5(2). – P. 304–312.

5 **Akmal, A. N., Hidayati, N., & Farah, R. R.** Exploring the English needs of mechanical engineering students in ESP class Indonesian university context // English Learning Innovation. – 2020. Vol.1(1). – P. 17–23. – https://doi.org/10.22219/englie.v1i1.13130

6 **Соловьева, И. В.** Учебная мотивация и практика преподавания английского языка в неязыковом вузе // Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 6. – [Электронный ресурс]. – http://web.snauka.ru/issues/2012/06/15610 (дата обращения: 12.05.2025)

7 **Барышева, Е. В.** Особенности преподавания английского языка в вузах и ссузах студентам неязыковых специальностей. Теория и методика профессионального образования // Мир педагогики и психологии. – 2017. – №12(17). – С. 15–23.

8 **Образцов, П. И., Иванова, О. Ю.** Профессионально-ориентированное обучение иностранному языку на неязыковых факультетах вузов : учеб. пособие / под ред. П.И. Образцова. – Орел, 2005. – 114 с.

9 **Михайлов, В. В.** Особенности преподавания английского языка в техническом вузе // Перспективы Науки и Образования (электронный журнал). – 2018. – 4 (34). – С. 145–149. – [Электронный ресурс]. – https://pnojournal.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/08/pdf_180424.pdf (дата обращения: 12.05.2025).

10 **Ляховицкий, М. В.** Методика преподавания иностранных языков : учеб. пособие для филол. спец. вузов // – М : Высш. школа, 1981. – 159 с.

11 **Кузнецова, Н. Э.** Современные методики преподавания английского языка в высших учебных заведениях // В мире науки и искусства: вопросы филологии, искусствоведения и культурологии (электронный журнал). – 2014. – № 2(33). – Т. 1. – [Электронный ресурс]. – https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metodiki-prepodavaniya-angliyskogo-yazyka-v-vysshih-uchebnyh-zavedeniyah/viewer (дата обращения: 12.05.2025).

12 **Василенко, Д. В.** Преподавание иностранного языка в ВУЗе на современном этапе : Возможности и Вызовы // Научный Журнал. – 2018. – № 3. – С. 115–119.

13 **Калугина, О. А.** Профессионально–ориентированное обучение иностранным языкам посредством научно-исследовательской работы студентов // Гуманитарные науки. Вестник Финансового университета. – 2023. – 13(2). – С. 56–61. – https://doi.org/10.26794/2226-7867-2023-13-c-56-61

14 **Колобаев, В. К., Синицына, Т. А.** Психологические аспекты самостоятельной работы студентов по иностранному языку в неязыковом вузе // Научная дискуссия: вопросы педагогики и психологии: сб. ст. по материалам XLVII Международной научно-практической конференции «Научная дискуссия : вопросы педагогики и психологии». – М. : Изд-во : «Интернаука». – № 2 (47). – 2016. – С. 111–115.

REFERENCES

1 **Savina, V. V.** Aktual’nye problemy formirovaniya motivacii k inoyazychnoj aktivnosti u studentov neyazykovogo vuza [Current Issues in Developing Motivation for Foreign Language Activity among Non-Linguistic University Students] // Global’nyj nauchnyj potencial. – 2024. – № 4–2 (157). – P. 17–21.

2 **Volchek, O. S.** Primenenie integrirovannogo podhoda v obuchenii anglijskomu yazyku studentov inzhenernyh vuzov [The Application of an Integrated Approach in Teaching English to Engineering University Students] // Sbornik : Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tekhnologii. Sbornik trudov XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. / Pod redakciej S. U. Uvajsov.– Moskva. – 2022. – P. 30–34.

3 **Nasretdinova, R. R.** Obuchenie kommunikacii na anglijskom yazyke studentov yuridicheskogo profilya [Teaching English Communication to Law Students] // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Simvol nauki». – 2016. – № 8. – P. 127–131.

4 **B. Sanyasi Rao, I. S. V Manjula, G.** Suvarna Lakshmi. English Language proficiency of the professional students & Expectation of the Engineering Industry // Research Journal Of English (RJOE)V. – 2020. – Vol. 5(2). – P. 304–312.

5 **Akmal, A. N., Hidayati, N., & Farah, R. R.** Exploring the English needs of mechanical engineering students in ESP class Indonesian university context // English Learning Innovation. – 2020. Vol.1(1). – P. 17–23. – https://doi.org/10.22219/englie.v1i1.13130

6 **Solov’eva, I. V.** Uchebnaya motivaciya i praktika prepodavaniya anglijskogo yazyka v neyazykovom vuze [Academic Motivation and English Language Teaching Practice at a Non-Linguistic University] // Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. – 2012. – № 6. – [Electronic resource]. – http://web.snauka.ru/issues/2012/06/15610 (date of request:12.05.2025)

7 **Barysheva, E. V.** Osobennosti prepodavaniya anglijskogo yazyka v vuzah i ssuzah studentam neyazykovyh special’nostej. Teoriya i metodika professional’nogo obrazovaniya [Peculiarities of Teaching English to Non-Linguistic Students at Universities and Colleges: Theory and Methods of Vocational Education] // Mir pedagogiki i psihologii. – 2017. – № 12(17). – C. 15–23.

8 **Obrazcov, P. I., Ivanova, O. Yu.** Professional’no-orientirovannoe obuchenie inostrannomu yazyku na neyazykovyh fakul’tetah vuzov [Professionally Oriented Foreign Language Instruction at Non-Language University Faculties] : ucheb. posobie / pod red. P.I. Obrazcova. – Orel, 2005. – 114 p.

9 **Mihajlov, V. V.** Osobennosti prepodavaniya anglijskogo yazyka v tekhnicheskom vuze [Specifics of Teaching English at a Technical University] // Perspektivy Nauki i Obrazovaniya (elektronnyj zhurnal). – 2018. – 4 (34). – P. 145–149. – [Electronic resource]. – https://pnojournal.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/08/pdf_180424.pdf (date of request:12.05.2025).

10 **Lyahovickij, M. V.** Metodika prepodavaniya inostrannyh yazykov [Methods of Teaching Foreign Languages] : ucheb. posobie dlya filol. spec. vuzov // – M : Vyssh. shkola, 1981. – 159 p.

11 **Kuznecova, N. E.** Sovremennye metodiki prepodavaniya anglijskogo yazyka v vysshih uchebnyh zavedeniyah [Modern Methods of Teaching English in Higher Education Institutions] // V mire nauki i iskusstva: voprosy filologii, iskusstvovedeniya i kul’turologii (elektronnyj zhurnal). – 2014. – № 2(33). – T. 1. [Electronic resource]. – https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metodiki-prepodavaniya-angliyskogo-yazyka-v-vysshih-uchebnyh-zavedeniyah/viewer (date of request:12.05.2025).

12 **Vasilenko, D. V.** Prepodavanie inostrannogo yazyka v VUZe na sovremennom etape : Vozmozhnosti i Vyzovy [Foreign Language Teaching at University in the Contemporary Context] // Nauchnyj ZHurnal. – 2018. – № 3. – P. 115–119.

13 **Kalugina, O. A.** Professional’no–orientirovannoe obuchenie inostrannym yazykam posredstvom nauchno-issledovatel’skoj raboty studentov [Professionally Oriented Foreign Language Instruction through Students’ Research Activities] // Gumanitarnye nauki. Vestnik Finansovogo universiteta. – 2023. – 13(2). – P. 56–61. – https://doi.org/10.26794/2226-7867-2023-13-c-56-61

14 **Kolobaev, V. K., Sinicyna, T. A.** Psihologicheskie aspekty samostoyatel’noj raboty studentov po inostrannomu yazyku v neyazykovom vuze [Psychological Aspects of Independent Foreign Language Learning among Students at Non-Linguistic Universities] // Nauchnaya diskussiya: voprosy pedagogiki i psihologii: sb. st. po materialam XLVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Nauchnaya diskussiya : voprosy pedagogiki i psihologii». – M. : Izd-vo: «Internauka». – № 2 (47). – 2016. – P. 111–115.

***А. Ф. Вахгельт*[1],*Е. В. Исаева*[2], *М. О. Муравлев*[3],**
***О. М. Пономарева*[4], *Ю. П. Похолков*[5]**
Томск ұлттық зерттеу политехникалық университеті, Ресей Федерациясы, Томск қ.

ТЕХНИКА ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР САЛАСЫНДА ЖОҒАРЫ БІЛІМІ БАР МАМАНДАРДЫ ДАЯРЛАУ ПРОЦЕСІНДЕ ШЕТ ТІЛІНДЕ КОММУНИКАТИВТІЛІКТІ ДАМЫТУ ҮШІН ЖАҒДАЙЛАР ЖАСАУ

Мақалада Томск политехникалық университетінде жүзеге асырылатын болашақ инженерлердің шет тілінде коммуникативтілікті дамытудың бірегей эксперименттік әдістемесі сипатталған. Пилоттық жоба техника және технология саласында жоғары білімі бар мамандарды даярлау процесінде олардың шет тілінде кәсіптік/пәндік салада коммуникативтілігінің қажетті деңгейін қамтамасыз ететін, оны зерделеуге қосымша сағаттар мен сабақтар бөлінбестен жағдайлар жасауды («қысу») көздейді. Әдістеме тілдік элементтерді инженерлік пәндердің мазмұнына тікелей кіріктіруге негізделген, бұл тілдік және кәсіби дайындықты жасанды түрде бөлуден аулақ болуға мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл шетел тілін анағұрлым табиғи жолмен меңгеруге жағдай жасап, студенттердің уәждемесін арттырады. Студенттерге жаратылыстану-ғылыми, Жалпыинженерлік және кәсіптік пәндер бойынша сабақтар шеңберінде ағылшын тілінде интерактив нысанында әрбір сабақтың соңында 10-15 минут ішінде – «қорытынды», сондай-ақ ағылшын тілінде инженерлік тақырып бойынша бір апталық «қарқынды» студенттердің өзіндік жұмысынан сағат бөлу арқылы өзінің кәсіби шет тілін меңгеру деңгейін арттыруға мүмкіндік беріледі тіл. Жоба әлі де жүзеге асырылуда, бірақ алғашқы оң нәтижелерді және эксперименттік топ студенттерінің ағылшын тіліндегі қарым-қатынас деңгейінің жоғарылауын атап өтуге болады.

Кілтті сөздер: коммуникативтілік, ағылшын тілі, оқыту ерекшеліктері, оқыту әдістемесі, студент, қарқынды.

***A. F. Vahgelt*[1], *E. V. Isaeva*[2], *I. O. Muravlev*[3],**
***O. M. Ponomareva*[4], *Y. P. Pokholkov*[5]**
National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk

CREATION OF CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF FOREIGN LANGUAGE COMMUNICATION IN THE PROCESS OF TRAINING SPECIALISTS WITH HIGHER ENGINEERING EDUCATION

The article describes a unique experimental methodology for developing communication skills of future engineers in a foreign language, which is being implemented at Tomsk Polytechnic University. The pilot project involves the creation of conditions («compression») in the process of training specialists with higher education in the field of engineering and technology, ensuring the necessary level of their communication skills in the professional/subject field in a foreign language without allocating additional hours and classes for its study. The methodology is

based on the integration of language elements directly into the content of engineering disciplines, which makes it possible to avoid the artificial separation of language and professional training. This approach facilitates a more natural acquisition of the foreign language and enhances students' motivation. Students are given the opportunity to improve their level of proficiency in a professional foreign language within the framework of classes in natural sciences, general engineering and professional disciplines in the form of an interactive session in English for 10–15 minutes at the end of each lesson - «Result», as well as by allocating hours from independent work of students for a week-long «Intensive» on engineering topics in English. The project is still in the process of implementation, but we can already note the first positive results and an increase in the level of English-speaking communication among students in the experimental group.

Keywords: communication skills, English language, teaching features, teaching methods, student, intensive.

СТРОИТЕЛЬСТВО

SRSTI 67.09.41
DOI

A. K. Zhumabaev[1], * K. T. Makashev[2], S. N. Makhanov[3],
M. M. Ordabaev[4], A. Yu. Stolboushkin[5]
[1,2,3,4]Toraygirov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
[5]Siberian State Industrial University, Russian Federation, Novokuznetsk
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1203-1907
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2971-6322
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8758-3987
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9956-5998
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5747-9070
* e-mail: makashev.kt@teachers.tou.edu.kz

THE ADHESIVE JOINTS OF WOODEN STRUCTURES: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GLUED I BEAM

This research presents the results of an experimental campaign on glued wooden I-beams. The work involved two types of glued wooden beams technique. The key investigation parameters were the variation of bonding approaches on the OSB board (in grove, and side glue). The groove connection ensures uniform load distribution within the joint area. A force applied perpendicular to the surface of one component is evenly transmitted to adjacent parts through the ridge and tongue. The forces generated in the connection area are substantially lower than the bearing capacity of the connected elements, enhancing the structure's overall reliability. This approach increases the contact area between connected parts, thereby improving the strength and durability of the adhesive joint. The I-beam glued wooden beams prepared for the experiment were subjected to stress to determine the strength characteristics. The experimental program also aimed to analyze the influence of these beam bonding methods on the overall deformation behavior at different loading levels.

Keywords: I-beam, wood, glued, wooden bars, glued timber, OSB.

Introduction

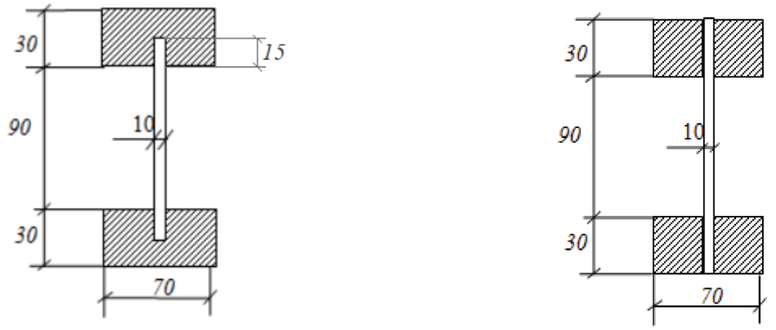
Adhesive bonding technology has been extensively researched over the years and has played a vital role in the development and expansion of rehabilitation and repair methods for timber structures, particularly through the use of adhesive joints as alternatives to mechanical ones [1; 2; 3; 4].

The widespread adoption of adhesive bonding is due to its following advantages: the ability of adhesive joints to distribute applied loads uniformly across the bonded area, resulting in more even stress distribution [5; 6]. Moreover, it causes minimal or no damage to the adherends, adds negligible weight to the structure, offers superior

fatigue resistance compared to other joining methods, is suitable for bonding dissimilar materials, and can help reduce manufacturing costs [7; 8]. However, despite these benefits, adhesives also have certain limitations. These include the need for careful surface preparation of the adherends, the requirement for joint designs that minimize peel and cleavage stresses, limited high-temperature resistance in some adhesives, vulnerability to service environment conditions, and difficulty in disassembling joints for inspection and repair [9; 10].

Materials and methods

In total 6 beams were manufactured for experimental studies in laboratory conditions. The beams were divided into two series, namely type-1 and type-2. Each series included three beams of approximately the same quality see Figure 1.



a) type-1 b) type-2

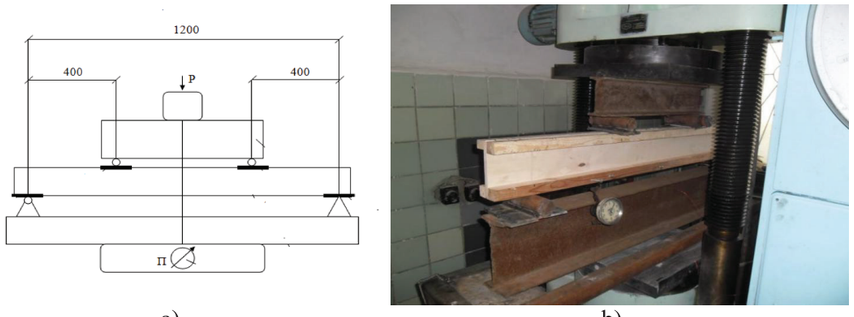
Figure 1 geometry of I-beams (all measurement in mm)

According to Figure 1 the beams of the type-1 series, has a groove with a depth of 15mm. After that, the glue was applied directly into the groove, which the OSB wall was inserted, then the shelf bars were connected using clamps and left to glue at room temperature for 3 days. After that, excess glue was removed.

In the beams of the second series, the wooden beams were connected to the wall directly with glue on both sides, after which the shelf bars were also connected using clamps and left to glue at room temperature for 3 days. After that, excess glue was removed.

The following materials were used to make the I-beam;

- wooden bars with a cross-section of 70 x 30;
- a cloth made of OSB 3 plate with a thickness of 10 mm and a cross-section size of 2500x1250 mm;
- PVA glue -801.



a) b)

Figure 2 – Test setup a) test setup (all measurement in mm); b) actual test setup

In accordance with Figure 2, the test bench is a traverse, which was made of an I-beam with a length of 1.3 m. Supports of our own manufacture were installed at the ends of the beam. A test beam was installed on the supports. A distribution beam was installed on the beam with the help of which the load was applied in thirds of the span in accordance with Picture 2

In order to prevent the wood from crumpling, rectangular steel plates with a thickness of 5 mm were placed on the supports and rollers.

The lengths were measured using a tape measure, and the crack diameters were measured with a caliper. Vertical movements of the beam were recorded by mechanical deflection.

Result and discussion

Table 1 represents the main outcomes of the experimental campaign, the figure 3 shows the load displacement plot. The glued beam with a flat OSB wall glued into the groove, which is shown in the figures (the maximum deflection was 9 mm at a load of 14,66 кН). The type 2 beam with a flat OSB wall with belts of wooden bars glued to the sides of the wall turned out to be the least durable – the maximum deflection is 7.8 mm at a load of 13,48 кН. The Failure mode of the specimens represents in Picture 3. The failure of beams begins with the destruction of the OSB wall and then extends to the wooden belts. Adhesive joints are strong, monolithic and have such low malleability that it can be ignored in calculations and the glued elements can be considered as solid, since no damage along the adhesive seam was observed during the experiments.

Table 1 – Test result

Specimen	Maximum Load [kN]			Displacement at a Peak load [mm]
	Mean	St. deviation	CoV	
Type-1	14,71	0,52	0,035	8,82
Type-2	13,48	0,87	0,065	7,60

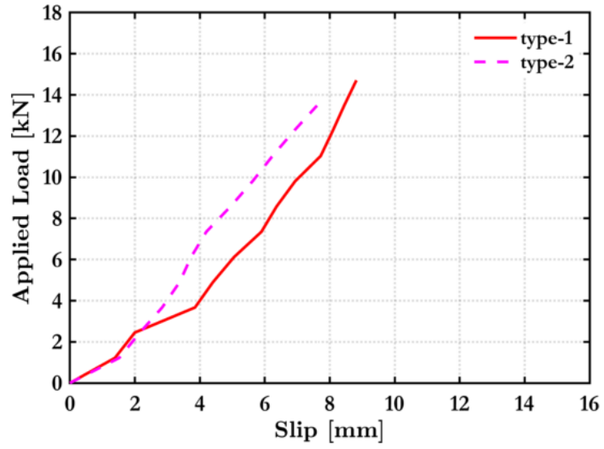
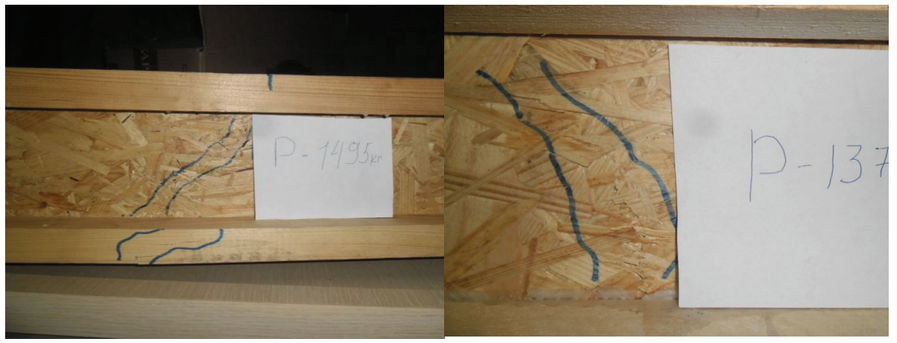


Figure 3 – Load displacement plot



a) b)

Figure 4 – Failure mode a) type-1; b) type-2

Result

The advantages of a beam connected in a groove include uniformity in load distribution in the joint area. A force perpendicular to the surface directed at one of the parts is equally applied by the ridge and tongue to adjacent parts. The forces appearing in the connection area are significantly less than the bearing capacity of the connected elements. It significantly improves the reliability of the structure. When using it, the

contact area of the connected parts increases, which means that the reliability of the adhesive joint also increases. Also, such a connection is more economical due to lower adhesive consumption.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Gledhill, R. A., Shaw, S. J., Tod, D. A.** Durability of adhesive-bonded joints employing organosilane coupling agents // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 1990. – Vol. 10. – № 3. – P. 192–198.

2 **Aruova, L. B. et al.** Cyclic Tests of Joints of Glued Wooden Structures // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 829. – № 1. – P. 012017.

3 **Borges, C. S. P. et al.** Sustainable Development Approaches through Wooden Adhesive Joints Design // Polymers. – 2022. – Vol. 15. – № 1. – P. 89.

4 **Gomon, S. S. et al.** Improving the strength of bending elements of glued wood // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 36. – P. 217–222.

5 **Tusnin, A. R., Prokic M.** Experimental research of I-beams under bending and torsion actions // MCE. – 2015. – Vol. 53. – № 01. – P. 24–31.

6 **Smardzewski, J.** Strength of profile-adhesive joints // Wood Science and Technology. – 2002. – Vol. 36. – № 2. – P. 173–183.

7 **Custódio, J., Broughton, J., Cruz, H.** A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2009. – Vol. 29. – № 2. – P. 173–185.

8 **Миронова, С. И., Тихомиров, А. В., Кирютина, С. Е.** Изучение стойкости клеевых соединений деревянных конструкций на основе однокомпонентного полиуретанового клея к температурно-влажностным воздействиям // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №2 (61). – 90–95 с.

9 **Кузнецов, И. Л., Гимранов, Л. Р., Крайнов, И. В.** Разработка и исследование клеефанерной двутавровой балки // Известия КазГАСУ. – 2013. – № 2 (24). – 108-112 с.

10 **Овсянников, С. И., Шаповалов, Д. Ю.** Повышение прочности клеевых соединений деревянных конструкций // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т. 4. – № 4. – 36–41 с.

REFERENCES

1 **Gledhill, R. A., Shaw, S. J., Tod, D. A.** Durability of adhesive-bonded joints employing organosilane coupling agents // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 1990. – Vol. 10. – № 3. – P. 192–198.

2 **Aruova, L. B. et al.** Cyclic Tests of Joints of Glued Wooden Structures // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 829. – № 1. – P. 012017.

3 **Borges, C. S. P. et al.** Sustainable Development Approaches through Wooden Adhesive Joints Design // Polymers. – 2022. – Vol. 15. – № 1. – P. 89.

4 **Gomon, S. S. et al.** Improving the strength of bending elements of glued wood // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 36. – P. 217–222.

5 **Tusnin, A. R., Prokic, M.** Experimental research of I-beams under bending and torsion actions // MCE. – 2015. – Vol. 53. – № 01. – P. 24–31.

6 **Smardzewski, J.** Strength of profile-adhesive joints // Wood Science and Technology. – 2002. – Vol. 36. – № 2. – P. 173–183.

7 **Custódio, J., Broughton, J., Cruz, H.** A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2009. – Vol. 29. – № 2. – P. 173–185.

8 **Mironova, S. I., Tikhomirov, A. V., Kiryutina, S. E.** Izuchenie stojkosti kleevyh soedinenij derevyannyh konstrukcij na osnove odnokomponentnogo poliuretanovogo kleya k temperaturno-vlazhnostnym vozdejstviyam [Study of the resistance of adhesive joints of wooden structures based on one-component polyurethane adhesive to temperature and humidity effects] // Bulletin of Civil Engineers. – 2017. – №2 (61). – P. 90–95.

9 **Kuznetsov, I. L., Gimranov, L. R., Krainov, I. V.** Razrabotka i issledovanie kleefanernoj dvutavrovoj balki [Development and research of glued plywood I-beam] // News KSUAE. – 2013. – № 2 (24). – P. 108–112.

10 **Ovsyannikov, S. I., Shapovalov, D. Yu.** Povyshenie prochnosti kleevyh soedinenij derevyannyh konstrukcij [Increasing the strength of adhesive joints in wooden structures] // Journal of Science and Education of North-West Russia. – 2018. – Vol. 4. – № 4. – P. 36–41.

А. К. Жумабаев[1], *К. Т. Макашев[2], С. Н. Маханов[3], М. М. Ордабаев[4], А. Ю. Столбоушкин[5]
[1,2,3,4]Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[5]Сібір мемлекеттік индустриалды университеті,
Ресей Федерациясы, Новокузнецк қ.

АҒАШ ҚҰРЫЛЫСТАРДЫҢ ЖІБІЛМЕГІ ТҮЙІНДЕРІ: ЖЕЛІМІЗГЕН І БӨЛІКТІ ЭКСПЕРИМЕНТТЫҚ ЗЕРТТЕУ

Бұл зерттеу желімделген ағаш І-арқалықтар бойынша эксперименталды науқанның нәтижелерін ұсынады. Жұмысқа желімделген ағаш арқалық техникасының екі түрі қатысты. Негізгі зерттеу параметрлері OSB тақтасындағы (тоғайдағы және бүйірлік желімдегі) байланыстыру тәсілдерінің өзгеруі болды. Ойық қосылым түйісу аймағында жүктеменің біркелкі таралуын қамтамасыз етеді. Бір құрамдас бөліктің бетіне перпендикуляр әсер ететін күш қыр мен тіл арқылы көршілес бөліктерге біркелкі беріледі. Қосылу аймағында пайда болатын күштер құрылымның жалпы сенімділігін арттыра отырып, қосылған элементтердің көтеру қабілетінен айтарлықтай төмен. Бұл тәсіл қосылған бөліктер арасындағы байланыс аймағын ұлғайтады, осылайша жабысқақ қосылыстың беріктігі мен беріктігін жақсартады. Экспериментке дайындалған І-сәулелі желімделген ағаш арқалықтар беріктік сипаттамаларын анықтау үшін кернеуге ұшырады. Эксперименттік бағдарлама сонымен қатар сәулелерді байланыстырудың осы әдістерінің әртүрлі жүктеме деңгейлеріндегі деформацияның жалпы әрекетіне әсерін талдауға бағытталған.

Кілтті сөздер: І-арқалық, ағаш, желімделген, ағаш барлар, желімделген ағаш, OSB.

А. К. Жумабаев[1], *К. Т. Макашев[2], С. Н. Маханов[3], М. М. Ордабаев[4], А. Ю. Столбоушкин[5]
[1,2,3,4]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[5]Сибирский государственный индустриальный университет,
Российская Федерация, г. Новокузнецк

КЛЕЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛЕЕНОЙ ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ

В этом исследовании представлены результаты экспериментальной работы по клееным деревянным двутавровым балкам. В работе использовались два вида клееных деревянных двутавровых балок. Ключевыми параметрами исследования были различные способы склеивания с доской OSB (с применением пазов и приклеиванием к боковой стороне). Соединение в паз обеспечивает равномерное распределение нагрузки в области стыка. Усилие, приложенное перпендикулярно поверхности одной детали, равномерно передается на соседние детали через выступ и шпунт. Усилия, возникающие в области соединения, существенно ниже несущей способности соединенных элементов, что повышает общую надежность конструкции. Такой подход увеличивает площадь контакта между соединенными деталями, тем самым повышая прочность и долговечность клеевого соединения. Подготовленные для эксперимента двутавровые деревянные балки из клееного бруса были подвергнуты нагрузке для определения прочностных характеристик. Экспериментальная программа также была направлена на анализ влияния методов склеивания этих балок на общее деформационное поведение при различных уровнях нагрузки.

Ключевые слова: двутавровая балка, древесина, клей, деревянные бруски, клееная древесина, OSB.

МРНТИ 67.11.31
DOI

***В. А. Никитин[1], К. Т. Саканов[2]**
[1,2]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4905-2576
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2897-2947
e-mail: nik07.vv@gmail.com

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УКРЕПЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АРМИРОВАНИЯ

В данной статье исследуются современные подходы к использованию инновационной арматуры в строительстве железобетонных конструкций. Основной фокус сделан на композитных и полимерных материалах, которые обладают уникальными свойствами, такими как повышенная устойчивость к коррозии, сниженный вес и улучшенные механические показатели. Эти характеристики открывают широкие возможности для применения таких материалов в строительстве, особенно в условиях повышенной влажности или агрессивных сред. Однако, несмотря на очевидные преимущества, существуют и серьезные препятствия для массового внедрения новых видов арматуры. Среди них - недостаточная разработанность нормативных документов, высокая стоимость материалов и их ограниченная доступность на рынке. В статье также проводится анализ экономических аспектов использования инновационных решений, включая их влияние на общую стоимость строительства и сроки реализации проектов. Особое внимание уделено перспективам развития технологий армирования, которые направлены на повышение долговечности, надежности и эффективности железобетонных конструкций. Рассмотрены возможности оптимизации строительных процессов за счет внедрения новых материалов и технологий, а также необходимость их адаптации к современным требованиям отрасли. Важным аспектом работы является акцент на междисциплинарных исследованиях, которые могут стать ключом к разработке комплексных решений для преодоления существующих барьеров. Таким образом, статья не только подчеркивает преимущества арматуры нового поколения, но и предлагает практические рекомендации для ее более широкого применения в строительной практике.

Ключевые слова: арматура, железобетон, композитные материалы, полимерные материалы, коррозионная стойкость, долговечность, технологии.

Введение

Арматура играет ключевую роль в железобетонных конструкциях, обеспечивая их прочность, устойчивость к внешним нагрузкам и долговечность. На протяжении многих лет сталь оставалась основным материалом для армирования благодаря своей высокой механической прочности, доступности

и проверенным эксплуатационным характеристикам. Однако стальная арматура имеет существенные недостатки, главным из которых является склонность к коррозии, особенно в условиях повышенной влажности или воздействия агрессивных химических сред. Это требует дополнительных мер защиты и увеличивает затраты на эксплуатацию.

В последние годы в строительной отрасли активно развиваются и внедряются новые материалы для армирования, такие как композиты и полимеры. Эти материалы обладают рядом преимуществ, включая высокую коррозионную стойкость, повышенную прочность на растяжение и меньший вес. Их использование не только увеличивает срок службы железобетонных конструкций, но и снижает затраты на техническое обслуживание и ремонт, что делает их перспективными для современного строительства.

Материалы и методы

Одной из ключевых проблем, связанных с использованием стальной арматуры, является её подверженность коррозии. Этот процесс активизируется под влиянием агрессивных факторов окружающей среды, таких как высокая влажность, воздействие химических веществ и солей. Коррозия приводит к постепенному снижению прочности арматуры, что негативно сказывается на несущей способности железобетонных конструкций и может стать причиной их частичного или полного разрушения. В некоторых случаях потери прочности могут превышать 50 %, что напрямую зависит от условий эксплуатации [1, с. 16–22].

Одним из методов защиты стальной арматуры от коррозии является применение защитных покрытий, таких как оцинковка или полимерные составы. Однако в условиях агрессивной среды эти меры не всегда оказываются достаточно эффективными. Кроме того, нанесение таких покрытий связано с дополнительными финансовыми затратами и требует значительных трудовых ресурсов, что в конечном итоге увеличивает стоимость строительства.

Еще одним недостатком стальной арматуры является её большой вес, что создает трудности при транспортировке и монтаже. Использование тяжелых арматурных элементов требует привлечения специализированной техники, что также увеличивает расходы. Кроме того, проектирование конструкций с использованием стальной арматуры требует более сложных расчетов на прочность, что может привести к удорожанию и увеличению сроков реализации проектов.

Рост цен на металлы и необходимость применения защитных покрытий делают использование стальной арматуры всё менее экономически оправданным. Наблюдения за динамикой цен показывают, что стоимость этого материала значительно выросла за последние десять лет, что негативно сказывается на себестоимости строительства. В связи с этим многие компании начинают искать альтернативные решения, которые позволят снизить затраты как на строительство, так и на последующую эксплуатацию сооружений [2, с.6].



Рисунок 1 – Анализ цен на стальную арматуру за последние 10 лет с учетом инфляции в Республике Казахстан

Современная нормативная база, регулирующая проектирование железобетонных конструкций, в основном ориентирована на использование стальной арматуры. Это создает значительные трудности для специалистов, которые хотят применять в своих проектах современные материалы. Отсутствие четких стандартов и методических рекомендаций по использованию композитной и полимерной арматуры существенно ограничивает их применение в строительной отрасли. Для решения этой проблемы необходимо проведение научных исследований, направленных на разработку современных норм и методических рекомендаций для проектирования конструкций с использованием альтернативных видов арматуры [3].

Результаты и обсуждение

Современные строительные технологии и стремление повысить долговечность железобетонных конструкций привели к росту интереса к инновационным материалам для армирования. Развитие арматуры нового поколения, включающей композитные и полимерные материалы, открывает новые перспективы для строительной отрасли. Эти материалы не только решают проблемы, связанные с традиционной стальной арматурой, но и предоставляют значительные преимущества на всех этапах — от проектирования до эксплуатации конструкций. Среди современных видов арматуры, используемых в железобетонных конструкциях, можно выделить следующие:

– Композитная арматура, основу которой составляют стеклопластиковые или углепластиковые волокна. Она обладает высокой прочностью при значительно меньшем весе по сравнению со сталью, не подвержена коррозии и упрощает транспортировку и монтаж.

– Полимерная арматура, изготовленная из полимерных соединений, таких как полиэстер и винилэстр. Эти материалы отличаются высокой прочностью на растяжение и устойчивостью к агрессивным химическим воздействиям.

– Арматура из углеродных волокон, которая характеризуется малым весом, высокой прочностью и устойчивостью к коррозии. Благодаря этим свойствам она активно используется в строительстве высоконагруженных конструкций и в условиях агрессивной окружающей среды [4, с.60–96].

Арматура нового поколения имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционной стальной арматурой:

– Высокая стойкость к коррозии: использование композитных и полимерных материалов исключает риск ржавления, что увеличивает срок службы конструкций и снижает затраты на их обслуживание.

– Снижение массы: легкость таких материалов упрощает транспортировку и монтаж, сокращая строительные расходы и уменьшая нагрузку на фундамент.

– Стойкость к химическим воздействиям: композитная и полимерная арматура устойчива к агрессивным средам, что делает её идеальным выбором для промышленных объектов и инфраструктурных сооружений.

–Экономическая целесообразность: несмотря на более высокие первоначальные затраты, долговечность таких материалов и низкие эксплуатационные расходы обеспечивают значительную выгоду в долгосрочной перспективе [5, с. 14-15].

В современных строительных проектах всё чаще используются инновационные виды арматуры, такие как стеклопластиковая и полимерная, благодаря их улучшенным эксплуатационным характеристикам. Эти материалы отличаются высокой прочностью, малым весом и устойчивостью к коррозии, что делает их популярными в различных областях строительства. Стеклопластиковая арматура, изготовленная на основе стекловолокон, связанных полимерной матрицей, активно применяется при строительстве мостов и дорожных покрытий [6].

В крупных мегаполисах, таких как Берлин, Лондон, Бангкок и Нью-Дели, стеклопластиковая арматура активно используется при строительстве мостов. Она позволяет снизить вес конструкций и увеличить их срок службы. Например, в этих городах применение стеклопластиковой арматуры ускоряет строительные процессы благодаря её легкости и удобству в обработке. Кроме того, она обеспечивает надежную защиту от коррозии и агрессивных химических воздействий, что особенно важно для долговечности объектов.

Стеклопластиковая арматура также широко применяется в дорожном строительстве. Она используется для усиления асфальтобетонных покрытий и устройства временных дорог, что помогает увеличить срок службы дорожной инфраструктуры.

Полимерная арматура, включая стеклопластиковые разновидности, доказала свою эффективность и в подземном строительстве, особенно при возведении тоннелей и коммуникационных сооружений. Её высокая устойчивость к коррозии и длительный срок службы делают её незаменимой для объектов метро и других подземных комплексов, где традиционные металлические элементы быстро разрушаются.

Таким образом, страны, такие как Германия, Великобритания, Таиланд, Индия и Китай, всё чаще переходят на использование стеклопластиковых и полимерных

армирующих материалов. Это позволяет создавать более надежные и долговечные конструкции, которые сохраняют свои эксплуатационные характеристики на протяжении десятилетий, даже в условиях неблагоприятных внешних воздействий [7].

Несмотря на многочисленные преимущества, внедрение арматуры нового поколения сталкивается с рядом трудностей:

– Отсутствие стандартов: единые нормативы по проектированию и использованию композитных материалов пока не разработаны, что затрудняет их широкое применение.

– Экономические аспекты: первоначальные затраты на композитную арматуру могут быть выше, чем на традиционную стальную, что требует тщательного анализа выгоды с учетом долгосрочной эксплуатации.

– Недостаток опыта: ограниченное количество реализованных проектов с использованием новых видов арматуры вызывает сомнения у строительных специалистов и требует дополнительных исследований, тестирований и образовательных программ [8; 9].

Выводы

Использование инновационных материалов, таких как композитная и полимерная арматура, открывает новые горизонты для строительной отрасли. Эти материалы обладают рядом неоспоримых преимуществ, включая высокую коррозионную стойкость, сниженный вес и улучшенные механические свойства, что делает их перспективными для применения в условиях повышенной влажности и агрессивных сред. Однако их внедрение сталкивается с рядом вызовов, таких как отсутствие единых нормативных стандартов, высокая начальная стоимость и недостаток практического опыта.

Для успешного внедрения новых технологий необходима комплексная работа, включающая разработку нормативной базы, проведение дополнительных исследований и обучение специалистов. Только так можно обеспечить широкое применение арматуры нового поколения, что в конечном итоге приведет к созданию более долговечных, надежных и экономически эффективных строительных конструкций.

Таким образом, переход на современные материалы — это не только техническая необходимость, но и стратегический шаг, который позволит строительной отрасли выйти на новый уровень развития, отвечая современным требованиям устойчивости и эффективности [10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Вернигорова, В. Н., Королев, Е. В., Еремкин, А. И., Соколова, Ю. А.** Коррозия строительных материалов : монография. – М. : Палеотип, 2007. – 176 с.

2 **Зайцев, А. А., Петров, А. Е., Петренева, О. В.** Экономическое обоснование использования композитной арматуры. – Пермь : ПНИПУ, 2017. – 8 с.

3 ГОСТ 10922-2012. Арматурные и закладные изделия, их сварные, вязаные и механические соединения для железобетонных конструкций. – М. : Стандартинформ, 2013. – 36 с.

4 **Касимов, Р. Г., Белова, Т. К.** Инновации в строительстве и реконструкции зданий и сооружений : учебное пособие / Мин-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – Оренбург : ОГУ, 2021. – 119 с.

5 **Окольникова, Г. Э., Герасимов, С. В.** Перспективы использования композитной арматуры в строительстве // Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ). – 2015. – 21 с.

6 **Долгих, М. В., Федосова, О. Г., Дергач, И. А., Ондар, А. А.** Преимущества и недостатки применения композитной арматуры // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 10. – С. 298–300.

7 **Типтев, Д. Н., Овчинников, Н. Н.** Применение полимерной композитной арматуры при строительстве транспортных сооружений // Вестник Евразийской науки. – 2021. – № 2. – С. 1–12.

8 **Космачев, Ю. С.** Полимерные материалы в строительстве: от теории к практике. – М. : Строиздат, 2020. – 250 с.

9 **Калистратов, В. И., Сидоров, А. В.** Композитные материалы в строительстве. – СПб. : Профиздат, 2021. – 180 с.

10 **Петлина, Е. В., Саканов, К. Т.** Использование композитных материалов на основе углеродного волокна в строительстве // Наука и техника Казахстана. – 2019. – № 1. – С. 86–93.

REFERENCES

1 **Vernigorova, V. N., Korolev, E. V., Eremin, A. I., Sokolova, Yu. A.** Korroziya stroitel’nykh materialov: monografiya [Corrosion of Building Materials: Monograph]. – Moscow : Paleotip, 2007. – 176 p.

2 **Zaitsev, A. A., Petrov, A. E., Petreneva, O. V.** Ekonomicheskoe obosnovanie ispol’zovaniya kompozitnoi armatury [Economic Justification for the Use of Composite Reinforcement]. – Perm : PNIPU, 2017. – 8 p.

3 GOST 10922-2012. Armaturnye i zakladnye izdeliya, ikh svarnye, vyazanye i mekhanicheskie soedineniya dlya zhelezobetonnykh konstruktsii [Reinforcement and Embedded Products, Their Welded, Tied and Mechanical Connections for Reinforced Concrete Structures]. – Moscow : Standartinform, 2013. – 36 p.

4 **Kasimov, R. G., Belova, T. K.** Innovatsii v stroitel’stve i rekonstruktsii zdanii i sooruzhenii : uchebnoe posobie [Innovations in Construction and Reconstruction of Buildings and Structures: Textbook]. – Orenburg : OSU, 2021. – 119 p.

5 **Okolnikova, G. E., Gerasimov, S. V.** Perspektivy ispol’zovaniya kompozitnoi armatury v stroitel’stve [Prospects for the Use of Composite Reinforcement in Construction] // Moskovskii gosudarstvennyi mashinostroitel’nyi universitet (MAMI) [Moscow State University of Mechanical Engineering]. – 2015. – 21 p.

6 **Dolgikh, M. V., Fedosova, O. G., Dergach, I. A., Ondar, A. A.** Preimushchestva i nedostatki primeneniya kompozitnoi armatury [Advantages and Disadvantages of Using Composite Reinforcement] // Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments]. – 2019. – № 10. – P. 298–300.

7 **Tiptev, D. N., Ovchinnikov, N. N.** Primenenie polimernoi kompozitnoi armatury pri stroitel'stve transportnykh sooruzhenii [Application of Polymer Composite Reinforcement in the Construction of Transport Structures] // Vestnik Evraziiskoi nauki [Bulletin of Eurasian Science]. – 2021. – № 2. – P. 1–12.

8 **Kosmachev, Yu. S.** Polimernye materialy v stroitel'stve: ot teorii k praktike [Polymeric Materials in Construction: From Theory to Practice]. – Moscow : Stroizdat, 2020. – 250 p.

9 **Kalistratov, V. I., Sidorov, A. V.** Kompozitnye materialy v stroitel'stve [Composite Materials in Construction]. – Saint Petersburg : Profizdat, 2021. – 180 p.

10 **Petlina, E. V., Sakanov, K. T.** Ispol'zovanie kompozitnykh materialov na osnove uglerodnogo volokna v stroitel'stve [The Use of Carbon Fiber-Based Composite Materials in Construction] // Nauka i tekhnika Kazakhstana [Science and Technology of Kazakhstan]. – 2019. – № 1. – P. 86–93.

***В. А. Никитин[1], К. Т. Саканов[2]**
[1,2]Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ТЕМІРБЕТОНДЫ ЭЛЕМЕНТТЕРДІ АРМАТУРАЛАУ АРҚЫЛЫ НЫҒАЙТУДЫҢ ЖАҢА ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

Бұл мақалада темірбетонды құрылымдарды салуда инновациялық арматураны қолданудың заманауи тәсілдері зерттеледі. Негізгі назар коррозияға төзімділігі жоғары, салмағы жеңіл және механикалық көрсеткіштері жақсарған композитті және полимерлі материалдарға аударылады. Бұл сипаттамалар әсіресе жоғары ылғалдылық немесе агрессивті орта жағдайларында құрылыста осындай материалдарды қолданудың кең мүмкіндіктерін ашады. Алайда, айқын артықшылықтарына қарамастан, жаңа арматура түрлерін кеңінен енгізуге кедергілер де бар. Олардың ішінде нормативтік құжаттардың жеткіліксіз дайындығы, материалдардың жоғары құны және нарықтағы шектеулі қолжетімділігі бар. Мақалада инновациялық шешімдерді қолданудың экономикалық аспектілері, соның ішінде құрылыстың жалпы құнына және жобаларды жүзеге асыру мерзімдеріне әсері талданады. Темірбетонды құрылымдардың төзімділігін, сенімділігін және тиімділігін арттыруға бағытталған арматуралау технологияларын дамытудың болашағына ерекше назар аударылады. Жаңа материалдар мен технологияларды енгізу арқылы құрылыс процестерін оңтайландыру мүмкіндіктері, сондай-ақ олардың саланың заманауи талаптарына бейімделу қажеттілігі қарастырылады. Жұмыстың маңызды аспектісі – бұл барьерлерді жеңуге көмектесетін кешенді шешімдерді әзірлеуге мүмкіндік беретін пәнаралық зерттеулерге назар аудару. Осылайша, мақала жаңа буын арматурасының артықшылықтарын атап өзектендірумен қатар, оны құрылыс тәжірибесінде кеңінен қолдануға арналған практикалық ұсыныстарды ұсынады.

Кілтті сөздер: арматура, темірбетон, композиттік материалдар, полимерлік материалдар, коррозияға төзімділік, ұзақ қызмет ету, технологиялар.

***V. A. Nikitin[1], K. T. Sakanov[2]**
[1,2]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

NEW TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS USING REINFORCEMENT

This article explores modern approaches to the use of innovative reinforcement in the construction of reinforced concrete structures. The main focus is on composite and polymer materials, which possess unique properties such as increased corrosion resistance, reduced weight, and improved mechanical performance. These characteristics open up wide opportunities for the application of such materials in construction, especially in conditions of high humidity or aggressive environments. However, despite the obvious advantages, there are also significant obstacles to the widespread adoption of new types of reinforcement. These include insufficient development of regulatory documents, high material costs, and their limited availability on the market. The article also analyzes the economic aspects of using innovative solutions, including their impact on the overall cost of construction and project timelines. Particular attention is paid to the prospects for the development of reinforcement technologies aimed at improving the durability, reliability, and efficiency of reinforced concrete structures. The possibilities of optimizing construction processes through the introduction of new materials and technologies, as well as the need for their adaptation to modern industry requirements, are considered. An important aspect of the work is the emphasis on interdisciplinary research, which can become the key to developing comprehensive solutions to overcome existing barriers. Thus, the article not only highlights the advantages of next-generation reinforcement but also offers practical recommendations for its broader application in construction practice.

Keywords: reinforcement, reinforced concrete, composite materials, polymer materials, corrosion resistance, durability, technologies.

МРНТИ 67.07.01
DOI

Д. С. Свидерская[1], Н. Е. Камзина[2], *К. М. Абитова[3]
[1,2,3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3329-1126
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2482-2645
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6082-3932

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ И ВЕТРОВЫХ ФЕРМ В ЭЛЕМЕНТАХ ЗДАНИЙ

Настоящая статья посвящена исследованию возможностей интеграции возобновляемых источников энергии, таких как солнечных и ветровых ферм, в архитектурный облик городских жилых и общественных зданий и сооружений. Данная тематика приобретает все большую актуальность в свете современных тенденций инновационного проектирования и растущего интереса к использованию возобновляемых источников энергии. Архитектура, использующая технологии преобразования солнечного света и силы ветра в энергию, не только способствует повышению энергоэффективности зданий, но и открывает новые возможности для формирования визуально привлекательной и функциональной городской среды.

В процессе исследования проведен мониторинг существующих типов солнечных панелей (монокристаллические, поликристаллические, тонкопленочные) и ветрогенераторов (с горизонтальной и вертикальной осью), а также изучены их специфические характеристики и особенности интеграции в элементы зданий и сооружений. При этом, особое внимание заслужили успешные примеры использования таких технологий в международной архитектурной практике, которые наглядно демонстрируют, как современные здания и сооружения могут эффективно использовать энергию солнца и ветра, сохраняя эстетику и функциональность. В качестве результата проведенного исследования представлены разработанные рекомендации по интеграции солнечных и ветровых ферм в архитектуру зданий и сооружений Казахстана.

Изложенные рекомендации могут позволить значительно повысить эффективность зданий и сооружений, оптимизировать их эксплуатационные характеристики, а также придать им современный и эстетически выразительный облик, который способен отвечать современным требованиям городского ландшафта.

Ключевые слова: солнечные фермы, ветровые фермы, архитектурный облик, элемент здания, возобновляемые источники энергии.

Введение

Современные технологии солнечной и ветровой энергетики активно применяются в архитектуре, улучшая функциональность зданий и придавая им современный облик. Интеграция этих решений в строительные конструкции

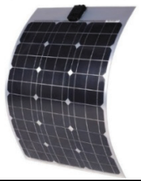
открывает новые возможности для создания энергоэффективных и технологичных объектов. Солнечные панели [1,2] и ветряные турбины [3] стали важной частью архитектурного дизайна, сочетая практичность с эстетикой. Такие инновации расширяют возможности архитекторов, позволяя разрабатывать уникальные проекты, где технологии и стиль гармонично дополняют друг друга. Использование возобновляемых источников энергии формирует новые стандарты, в которых важны как внешний вид, так и функциональность зданий.

Использование солнечной и ветровой энергетики, в современном мире, особенно актуально, так как помогает повысить энергоэффективность зданий, тем самым позволяя снизить затраты на энергоснабжение. Инновационные подходы, способные сочетать в себе сложность с технологической стороны и привлекательность эстетическую, становятся весьма востребованными в отрасли строительства, формируя будущее архитектуры.

Материалы и методы

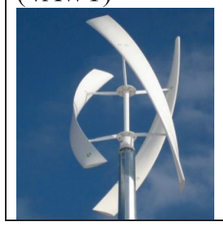
На первоначальном этапе работы был проведен мониторинг основных видов солнечных и ветровых ферм. Что касается преобразования солнечной энергии, то проанализированы основные типы солнечных панелей (таблица 1).

Таблица 1 – Анализ основных типов солнечных панелей

Тип панели	Преимущества	Недостатки	Срок службы
Моно-кристаллические 	Компактность и высокая мощность, что позволяет устанавливать на небольшой площади	Высокая цена из-за сложного производства и использования чистого кремния. Чувствительны к пыли и грязи	25 - 30 лет
Поли-кристаллические 	Хорошо работают при рассеянном солнечном свете.	Низкая эффективность на квадратный метр, из-за чего нужно устанавливать больше панелей для получения необходимой энергии.	20 лет
Тонкопленочные 	Легкие и гибкие. Хорошо работают в условиях пасмурной погоды, тумана или загрязненного воздуха.	Низкая эффективность, всего 7-13%	15 лет
BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) 	Универсальные. Позволяют создавать уникальные фасады с разными узорами и текстурами, комбинируя прозрачные и непрозрачные модули.	Из-за затенения или неправильного направления относительно солнца они могут работать менее эффективно	25 лет

Не мало важное место занимают и ветряные установки, которые также могут быть интегрированы в архитектурные проекты (таблица 2).

Таблица 2 – Анализ основных типов ветряных установок

Тип турбин	Преимущества	Недостатки
Ветряные турбины с горизонтальной осью вращения (HAWT) 	Высокая мощность. Способность вырабатывать от 2 до 8 мегаватт, превращать 40 - 50% энергии ветра в электричество.	Установка и обслуживание требуют больших затрат
Вертикальные ветряные турбины (VAWT) 	Универсальны и могут работать при любом направлении потока воздуха. Улавливают ветер на разных высотах, что особенно важно в городах, где ветер движется неравномерно.	Не могут использовать сильные и стабильные потоки на большой высоте

Следующем этапом исследование стало установление экономических преимуществ и ограничений применения солнечных и ветровых ферм в архитектурных проектах. Сравнивая разные виды солнечных панелей и ветряных турбин, выявлено, что существует множество решений для использования возобновляемой энергии. Выбор зависит от климата, места установки и бюджета.

Солнечные панели и ветряные турбины помогают снизить зависимость от традиционной энергии, но требуют значительных первоначальных вложений и учета климатических условий.

Солнечные панели просты в обслуживании, благодаря отсутствию движущихся частей. Главное - регулярно очищать их от пыли и снега, чтобы поддерживать эффективность. Однако тень от деревьев и зданий может снижать выработку энергии, поэтому следует заблаговременно оценить уровень солнечного освещения.

Ветряные турбины - мощный источник энергии, но их работа зависит от силы ветра. Они требуют дорогих систем хранения, таких как аккумуляторы или водородные установки, чтобы сохранять энергию в безветренную погоду.

Но не смотря на большие первоначальные вложения солнечные и ветровые фермы со временем окупаются за счет снижения эксплуатационных расходов и уменьшения зависимости от колебаний цен на топливо. Несмотря на затраты

и климатические ограничения, эти технологии помогают экономить энергию и повышать энергоэффективность зданий.

Далее, для оценки перспектив использования солнечных и ветровых ферм в элементах зданий был изучен международный опыт. Так, например, павильон Endesa в Барселоне (Рисунок 1) является примером успешного использования солнечных батарей в архитектуре. Он был построен архитекторами студии IaaC и выглядит как растение с лепестками, тянущимися к солнцу. Солнечные панели расположены под разными углами, чтобы лучше улавливать солнечный свет весь год [4].



Рисунок 1 – Павильон Endesa в Барселоне

Другой интересный пример — это стадион «World Games Stadium» в Гаосюне (Рисунок 2), спроектированный Тойо Ито. Стадион, известный как «Хвост дракона», выделяется ярким дизайном. Крыша покрыта 8844 солнечными панелями площадью 14155 м², которые генерируют 1,14 млн кВт/ч в год. Энергия обеспечивает стадион и 80% потребностей близлежащих районов в дни без мероприятий [5].



Рисунок 2 – «World Games Stadium» в Гаосюне

Ветровые турбины являются элементом здания Strata tower – 42-этажный небоскреб высотой 147 метров (Рисунок 3). В здании Strata Tower установлены турбины с пятью лопастями вместо обычных трех. Это помогает снизить шум и вибрацию. Конструкция спроектирована так, чтобы турбины работали эффективно круглый год [6].



Рисунок 3 – Strata Tower в Лондоне

Также ветроэнергетика используется в Бахрейнском торговом центре в Манами (Рисунок 4). Это башни высотой 240 метров, которые объединяют эффектный дизайн и современные технологии, подчеркивая стремление Бахрейна к возобновляемой энергетике. Закругленная пирамидальная форма башен помогает направлять прибрежный ветер на три большие ветровые турбины, расположенные между зданиями. По словам инженеров, эти турбины обеспечивают от 11 до 15% энергопотребления центра [7].



Рисунок 4 - Бахрейнский торговой центр в Манами

Здание Cor в Miami Design District (Рисунок 5) — это 400-футовая многофункциональная постройка, использующая энергию ветра и солнца. В нем встроены ветряные турбины, солнечные панели и системы нагрева воды, которые органично вписаны в дизайн. Каркас одновременно выполняет несколько задач: поддерживает турбины, сохраняет тепло, создает тень и формирует общественные зоны [8].

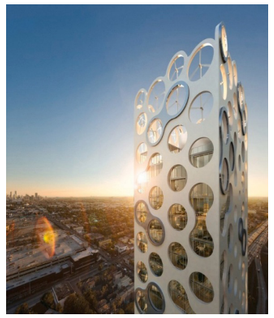


Рисунок 5 – Небоскреб Cor в Майами

BED ZED (Рисунок 6) - это жилой и офисный комплекс с 99 квартирами и 1500 м² офисных помещений, которые сдают молодым компаниям в сфере архитектуры и строительства. Главная особенность - яркие вентиляционные раструбы на крышах, которые используют ветер для вытяжки воздуха без электричества. Солнечные коллекторы площадью 777 м² обеспечивают отопление и горячую воду [9].



Рисунок 6 – Комплекс BED ZED в Лондоне

Рассмотренные мировые примеры свидетельствуют о положительном опыте интеграции солнечных и ветровых ферм в архитектуру зданий, способствующих повышению энергоэффективности, обеспечивая до 25% необходимой электроэнергии. Такие решения снижают эксплуатационные расходы и становятся важным элементом архитектурного дизайна, создавая уникальные формы [10,11]. Новые технологии, такие как гибкие панели и малошумные турбины, расширяют возможности применения возобновляемой энергетики [12].

Результаты и обсуждение

Изучив международный опыт применения солнечных и ветровых ферм, разработали ряд рекомендаций, которые способны улучшить архитектурный облик Казахстана, повышая энергоэффективность и технологичность зданий.

Так при интеграции солнечных и ветровых ферм следует учитывать факторы - климатические, географические, экономические и культурные. Например,

южные регионы страны, такие как Алматинская и Жамбылская области, благодаря высокой солнечной активности перспективны для установки солнечных ферм. Для ветровых ферм оптимальными являются северные и западные области, включая Акмолинскую и Атыраускую, где отмечаются высокие скорости ветра. Солнечные панели можно устанавливать на крышах и фасадах жилых и коммерческих зданий, максимально интегрируя их в архитектурный облик, а малые ветротурбины использовать в городской среде.

Например, для здания Almaty Towers (Рисунок 7) отлично подойдут BIPV (Building Integrated Photovoltaics) - панели, встроенные в стеклянные фасады, которые одновременно выполняют функции энергогенерации и эстетического оформления.



Рисунок 7 – Здание Almaty Towers в Алматы

Возможно использование тонкопленочных солнечных панелей в Доме дружбы Ассамблеи народа Казахстана (Рисунок 8), благодаря их легкости и гибкости, данные панели позволяют закреплять их на изогнутых поверхностях купола. Такие панели можно установить по всей площади конструкции, включая наклонные участки, чтобы максимально эффективно собирать солнечную энергию. Полученная энергия может использоваться для вечернего освещения, что подчеркнет архитектурную значимость сооружения.



Рисунок 8 – Дом дружбы Ассамблеи народа Казахстана в Таразе

Вертикально-осевые ветрогенераторы (VAWT) возможно использовать в городской среде Астаны. Они эффективны при любом направлении ветра, отличаются компактностью и бесшумной работой. Одним из вариантов для их установки может стать купол Байтерека (Рисунок 9). На его вершине можно разместить такие генераторы, которые смогут эффективно использовать сильные потоки ветра на высоте.

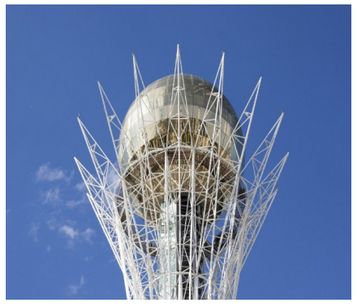


Рисунок 9 – Байтерек, Астана

Горизонтальные ветрогенераторы также можно интегрировать в конструкцию центрального моста в Атырау (Рисунок 10). Их размещение на опорах моста, где ветровые потоки наиболее интенсивны, позволит эффективно использовать энергию ветра, одновременно выполняя декоративную функцию и придавая мосту архитектурную выразительность.



Рисунок 10 – Центральный мост в Атырау

Что касается г. Павлодар, то несмотря на низкий уровень солнечной активности и достаточно сильные ветровые потоки, особенно вблизи реки Иртыш, создаются отличные условия для использования ветрогенераторов. Их установка может стать эффективным решением для повышения энергоэффективности зданий. ЖК «Свечки» (Рисунок 11) идеально подходят для таких проектов благодаря особенностям своей конструкции. Крыши этих домов и их расположение обеспечивают оптимальные условия для работы вертикальных турбин, которые

отличаются компактностью, бесшумностью и эффективностью в условиях переменных ветров.



Рисунок 11 – ЖК «Свечки» в Павлодаре

Однако для успешного внедрения таких технологий необходима не только техническая база, но и поддержка на государственном уровне, которая играет ключевую роль в развитии возобновляемой энергетики. Налоговые льготы для инвесторов, привлечение частного капитала и международных организаций могут ускорить внедрение новых технологий. Организации образования помогают повышать осведомленность населения о преимуществах возобновляемой энергии, а обучение специалистов укрепляет кадровую базу отрасли. Элементы национального дизайна, такие как казахские орнаменты, интегрированные в проекты солнечных и ветровых ферм, могут подчеркнуть культурное наследие страны. Эти меры позволят Казахстану развивать возобновляемую энергетику с учетом региональных особенностей, способствуя экономическому росту, энергобезопасности и устойчивому развитию.

Выводы

Интеграция солнечных и ветровых ферм в архитектуру городских зданий - это перспективное направление, сочетающее в себе энергоэффективность и эстетическую привлекательность. Такие здания становятся символами устойчивого развития и показывают, как современные технологии могут использоваться для создания комфортной городской среды. В условиях роста интереса к устойчивой архитектуре солнечные и ветровые фермы становятся неотъемлемой частью дизайна городских объектов, что способствует улучшению качества жизни.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Жабаева, В. А.** Выбор солнечных панелей // Теория и практика современной науки. 2020. – № 6(60) – С. 152–156. – [Электронный ресурс]. – https://www.modern- j.ru/_files/ugd/b06fdc_c84b2b882a0d481da2831c2106efcc7a.pdf

2 **Filik, T.** Efficiency analysis of the solar tracking PV systems in Eskişehir region / T. Filik, Ü.B. Filik // Anadolu university journal of science and technology A –

Applied Sciences and Engineering – 2017. – Vol. 18. – № 1. – P. 209–217. – https://doi.org/10.18038/aubtda.267116

3 **Шисяо, У., Шеина, С. Г.** Исследование установки вертикально-осевых ветряных турбин на верхних этажах высотных зданий. // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2. – № 2. – С. 19–28. – Режим доступа: – https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-19-28.

4 Павильон Endesa, Испания // Orange Smile. [Электронный ресурс]. 2024. – https://www.orangesmile.com/extreme/ru/eco- architecture/endesa-pavilion.htm

5 **Алексеев, Д.** Главный стадион Всемирных игр 2009 (арх. Тойо Ито) //Delovoy Kvartal. – 2024. [Электронный ресурс]. – https://delovoy-kvartal.ru/glavnyiy-stadion-vsemirnyih-igr-2009-arh-toyo-ito/

6 Strata SE // Wikipedia. – 2024. [Electronic resource]. – https://en.wikipedia.org/wiki/Strata_SE1

7 Бахрейнский всемирный торговый центр // Otis. – [Электронный ресурс]. – https://www.otis.com/ru/kz/our- company/global- projects/project-showcase/bahrain-world-trade-center

8 Openheim architecture // [Электронный ресурс]. – https://oppenoffice.com/works/cor/

9 Энергоэффективный квартал BEDZED в Лондоне // Svestnik. – 2025. [Электронный ресурс]. – https://svestnik.kz/energoeffektivnyj-kvartal-bedzed-v-london

10 **Атаев, Ы. А., Толеков, А., Гурбанов, Ш. Й., Бекдурдыев, Г. Н.** Использование возобновляемых источников энергии в проектировании и дизайне современных домов // Электронный журнал «Science Time». – 2024. – С. 15–18. – https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-v-proektirovanii-i-dizayne-sovremennyh-domov/viewer.

11 **Карамышева, А. А., Аракелян, А. А., Коняхин, В. О, Иванов, Н. В.** Возобновляемые источники в архитектуре высотных уникальных зданий // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2018. – № 3. – [Электронный ресурс]. – http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_61_Karamysheva_Arakelyan.pdf_d26bd2dce4.pdf

12 **Поляков, И. А., Ильвицкая, С. В.** Использование средств альтернативной энергетики при формировании художественного образа в архитектуре // Architecture and Modern Information Technologies. – 2017. – № 1(38) – С. 160–173. – https://marhi.ru/AMIT/2017/1kvart17/ilvickaa_polakov/index.php.

REFERENCES

1 **Zhabaeva, V. A.** Vy`bor solnechny`x panelej [Choosing Solar Panels] // Teoriya i praktika sovremennoj nauki. 2020. – № 6(60) – P. 152–156. – [Electronic resource]. – https://www.modern- j.ru/_files/ugd/b06fdc_c84b2b882a0d481da2831c2106efcc7a.pdf

2 **Filik, T.** Efficiency analysis of the solar tracking PV systems in Eskişehir region / T. Filik, Ü.B. Filik // Anadolu university journal of science and technology A – Applied Sciences and Engineering – 2017. – Vol. 18. – No 1. – P. 209–217. – https://doi.org/10.18038/aubtda.267116

3 **Shisyao, U. Sheina, S. G.** Issledovanie ustanovki vertikal`no-osevy`x vetryany`x turbin na verxnix e`tazhax vy`sotny`x zdanij [Study of the installation of vertical axis wind turbines on the upper floors of high-rise buildings] // Sovremenny`e tendencii v stroitel`stve, gradostroitel`stve i planirovke territorij. – 2023. – Vol. 2. – № 2. – P. 19–28. – https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-19-28.

4 Pavil`on Endesa, Ispaniya [Endesa Pavilion, Spain] // Orange Smile. [Electronic resource]. – 2024. – https://www.orangesmile.com/extreme/ru/eco-architecture/endesa-pavilion.htm

5 **Alekseev, D.** Glavny`j stadion Vsemirny`x igr 2009 (arx. Tojo Ito) [Main stadium of the 2009 World Games (architect Toyo Ito)] // Delovoy Kvartal. – 2024. – [Electronic resource]. – https://delovoy-kvartal.ru/glavnyiy-stadion-vsemirnyih-igr-2009-arh-toyo-ito/

6 Strata SE1 // Wikipedia. – 2024. – [Electronic resource]. – https://en.wikipedia.org/wiki/Strata_SE1

7 Baxrejnskij vsemirny`j torgovy`j centr [Bahrain World Trade Center] // Otis. – [Electronic resource]. – https://www.otis.com/ru/kz/our- company/global-projects/project-showcase/bahrain-world-trade-center

8 Openheim architecture // [Electronic resource]. – https://oppenoffice.com/works/cor/

9 E`nergoe`ffektivny`j kvartal BEDZED v Londone [BEDZED Energy Efficient Quarter in London] // Svestnik. – 2025. [Electronic resource]. – https://svestnik.kz/energoeffektivnyj-kvartal-bedzed-v-london

10 **Ataev, Y`. A., Tolekov, A., Gurbanov, Sh. J., Bekdurdy`ev, G. N.** Ispol`zovanie vozobnovlyaemy`x istochnikov e`nergii v proektirovanii i dizajne sovremenny`x domov [Using Renewable Energy Sources in the Design and Planning of Modern Homes] // E`lektronny`j zhurnal «Science Time». 2024. – P. 15–18. – https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-v-proektirovanii-i-dizayne-sovremennyh-domov/viewer.

11 **Karamy`sheva, A. A., Arakelyan, A. A., Konyaxin, V. O, Ivanov N. V.** Vozobnovlyaemy`e istochniki v arxitekture vy`sotny`x unikal`ny`x zdanij [Renewable sources in the architecture of high-rise unique buildings] // E`lektronny`j nauchny`j zhurnal «Inzhenerny`j vestnik Dona». 2018. – № 3. – http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_61_Karamysheva_Arakelyan.pdf_d26bd2dce4.pdf

12 **Polyakov, I. A., Il`viczkaya, S. V.** Ispol`zovanie sredstv al`ternativnoj e`nergetiki pri formirovanii xudozhestvennogo obraza v arxitekture [The use of alternative energy sources in the formation of artistic images in architecture] // Architecture and Modern Information Technologies. – 2017. – № 1(38) – P. 160–173. – https://marhi.ru/AMIT/2017/1kvart17/ilvickaa_polakov/index.php

Д. С. Свидерская[1], Н. Е. Камзина[2], *К. М. Абитова[3]
[1,2,3]Торайғыров атындағы университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ҚҰРЫЛЫС ЭЛЕМЕНТТЕРІНДЕ КҮН ЖӘНЕ ЖЕЛ ФЕРМАЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ БОЛАШАҒЫ

Бұл мақала күн және жел электр станциялары сияқты жаңартылатын энергия көздерін қалалық тұрғын және қоғамдық гимараттар мен құрылыстардың сәулеттік келбетіне біріктіру мүмкіндіктерін зерттеуге арналған. Бұл тақырып инновациялық дизайндағы заманауи тенденцияларға және жаңартылатын энергия көздерін пайдалануға қызығушылықтың артуына байланысты өзекті бола түсуде. Күн сәулесі мен жел энергиясын энергияға түрлендіру технологияларын қолданатын сәулет гимараттардың энергия тиімділігін арттыруға көмектесіп қана қоймайды, сонымен қатар көрнекі тартымды және функционалды қалалық ортаны құрудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Зерттеу барысында күн батареяларының (монокристалды, поликристалды, жұқа пленкалы) және жел генераторларының (көлденең және тік осі бар) қолданыстағы түрлері бақыланып, олардың спецификалық сипаттамалары мен гимараттар мен құрылыстардың элементтеріне біріктіру ерекшеліктері зерттелді. Бұл ретте заманауи гимараттар мен құрылыстар эстетика мен функционалдылықты сақтай отырып, күн мен жел энергиясын қалай тиімді пайдалана алатынын айқын көрсететін халықаралық сәулет тәжірибесінде осындай технологияларды қолданудың табысты мысалдарына ерекше назар аударылды. Зерттеу нәтижесінде Қазақстандағы гимараттар мен құрылыстардың сәулетіне күн және жел электр станцияларын біріктіру бойынша ұсыныстар берілген. Көрсетілген ұсыныстар гимараттар мен құрылыстардың тиімділігін айтарлықтай арттыруға, олардың пайдалану сипаттамаларын оңтайландыруға және оларға қалалық ландшафттың заманауи талаптарына жауап бере алатын заманауи және эстетикалық экспрессивті көрініс беруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: күн фермалары, жел фермалары, сәулеттік келбеті, құрылыс элементі, жаңартылатын энергия көздері.

D. S. Sviderskaya[1], N. E. Kamzina[2], *K. M. Abitova[3]
[1,2,3]Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

PROSPECTS FOR USING SOLAR AND WIND FARMS IN BUILDING ELEMENTS

This article is devoted to the study of the possibilities of integrating renewable energy sources, such as solar and wind farms, into the architectural appearance of urban residential and public buildings and structures. This topic is becoming increasingly relevant in light of modern trends in innovative design and the growing interest in the use of renewable energy sources. Architecture that uses technologies for converting sunlight and wind power into energy not only helps to improve the energy efficiency of buildings, but also opens up new opportunities for creating a visually attractive and functional urban environment.

During the study, existing types of solar panels (monocrystalline, polycrystalline, thin-film) and wind generators (with horizontal and vertical axis) were monitored, and their specific characteristics and features of integration into elements of buildings and structures were studied. At the same time, special attention was paid to successful examples of the use of such technologies in international architectural practice, which clearly demonstrate how modern buildings and structures can effectively use solar and wind energy while maintaining aesthetics and functionality. As a result of the study, recommendations for the integration of solar and wind farms into the architecture of buildings and structures in Kazakhstan are presented.

The recommendations outlined can significantly improve the efficiency of buildings and structures, optimize their operational characteristics, and give them a modern and aesthetically expressive appearance that can meet modern requirements of the urban landscape.

Keywords: solar farms, wind farms, architectural appearance, building element, renewable energy sources.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдилова Галия Бекеновна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, тамақ инженериясы зерттеу мектебі, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdilova1979@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6647-6314

Абдилова Галия Бекеновна, кандидат технических наук, ассоц.профессор, исследовательская школа пищевой инженерии, университет Шакарима, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: abdilova1979@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6647-6314

Abdilova Galiya, Candidate of Technical Sciences, Associate professor, research school of food engineering, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdilova1979@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6647-6314

Абекова Айдана Жумагалиевна, ғылыми қызметкер, техника ғылымдарының магистрі, У. А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Алматы қ., 05000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Абекова Айдана Жумагалиевна, Научный сотрудник, магистр технических наук, Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекоова, г. Алматы, 05000, Республика Казахстан, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Abekova Aidana Zhumagalievna, Researcher, Master of Technical Sciences, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Joldasbekov, Almaty, 05000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Abekova310792@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-0881-8707

Абитова Камиля Муратовна, Сәулет-құрылыс факультетінің студенті, Торайғыров атындағы университет, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kabitova96@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6082-3932

Абитова Камиля Муратовна, студент факультета Архитектуры и строительства, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: kabitova96@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6082-3932

Abitova Kamilya Muratovna, Student of the Faculty of Architecture and Construction, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kabitova96@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6082-3932

Абсолямова Динара Ризахметовна, Машина жасау мамандығы бойынша докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140007, Қазақстан Республикасы, e-mail: absolyamova.d@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1591-2822

Абсолямова Динара Ризахметовна, докторант по специальности Машиностроение, факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140007, Республика Казахстан, e-mail: absolyamova.d@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1591-2822

Absolyamova Dinara Rizakhmetovna, Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140007, Republic of Kazakhstan, e-mail: absolyamova.d@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1591-2822

Абілқайыр Жасталап Наурызғали, PhD, Машина жасау кафедрасының қауымд. профессоры, Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, г. Алматы, 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: jastalap81@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7568-1061

Абілқайыр Жасталап Наурызғали, PhD, ассоц. профессор кафедры Машиностроение, Института Энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: jastalap81@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7568-1061

Abilkaiyr Zhastalap, PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Institute of Energy and Mechanical Engineering named after A. Burkitbaev, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: jastalap81@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7568-1061

Аймұқанов Дамир Сапарғалиұлы, Көлік, көліктехникасы және технологиясы мамандығы бойынша Докторанты, көлік-жол факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалы қуниверситеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ads-pav@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8816-9760

Аймуханов Дамир Сапаргалиевич, докторант по специальности Транспорт, транспорная техника и технологии, Транспортно-дорожный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: ads-pav@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8816-9760

Aimukhanov Damir Sapargalievich, Doctoral student in the specialty Transport, Transport Equipment and Technologies, Faculty of Transport and Road Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ads-pav@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8816-9760

Аймұқанов Сапаргали Мұқиденұлы, ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессоры, Агротехнология кафедрасы, Торайғыров университеті, Ауыл шаруашылығы факультеті, Павлодар қ, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: s8022017@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0951-9495

Аймуханов Сапаргали Мухиденович, кандидат сельскохозяйственных наук, ассоц. профессор, кафедра Агротехнология, Торайгыров университет, Факультет сельскохозяйственных, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: s8022017@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0951-9495

Aimukhanov Sapargali Mukhidenovich, candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Agricultural Technology, Toraigyrov University, Faculty of Engineering, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: s8022017@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0951-9495

Айсен Бейбітұлы Исаметов, докторант, Satbayev University, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.issametov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1036-2294

Айсен Бейбитович Исаметов, докторант Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.issametov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1036-2294

Aisen Beibitovich Issametov, doctoral student, Satbayev University, Almaty, 050013, Kazakhstan, e-mail: a.issametov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1036-2294

Айткалиева Гульзат Сляшевна, қауымд. профессор, PhD, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulzat_slyashevna@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9872-6317

Айтқалиева Гульзат Сляшевна, PhD, ассоц. профессор, университет Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: gulzat_slyashevna@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9872-6317

Aitkalieva Gulzat Slyashevna, PhD, associate professor, Satpayev University, Almaty, 050000, Republic Of Kazakhstan, e-mail: gulzat_slyashevna@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9872-6317

Алипбаев Жусулан Ратканович, техника ғылыми кандидаты, Көлік инженериясы кафедрасының доцент м.а, Көлік және энергетика факультеті, Еуразиялық ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Alipbayev_zr@enu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1163-8929

Алипбаев Жасулан Ратканович, кандидат технических наук и.о доцент кафедры Транспортная инженерия, Транспортно энергетический факультет, Евразийский национальный университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Alipbayev_zr@enu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1163-8929

Alipbayev Zhasulan Ratkanovich, Acting associate professor of Transport engeneering department, Faculty of Transport and energy, Eurasian national university named after Gumilyov, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Alipbayev_zr@enu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1163-8929

Алтынбеков Роллан Маратович, ПА КНБ РК-ның орынбасары, әскери ғылымдар кандидаты, профессор, полковник, Шекара академиясы КНБ, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinarik31@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-4730-2448

Алтынбеков Роллан Маратович, заместитель начальника ПА КНБ РК, кандидат военных наук, профессор, полковник, Пограничная академия КНБ, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: dinarik31@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-4730-2448

Altynbekov Rollan Maratovich, Deputy Head of the Border Academy of the National Security Committee of Republic of Kazakhstan (NSC RK), Candidate of Military Sciences, Professor, Colonel Border Academy of the National Security Committee, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinarik31@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-4730-2448

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 student, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: asanov_bagdat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4363-0808

Ажаев Асқар Советұлы, Satbayev University докторанты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: cpo@kkr.kz, https://orcid.org/0009-0003-6550-6483

Ажаев Аскар Советович, докторант Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: cpo@kkr.kz, https://orcid.org/0009-0003-6550-6483

Azhaev Askar Sovetovich, doctoral student, Satbayev University, Almaty, 050013, Kazakhstan, e-mail: cpo@kkr.kz, https://orcid.org/0009-0003-6550-6483

Аталыкова Альфия Кенесовна, Автоматтандыру және басқару кафедраның аға оқытушысы, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты, Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.atalykova@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-7517-2438

Аталыкова Альфия Кенесовна, ст. преподаватель кафедры Автоматизация и управление, Институт автоматизации и информационных технологий, Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: a.atalykova@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-7517-2438

Alfiya Kenesovna Atalykova, Senior Lecturer of the Department of Automation and Control, Institute of Automation and Information Technologies, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.atalykova@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-7517-2438

Аубакиров Алмат Муканович, аға оқытушы / магистр. Инженерия Факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almat.aubakirov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-3775-655X

Аубакиров Алмат Муканович, ст. преподаватель / магистр. Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almat.aubakirov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-3775-655X

Aubakirov Almat Mukanovich, Senior Lecturer /Master's degree, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almat.aubakirov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-3775-655X

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, PhD, Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері зертханасының аға ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, PhD, старший научный сотрудник лаборатории Ферросплавов и процессов восстановления, Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

Akhmetov Amangeldy Serikbayevich, PhD, Senior Researcher at the Laboratory of Ferroalloys and reduction processes, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman1aotero@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1606-838X

Ахметов Бахытжан Сражатдинович, Көліктегі автоматтандыру және электрэнергетика кафедрасының техникалық ғылым докторы, профессоры, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті мекемесі, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., e-mail: bakhytzhan.akhmetov.54@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5622-2233 050063

Ахметов Бахытжан Сражатдинович, доктор технических наук, профессор кафедры Автоматизация и электроэнергетика на транспорте, Международный транспортно-гуманитарный университет, Республика Казахстан, г. Алматы, e-mail: bakhytzhan.akhmetov.54@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5622-2233 050063

Akhmetov Bakhytzhan Srazhatdinovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Electric Power Engineering in Transport, International Transport and Humanitarian University, Republic of Kazakhstan, Almaty, e-mail: bakhytzhan.akhmetov.54@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5622-2233 050063

Әлімбекұлы Темірлан, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің Беткі инженерия және трибология ғылыми-зерттеу орталығының кіші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7419-1281

Алимбекулы Темирлан, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра Инженерия поверхности и трибология Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7419-1281

Alimbekuly Temirlan, Engineer of Scientific Research Center Surface Engineering and Tribology at S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: temirlanalimbekuly@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7419-1281

Байгереев Самат Ракимгалиевич, PhD, қауымд. профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: samat.baigereyev@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Байгереев Самат, Ракимгалиевич, доктор философии (PhD), ассоциированный профессор, Международная школа инженерии, Восточно Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: samat.baigereyev@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Baigereyev Samat Rakimgalievich, doctor of Philosophy (PhD), associate professor, International School of Engineering, D. Serikbayev, East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: samat.baigereyev@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7773-5457

Байгужина Гульсезим Нурлановна, Көлік инженериясы кафедрасының докторанты, Көлік және энергетика факультеті, Еуразиялық ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gul_8989@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9181-9186

Байгужина Гульсезим Нурлановна, докторант кафедры Транспортная инженерия, Транспортно энергетический факультет, Евразийский национальный университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: gul_8989@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9181-9186

Baiguzhina Gulsezim Nurlanovna, Doctoral student of Transport engeneering department, Faculty of Transport and energy, Eurasian national university named after Gumilyov, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gul_8989@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9181-9186

Байсеитова Еркеназ Аглановна, Металлургия мамандығы бойынша докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

Байсеитова Еркеназ Аглановна, докторант по специальности Металлургия, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

Bayseitova Erkenaz Aglanovna, Doctoral student in the specialty Metallurgy, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aglanovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8412-6627

Балгаев Досжан Ергенович, PhD, аға оқытушы, Технологиялық машиналар және жабдықтар кафедрасы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: d.balgayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9278-7653

Балгаев Досжан Ергенович, PhD, ст. преподаватель, кафедра Технологические машины и оборудование, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: d.balgayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9278-7653

Balgayev Doszhan Yergenovich, PhD, senior lecturer, Department of Technological Machines and Equipment, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.balgayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-9278-7653

Басқанбаева Динара Жұмабайқызы, PhD, қауымд. профессор, Технологиялық машиналар және жабдықтар кафедрасы, Сатпаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Басканбаева Динара Джумабаевна, PhD, ассоц.профессор, кафедра технологических машин и оборудования, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Baskanbayeva Dinara Dzhumabayeva, PhD, Department of Associate Professor of the Department of Technological Machinery and Equipment Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.baskanbayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-1688-0666

Бейсенов Бауржан Саккоулы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд.профессор, Технологиялық машиналар және жабдықтар кафедрасы, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: b.beisenov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-6501-6746

Бейсенов Бауржан Саккоулы, кандидат педагогических наук, ассоц.профессор, кафедра Технологические машины и оборудование, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: b.beisenov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-6501-6746

Beisenov Baurzhan Sakkouly, Candidate of pedagogic sciences, Associate professor, Department of Technological Machines and Equipment, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: b.beisenov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-6501-6746

Бекбаева Ләззәт Ақылбайқызы, постдокторант, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: lyazzat.bekbaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2543-6380

Бекбаева Ляззат Акылбайкызы, постдоктор-ант, Машиностроительный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: lyazzat.bekbaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2543-6380

Bekbayeva Lazzat Akylbaykyzy, postdoctoral fellow, Mechanical Engineering Faculty, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: lyazzat.bekbaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2543-6380

Бекболатов Габит Жахангерович, аға оқытушы, Көлік, тасымалдауды және қозғалысты ұйым-дастыру кафедрасы, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент қ., 160021, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.bekbolatov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2968-5686

Бекболатов Габит Жахангерович, ст. преподаватель, кафедра Транспорт, организа-ция перевозок и движения, ЮКУ имени М. Ауэзова, г. Шымкент, 160021, Республика Казахстан, e-mail: g.bekbolatov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2968-5686

Bekbolatov Gabit Zhahangerovich, Senior Lecturer, Department of Transport, Transport and Traffic Organisation, M. Auezov SKU, Shymkent, 160021, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.bekbolatov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2968-5686

Беккалиев Асылбек Оразбаевич, техника ғылымдарының магистрі, оқытушы, Көлік техникасы мен технологиялар кафедрасы, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bek_assyl@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-4672-5611

Беккалиев Асылбек Оразбаевич, магистр технических наук, преподаватель, кафедра Транспортная техника и технологии, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: bek_assyl@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-4672-5611

Bekkaliev Asylbek Orazbaevich, Master of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Transport Engineering and Technology, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Faculty of Engineering, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bek_assyl@bk.ru, https://orcid.org/0009-0000-4672-5611

Бердикулова Феруза Асановна, техника ғылымдарының кандидаты, департамент директоры, Минералды шикізатты кешенді өңдеу жөніндегі ұлттық орталық, Алматы қ., 050036, Қазақстан Республикасы, e-mail: nc@cmrp.kz, https://orcid.org/0000-0002-3505-4346

Бердикулова Феруза Асановна, кандидат технических наук, директор департамента, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья, г. Алматы, 050036, Республика Казахстан, e-mail: nc@cmrp.kz, https://orcid.org/0000-0002-3505-4346

Berdikulova Feruza Asanovna, Candidate of Technical Sciences, Director of the Department National Center for Integrated Processing of Mineral Raw Materials, Almaty, 050036, Republic of Kazakhstan, e-mail: nc@cmrp.kz, https://orcid.org/0000-0002-3505-4346

Бигалиева Жанар Серикхановна, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Робототехника және автоматтандырудың техникалық құралдары кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.bigaliyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7440-5591

Бигалиева Жанар Серикхановна, магистр технических наук, ст. преподаватель, кафедра Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: zh.bigaliyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7440-5591

Bigalieva Zhanar Serikhanovna, Master of Engineering Sciences, Senior Lecturer Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.bigaliyeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-7440-5591

Богомолов Алексей Витальевич, техникалық ғылымдар кандидаты, профессор, Металлургия кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

Богомолов Алексей Витальевич, кандидат технических наук, профессор, кафедра Металлургия, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

Bogomolov Alexey, Candidate of Engineering, Professor of Metallurgy department, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bogomolov71@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4926-0925

Болатов Нұржан Қажымұратұлы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор міндетін атқарушы, Техникалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurzhan_b_80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Булатов Нуржан Кажмуратович, кандидат технических наук, исполняющий обязанности ассоц.профессора, Технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: nurzhan_b_80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Bulatov Nurzhan Kazhmuratovich, Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor, Faculty of Engineering, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurzhan_b_80@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3721-2280

Бузауова Тоты Мейрбековна, техникалық ғылымдар кандидаты, қауымд.профессор, профессор міндетін атқарушы, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: toty_77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Бузауова Тоты Мейрбековна, Исполняющий обязанности профессора, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Машиностроительный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: toty_77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Buzauova Toty Meirbekovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: toty_77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7219-6274

Букаева Амина Захаровна, қауымд. профессор м.а. Инжиниринг факультеті, Есенов университеті, Ақтау қ., 130000, Қазақстан Республикасы, e-mail: amina.bukayeva@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0956-1552

Букаева Амина Захаровна, и. о. ассоциированного профессора, факультет Инжиниринга, Есенов университет, г. Актау, 130000, Республика Казахстан, e-mail: amina.bukayeva@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0956-1552

Bukayeva Amina Zakharovna, Acting associate professor, Faculty of Engineering, Yessenov University, Aktau, 130000, Republic of Kazakhstan, e-mail: amina.bukayeva@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0956-1552

Буйткенов Дастан Болатұлы, PhD, Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің Беттік инженерия және трибология ғылыми-зерттеу орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: buitkenovd@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Буйткенов Дастан Болатулы, PhD, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра Инженерия поверхности и трибология Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: buitkenovd@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Buitkenov Dastan Bolatuly, PhD, Leading Researcher of Scientific Research Center Surface Engineering and Tribology at S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: buitkenovd@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0239-5849

Вавилов Андрей Владимирович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, директор ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі ЖШС, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: avavilov@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-0356-0508

Вавилов Андрей Владимирович, кандидат техничеких наук, ассоц. профессор, директор ТОО Научно-производственное объединение ИННОТЕХ, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: avavilov@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-0356-0508

Vavilov Andrey Vladimirovich, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Director of INNOTECH Scientific and Production Association LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: avavilov@yandex.kz https://orcid.org/0000-0003-0356-0508

Васильева Ольга Юрьевна, аға оқытушы, Жер туралы ғылымдар мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ovasilyeva@ektu.kz, https://orcid.org/0009-0001-9426-6322

Васильева Ольга Юрьевна, ст. преподаватель, Школа наук о Земле, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: ovasilyeva@ektu.kz, https://orcid.org/0009-0001-9426-6322

Vasilyeva Olga Yurievna, senior lecturer of the School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ovasilyeva@ektu.kz, https://orcid.org/0009-0001-9426-6322

Вахгельт Анатолий Фроимович, физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерлік білім берудегі жүйелік талдау және басқару оқу-ғылыми орталығының жетекшісі, Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Ресей Федерациясы, 634050, Томск қ., e-mail: vahgelt@tpu.ru, https://orcid.org/0009-0005-1121-3356

Вахгельт Анатолий Фроимович, кандидат физико-математических наук, профессор учебно-научного центра Системный анализ и управление в инженерном образовании, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, 634050, г. Томск, e-mail: vahgelt@tpu.ru, https://orcid.org/0009-0005-1121-3356

Vakhguelt Anatoli, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Training and Research Center for System Analysis and Management in Engineering Education, National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation, 634050, Tomsk, e-mail: vahgelt@tpu.ru, https://orcid.org/0009-0005-1121-3356

Волокитин Андрей Валерьевич, PhD, доцент, Металлургия және машина жасау факультеті, Қарағанды индустриалды университеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.volokitin@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-0886-3578

Волокитин Андрей Валерьевич, PhD, доцент, Факультет металлургия и машиностроение, Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: a.volokitin@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-0886-3578

Volokitin Andrey, PhD, Associate Professor, Faculty of Metallurgy and Mechanical Engineering, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.volokitin@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-0886-3578

Гурьянов Георгий Александрович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі ЖШС, Өскемен қ., 070000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Гурьянов Георгий Александрович, кандидат техничеких наук, профессор, руководитель проекта ТОО Научно-производственное объединение ИННОТЕХ, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Guryanov Georgiy Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Project Manager of INNOTECH Scientific and Production Association LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gguryanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3657-3735

Давлетова Кунсулу Абдымаликкызы, магистрант, А. С. Сағынов атындағы ҚарТУ, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kunsulu.davletova@bk.ru, https://orcid.org/0009-0009-0809-9811

Давлетова Кунсулу Абдымаликкызы, магистрант, КарТУ имени Академика А. С. Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: kunsulu.davletova@bk.ru, https://orcid.org/0009-0009-0809-9811

Davletova Kunsulu Abdymalikkyzy, Master's student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kunsulu.davletova@bk.ru, https://orcid.org/0009-0009-0809-9811

Джундибаев Маулен Қайрекенович, Инженер технолог, техника ғылымдарының магистрі, ЖШС ҒЗИО ERG, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Maulen.Jundibayev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Джундибаев Маулен Қайрекенович, Инженер технолог, магистр технических наук, ТОО НИИЦ ERG, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: Maulen.Jundibayev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Jundibayev Maulen Kairekenovich, Engineer technologist, master og technical sciences LTD SERC ERG, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Maulen.Jundibayev@erg.kz, https://orcid.org/0009-0007-2915-378X

Джундибаева Акгул Султанбековна, техника ғылымдарының магистрі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, ғылыми қызметкер, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sugralina89@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5244-3497

Джундибаева Акгул Султанбековна, магистр технических наук, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, научный сотрудник, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: sugralina89@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5244-3497

Jundibayeva Akgul Sultanbekovna, Master of Technical Sciences, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, researcher, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sugralina89@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-5244-3497

Дудкин Михаил Васильевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, аға ғылыми қызметкер ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі ЖШС, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: Vas_dud@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Дудкин Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор, ст.научный сотрудник ТОО Научно-производственное объединение ИННОТЕХ, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: Vas_dud@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Dudkin Mikhail Vasilyevich, Doctor of Technical Science, Professor, Senior Researcher of INNOTECH Scientific and Production Association LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Vas_dud@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5732-0724

Евгений Федорович Дыбов, ПА КНБ РК-ның ғылыми қызметті басқару доценті, полковник, Шекара академиясы КНБ-ның полковнигі, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: efdybov@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0008-9323-0070

Евгений Федорович Дыбов, доцент управления научной деятельности ПА КНБ РК, полковник, Пограничная академия КНБ, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: efdybov@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0008-9323-0070

Evgeny Fyodorovich Dybov, Associate Professor of Scientific Activity Management, Border Academy of the National Security Committee of Republic of Kazakhstan (NSC RK), Colonel Border Academy of the National Security Committee, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: efdybov@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0008-9323-0070

Елемесов Касым Коптлеуевич, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Энергетика және машина жасау институтының директоры, Satbayev University Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Елемесов Касым Коптлеуевич, кандидат технических наук, профессор, директор Института энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Yelemessov Kassym Koptleuevich, candidate of technical sciences, professor, Director of the Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.yelemessov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-6168-2787

Елеукулов Ерлан Онланович, коммуникациялық және ғарыштық инженерия институтының Электрондық инженерия кафедрасының доценты, Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.eleukulov@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-6866-3941

Елеукулов Ерлан Онланович, доцент кафедры Электронная инженерия, Институт коммуникационной и космической инженерии, Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: e.eleukulov@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-6866-3941

Yeleukulov Yerlan Onlanovich, Associate professor, Department of Electronic Engineering, Institute of Communication and Space Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.eleukulov@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-6866-3941

Елубай Мадениет Азаматович, Жаратылыстану ғылымдары факультетінің деканы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: madik_chimik@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6209-5215

Елубай Мадениет Азаматович, Декан Факультета естественных наук, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: madik_chimik@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6209-5215

Yelubay Madeniyet Azamatovich, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: madik_chimik@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6209-5215

Еремеева Жанна Владимировна, профессор, техника ғылымдарының докторы, Ұнтақты металлургия және функционалды жабын кафедрасы, Ұлттық технологиялық зерттеу университеті, Мәскеу мемлекеттік болат және қорытпалар институты, Мәскеу қ., 119049, Ресей Федерациясы, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1790-5004

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, кафедра Порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ), Московский государственный институт стали и сплавов (МИСИС), г. Москва, 119049, Российская Федерация, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1790-5004

Yeremeeva Zhanna Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, National Research Technological University (NUST), Moscow State Institute of Steel and Alloys (MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1790-5004

Еркелдесова Гульзада Токтасыновна, PhD, Компьютерлік технологиялар және телекоммуникациялар кафедрасының меңгерушісі, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті мекемесі, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050063, e-mail: gulzada888@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6527-7180

Еркелдесова Гульзада Токтасыновна, PhD, заведующий кафедрой Компьютерные технологии и телекоммуникации, Международный транспортно-гуманитарный университет, Республика Казахстан, г. Алматы, 050063, e-mail: gulzada888@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6527-7180

Erkeldesova Gulzada Toktasynovna, PhD, Head of the Department of Computer Technologies and Telecommunications, International Transport and Humanitarian University, Republic of Kazakhstan, Almaty, 050063, e-mail: gulzada888@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6527-7180

Есқалина Құралай Толегенқызы, техника ғылымдарының магистрі, Металлургия және тау-кен ісі кафедрасының оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Техникалық факультет, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kuralai.tulegenovna@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2804-7076

Есқалина Құралай Толегенқызы, магистр технических наук, преподаватель кафедры Металлургия и горное дело, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, технический факультет, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: kuralai.tulegenovna@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2804-7076

Yeskalina Kuralay Tolegenkyzy, Master of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Metallurgy and Mining, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Faculty of Technology, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kuralai.tulegenovna@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2804-7076

Жаксалыков Куаныш Нажмиденович, аға оқытушы, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.zhaxalykov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1659-6051

Жаксалыков Куаныш Нажмиденович, ст. преподаватель, Факультет естественных наук, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: k.zhaxalykov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1659-6051

Zhaxalykov Kuanysh Nazhmidenovich, senior lecturer, Faculty of Natural Sciences, Toraigyrov University, 140008, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.zhaxalykov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1659-6051

Жакупов Алибек Ныгматуллович, PhD, қауымд. профессоры, Металлургия кафедрасы, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: alibek_j85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2988-7015

Жакупов Алибек Ныгматуллович, доктор PhD, ассоц. профессор, кафедра Металлургия, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: alibek_j85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2988-7015

Zhakupov Alibek, PhD, Associate Professor of Metallurgy department, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: alibek_j85@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2988-7015

Жамуратова Махаббат Мусагазиевна, Satbayev University Робототехника және автоматтандырудың техникалық құралдары кафедрасының аға оқытушысы, Алматы қ., 050000, ҚазақстанРеспубликасы, e-mail: laura.mametova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0203-2538

Жамуратова Махаббат Мусагазиевна, ст. преподаватель, кафедра Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: laura.mametova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0203-2538

Zhamuratova Makhabbat Musagazievna, Senior Lecturer, Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: laura.mametova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0203-2538

Жанкелді Әділет Жанкелдіұлы, PhD, қауымд. профессор, Энергетика және машина жасау институты, Сәтбаев университеті, г. Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8174-4209

Жанкелді Әділет Жанкелдіұлы, PhD, ассоц. профессор, Институт энергетики и машиностроения, Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8174-4209

Zhankeldi Adilet, PhD, associate professor, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: adilet.zhankeldi@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8174-4209

Жданов Ренат Маратович, 1 санаттағы инженер технолог, ЖШС ҒЗИО ERG Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Renat.Zhdanov@erg., https://orcid.org/0000-0003-0037-0856

Жданов Ренат Маратович, Инженер технолог 1 категории, ТОО НИИЦ ERG, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: Renat.Zhdanov@erg., https://orcid.org/0000-0003-0037-0856

Zhdanov Renat Maratovich, Engineer technologist of the 1st category, LTD SERC ERG, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Renat.Zhdanov@erg., https://orcid.org/0000-0003-0037-0856

Жинова Елена Валентиновна, аға ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев ат.Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: lenuska-kar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7039-9254

Жинова Елена Валентиновна, ст. научный сотрудник Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100008, Республика Казахстан, e-mail: lenuska-kar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7039-9254

Zhinova Elena Valentinovna, Senior Researcher, Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100008, Republic of Kazakhstan, e-mail: lenuska-kar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7039-9254

Жумабаев Амангельды Кайратович, техника ғылымдарының магистрі, оқытушы (ассистент), Торайгыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman_31_98@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-1203-1907

Жумабаев Амангельды Кайратович, магистр технических наук, преподаватель (ассистент) Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: aman_31_98@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-1203-1907

Zhumabaev Amangeldy Kayratovich, Master of Engineering Sciences, Lecturer (Assistant), Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman_31_98@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-1203-1907

Жумагалиев Ерлан Уланович, техника ғылымдарының кандидаты, Металлургия және тау-кен ісі кафедрасының меңгерушісі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Техникалық факультет, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: erlan_zhumagalie@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жумагалиев Ерлан Уланович, кандидат технических наук, заведующий кафедры Металлургия и горное дело, Технический факультет, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, 030000, Республика Казахстан, e-mail: erlan_zhumagalie@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Zhumagaliev Yerlan Ulanovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Metallurgy and Mining, K. Zhubanov Aktobe regional university, Technical Faculty, Aktobe, 030000, Republic Kazakhstan, e-mail: erlan_zhumagalie@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2227-0661

Жумашев Калкаман Жумашевич, техника ғылымдарының докторы, Зертхана меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: innovaciya_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8577-9417

Жумашев Калкаман Жумашевич, доктор технических наук, Заведующий лабораторией, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева г. Караганда, 100008, Республика Казахстан, e-mail: innovaciya_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8577-9417

Zhumashev Kalkaman Zhumashevich, Head of the laboratory, Doctor of Technical Sciences, Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100008, Republic of Kazakhstan, e-mail: innovaciya_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8577-9417

Жунисбеков Бейбитбек Даулетбакович, техника ғылымдарының магистрі, докторант, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 05000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bek.daulet.86@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0067-2178

Жунисбеков Бейбитбек Даулетбакович, магистр технических наук, докторант, университет имени Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: bek.daulet.86@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0067-2178

Beibitbek Dauletbakovich Zhunisbekov, Master of Technical Sciences, PhD student, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bek.daulet.86@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-0067-2178

Жунусов Аблай Каиртасович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Металлургия кафедрасының меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Жунусов Аблай Каиртасович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, заведующий кафедрой Металлургия, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Zhunusov Ablay Kairtasovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhunusov_ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9119-9737

Забиева Алия Батырбековна, техника ғылымдарының кандидаты, Көлік инженериясы кафедрасының доцент м.а, Көлік және энергетика факультеті, Еуразиялық ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zabiyeva_ab@enu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Забиева Алия Батырбековна, кандидат технических наук, и.о доцент кафедры Транспортная инженерия, Транспортно энергетический факультет, Евразийский национальный университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Zabiyeva_ab@enu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Zabiyeva Aliya Batyrbekovna, Acting associate professor of Transport engeneering department, Faculty of Transport and energy, Eurasian national university named after Gumilyov, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zabiyeva_ab@enu.kz, https://orcid.org/0009-0004-8089-3693

Зулфиади Зулхан, проф. доктор, Пирометаллургия зертханасының меңгерушісі, Бандун технологиялық институты, Бандунг, 40132, Индонезия, e-mail: zulfiadi-zulhan@itb.ac.id, https://orcid.org/0000-0001-6670-1764

Зулфиади Зулхан, проф., доктор, заведующий лабораторий Пирометаллургия, Бандунгский технологический институт, Бандунг, 40132, Индонезия, e-mail: zulfiadi-zulhan@itb.ac.id, https://orcid.org/0000-0001-6670-1764

Zulfiadi Zulhan, Prof., Dr., Head of Pyrometallurgy Laboratory, Bandung Institute of Technology, Bandung 40132, Indonesia, e-mail: zulfiadi-zulhan@itb.ac.id, https://orcid.org/0000-0001-6670-1764

Ибраев Саят Мұратұлы, профессор, техника ғылымдарының докторы, академик У. А. Джолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nazymshogelova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6265-5745

Ибраев Саят Муратулы, профессор, доктор технических наук, Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: nazymshogelova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6265-5745

Ibraev Sayat, Professor, Doctor of Technical Sciences, U. A. Dzholdasbekov Institute of Mechanics and Machine Science, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nazymshogelova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6265-5745

Исаева Евгения Владимировна, филология ғылымдарының кандидаты, доцент, Инженерлік білім берудегі жүйелік талдау және басқару оқу-ғылыми орталығының жетекшісі, Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск қ., 634050, Ресей Федерациясы, e-mail: naiden@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4463-5812

Исаева Евгения Владимировна, кандидат филологических наук, доцент учебно-научного центра Системный анализ и управление в инженерном образовании, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: naiden@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4463-5812

Isaeva Evgeniya Vladimirovna, Candidate of Philological Sciences, Associate Professor of Training and Research Center for System Analysis and Management in Engineering Education, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: naiden@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4463-5812

Искаков Ренат Хакимулы, оқытушы(ассистент), Торайғыров университеті, Павлодар қ. 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: iskakov-renat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0095-1275

Искаков Ренат Хакимулы, преподаватель (ассисент), Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: iskakov-renat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0095-1275

Iskakov Renat Hakimuly, Lecturer (assistant), Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: iskakov-renat@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0095-1275

Искакова Динара Алтынбековна, Машина жасау мамандығы бойынша докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, 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, 140008, 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, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: iskakovada@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-4818

Итыбаева Галия Тулеубаевна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140007, Қазақстан Республикасы, e-mail: galia-itibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6385-8627

Итыбаева Галия Тулеубаевна, кандидат технических наук, профессор, факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140007, Республика Казахстан, e-mail: galia-itibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6385-8627

Itybayeva Galiya Tuleubaevna, candidate of technical sciences, professor, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140007, Republic of Kazakhstan, e-mail: galia-itibaeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6385-8627

Кабулов Болат Бейсенгалиевич, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, тамақ инженериясы зерттеу мектебі, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: bolatkabylov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7619-2622

Кабулов Болат Бейсенгалиевич, кандидат технических наук, ассоц. профессор, исследовательская школа пищевой инженерии, университет Шакарима, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: bolatkabylov@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-7619-2622

Kabulov Bolat, Candidate of technical sciences, associate professor, research school of food engineering, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: bolatkabylov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7619-2622

Кайыров Рустем Айбекович, PhD, қауымд. профессор, А. Бөкетов атындығы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., 100028, Қазақстан Республикасы, e-mail: kairov.rustem@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0899-4981

Кайыров Рустем Айбекович, PhD, ассоц. профессор, Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова, г. Караганда, 100028, Республика Казахстан, e-mail: kairov.rustem@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0899-4981

Kaiyrov Rustem, PhD, Associate Professor, Karaganda Buketov University, Karaganda, 100028, Republic of Kazakhstan, e-mail: kairov.rustem@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0899-4981

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович, техника ғылымдарының докторы, Бас сарапшы, ERG Capital Projects, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: altay.recenrc@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-2394-3127

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович, доктор технических наук, Главный эксперт, ERG Capital Projects, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: altay.recenrc@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-2394-3127

Kaliakparov Altai Gindullinovich, Doctor of Technical Sciences, Chief Expert, Capital Projects, 010000, Astana, Republic of Kazakhstan, e-mail: altay.recenrc@yandex.kz, https://orcid.org/0000-0003-2394-3127

Калмаганбетов Санжар Арманулы, техника ғылымдарының магистрі, Машина жасау кафедрасының оқытушысы, Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.kalmaganbetov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0001-9248-4086

Калмаганбетов Санжар Арманулы, магистр технических наук, преподователь кафедры Машиностроение, Института Энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: s.kalmaganbetov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0001-9248-4086

Kalmaganbetov Sanzhar, Master of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Mechanical Engineering, Institute of Energy and Mechanical engineering named after A. Burkitbayev, Non-Profit Joint Stock Company Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.kalmaganbetov@satbayev.university, https://orcid.org/0009-0001-9248-4086

Каменов Алмат Айтасович, 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, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Kamenov Almat, senior lecturer, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almatkame@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0023-5419

Камзанов Нурбол Садыкұлы, Транспорттық инженерия ОП жетекшісі, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050033, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Камзанов Нурбол Садыкаонвич, Руководитель ОП Транспортная инженерия Сәтбаев университеті, г. Алматы, 050033, Республика Казахстан, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Katzanov Nurbul Sadykaonvich, Head of the Department of Transport Engineering, Satbayev University, Almaty, 050033, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.kamzanov@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-2420-8362

Камзина Надежда Еновна, PhD, Сәулет және дизайн білім беру бағдарламасының қауымд.профессоры Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140003, Қазақстан Республикасы, e-mail: nadegda_enovna@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-2482-2645

Камзина Надежда Еновна, PhD, ассоц. профессор ОП Архитектура и дизайн, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: nadegda_enovna@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-2482-2645

Katzina Nadezhda Enovna, PhD, Associate Professor of the educational program Architecture and Design Toraigyrov University, Pavlodar, 140003 Republic of Kazakhstan, e-mail: nadegda_enovna@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-2482-2645

Капелюшин Юрий Евгеньевич, PhD, аға ғылыми қызметкер, Оңтүстік Орал Мемлекеттік университеті, Челябинск қ., 454080, Ресей Федерациясы, e-mail: kapeliushinye@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-3352-1780

Капелюшин Юрий Евгеньевич, PhD, ст. научный сотрудник, Южно-Уральский Государственный университет (НИУ), 454080, г. Челябинск, Российская Федерация, e-mail: kapeliushinye@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-3352-1780

Kapelyushin Yury Evgenyevich, PhD, Senior Researcher, South Ural State University (NRU), 454080, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: kapeliushinye@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-3352-1780

Касенов Амиржан Леонидович, техника ғылымдарының докторы, профессор, техникалық факультет, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: amirzhan-1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7715-1128

Касенов Амиржан Леонидович, доктор технических наук, профессор, технический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: amirzhan-1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7715-1128

Kassenov Amirzhan, Doctor of technical sciences, professor, technical faculty, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: amirzhan-1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7715-1128

Касенов Асылбек Жумабекович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140007, Қазақстан Республикасы, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Касенов Асылбек Жумабекович, кандидат технических наук, профессор, факультет Инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140007, Республика Казахстан, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Kasenov Asylbek Zhumabekovich, Candidate of technical sciences, professor, Faculty of Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140007, Republic of Kazakhstan, e-mail: asylbek_kasenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9552-1439

Кәрім Асхат Тұлегенұлы, Механика-математика факультетінің докторанты, техника ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nazymshogelova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2601-8957

Кәрім Асхат Тұлегенұлы, докторант механико-математического факультета, магистр технических наук, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: nazymshogelova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2601-8957

Karim Askhat, PhD student at the Faculty of Mechanics and Mathematics, Master of Technical Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nazymshogelova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2601-8957

Ковалев Павел Валерьевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Ұлы Петрдің Санкт-Петербург политехникалық университеті, Санкт-Петербург қ., 187015, Ресей Федерациясы, e-mail: kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Ковалев Павел Вальеревич, кандидат технических наук, доцент, НИУ Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, г. Санк-Петербург, 187015, Российская Федерация, e-mail: kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Kovalev Pavel, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 187015, Russian Federation, e-mail: kovalev_pv@spbstu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1066-3812

Конарбаева Гульнур Нурлыбековна, магистр, Халықаралық инженерия мектебінің аға оқытушысы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070010, Қазақстан Республикасы, e-mail: gkonar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2934-972X

Конарбаева Гульнур Нурлыбековна, магистр, ст. преподаватель Международной школы инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070010, Республика Казахстан, e-mail: gkonar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2934-972X

Konarbayeva Gulnur, Master's degree, Senior Lecturer at the International School of Engineering, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070010, Republic of Kazakhstan, e-mail: gkonar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2934-972X

Куликов Виталий Юрьевич, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, FTM кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: mlpikm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Куликов Виталий Юрьевич, кандидат технических наук, профессор, кафедр НТМ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: mlpikm@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Kulikov Vitaly Yurievich, PhD, Professor of the Department of NTM, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: mlpikm@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6191-8569

Кулумбаев Нурбулат Калиевич, Металлургия кафедрасының зертхана меңгерушісі, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kulumbaev.nurbulat@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Кулумбаев Нурбулат Калиевич, заведующий лабораториями кафедры Металлургия, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар,140008, Республика Казахстан, e-mail: Kulumbaev.nurbulat@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Kulumbayev Nurbulat, Head of Laboratories, Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kulumbaev.nurbulat@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-4104-037X

Курмангалиева Лаззат Амановна, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Satbayev University Робототехника және автоматтандырудың техникалық құралдары кафедрасы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: lezzet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2922-2518

Курмангалиева Лаззат Амановна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, кафедра Робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: lezzet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2922-2518

Kurmangaliyeva Lazzat Amanovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: lezzet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2922-2518

Кусаинов Руслан Бексултанович, Машина жасау мамандығы бойынша докторант, Инженерия факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: kussainovrb@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0004-9844-0027

Кусаинов Руслан Бексултанович, докторант по специальности Машиностроение, Факультет инженерии, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: kussainovrb@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0004-9844-0027

Kussainov Ruslan Beksultanovich, PhD student in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kussainovrb@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0004-9844-0027

Қадыров Әділ Суратұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Көлік техникасы және логистика жүйелері кафедрасы, Көлік-жол факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0001-7071-2300

Кадыров Адиль Суратович, доктор технических наук, профессор, кафедра Транспортная техника и логистика, Транспортно-дорожный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, https://orcid.org/0000-0001-7071-2300

Kadyrov Adil Suratovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Engineering and Logistics Systems, Faculty of Transport and Road Engineering, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, https://orcid.org/0000-0001-7071-2300

Қайролла Бақтияр Қайратоллаұлы, ғылыми қызметкер, Қазақстан ғылым және технологиялар институты, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: dark.kz.best@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3883-7124

Кайролла Бактияр Кайратоллаулы, научный сотрудник, Казахстанский институт науки и технологий, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: dark.kz.best@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3883-7124

Kairolla Baktiyar Kairatollauly, researcher, Kazakhstan Institute of Science and Technology, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: dark.kz.best@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3883-7124

Лайхан Саламат Аргынулы, Инженер технолог, техника ғылымдарының магистрі, аспирант ЖШС ҒЗИО ERG, Ақтөбе қ., 030000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Salamat.Laikhan@erg.kz, https://orcid.org/0000-0001-6847-4075

Лайхан Саламат Аргынулы, Инженер технолог, магистр технических наук, аспирант ТОО НИИЦ ERG, г. Актобе 030000, Республика Казахстан, e-mail: Salamat.Laikhan@erg.kz, https://orcid.org/0000-0001-6847-4075

Laikhan Salamat Argynuly, Engineer technologist, master og technical sciences, postgraduate student, LTD SERC ERG, Aktobe, 030000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Salamat.Laikhan@erg.kz, https://orcid.org/0000-0001-6847-4075

Лахно Валерий Анатольевич, Өмір және қоршаған орта ғылымдарының ұлттық университетінің техникалық ғылым докторы, профессоры, Киев қ., 03041Украина, e-mail: valss21@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-9695-4543

Лахно Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украина, г. Киев, 03041, Украина, e-mail: valss21@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-9695-4543

Lakhno Valeriy Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences, Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: valss21@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-9695-4543

Ликунов Александр Викторович, инженер ИННОТЕХ ғылыми-өндірістік бірлестігі ЖШС, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: likunov65@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-5387-3284

Ликунов Александр Викторович, Инженер ТОО НПО ИННОТЕХ, г. Усть-Каменогорск, 070000, Республика Казахстан, e-mail: likunov65@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-5387-3284

Likunov Aleksandr Viktorovich, Engineer of INNOTECH Scientific and Production Association LLP, Ust-Kamenogorsk, 070000, Republic of Kazakhstan, e-mail: likunov65@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-5387-3284

Лу Наталья Юльевна, техника ғылымдарының кандидаты, директордың орынбасары, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: hmi2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3624-0984

Лу Наталья Юльевна, кандидат технических наук, Заместитель директора, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева г. Караганда, 100008, Республика Казахстан, e-mail: hmi2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3624-0984

Lu Natalia Yulyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Director, Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, 100008, Republic of Kazakhstan, e-mail: hmi2009@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3624-0984

Лукаш Варгула, PhD, профессор, Машина жасау факультеті, Познань политехникалық университеті, Познань қ., 34275, Польша Республикасы, e-mail: lukasz.wargula@put.poznan.pl, https://orcid.org/0000-0002-3120-778X

Лукаш Варгула, PhD, профессор, Факультет машиностроения Познаньского политехнического университета, г. Познань, 34275, Республика Польша, e-mail: lukasz.wargula@put.poznan.pl, https://orcid.org/0000-0002-3120-778X

Lukasz Wargula, PhD, Professor of Faculty of Mechanical Engineering, Poznan Polytechnic University, Poznan, 34275, Poland, e-mail: lukasz.wargula@put.poznan.pl, https://orcid.org/0000-0002-3120-778X

Мадиярова Альмира Саурбаевна, қауымд. профессор м.а. Есенов университеті, Инжиниринг факультеті, Ақтау қ., 130000, Қазақстан Республикасы, e-mail: almira.madiyarova@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2236-4038

Мадиярова Альмира Саурбаевна, и. о. ассоц. профессора Есенов университет, факультет Инжиниринга, г. Актау, 130000, Республика Казахстан, e-mail: almira.madiyarova@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2236-4038

Madiyarova Almira Saurbayevna, Acting associate professor Yessenov University, Faculty of Engineering, Aktau, 130000, Republic of Kazakhstan, e-mail: almira.madiyarova@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2236-4038

Макашев Куаныш Токтарбекович, PhD, қауымд. профессор, Торайгыров университеті Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.kuanysh87@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2971-6322

Макашев Куаныш Токтарбекович, PhD, ассоц. профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: m.kuanysh87@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2971-6322

Makashev Kuanysh Toktarbekovich, PhD, associate professor, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.kuanysh87@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2971-6322

Максим Борисович Бурьян, PhD, қауымд. профессор, ғылыми қызметті басқару профессоры, полковник, ҚРҰҚК Шекара академиясы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: maxim_buryn@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-1174-6400

Максим Борисович Бурьян, PhD, ассоц. профессор, профессор управления научной деятельности ПА КНБ РК полковник, Пограничная академия КНБ, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: maxim_buryn@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-1174-6400

Maksim Borisovich Buryan, PhD, Professor of Scientific Activity Management, Associate Professor, Colonel Border Academy of the National Security Committee of Republic of Kazakhstan (NSC RK), Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: maxim_buryn@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-1174-6400

Мақашева Астра Мұндуққызы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Машина жасау факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: astra-makasheva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2249-3435

Макашева Астра Мундуковна, доктор технических наук, профессор, Машиностроительный факультет, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: astra-makasheva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2249-3435

Makasheva Astra Mundukovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Mechanical Engineering Faculty, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: astra-makasheva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2249-3435

Малашкевичуте-Брийан Елена Иозасовна, аға оқытушы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті ҒТМ кафедрасы, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: elenei66@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0368-0788

Малашкевичуте-Брийан Елена Иозасовна, ст. преподаватель, кафедра НТМ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: elenei66@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0368-0788

Malashkevichute-Brillant, Yelena Iozasovna, Senior lecturer of the Department of NTM, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: elenei66@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0368-0788

Малышев Виталий Павлович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Энтропия-ақпараттық талдау зертханасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: eia_hmi@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3996-1533

Малышев Виталий Павлович, доктор технических наук, профессор, лаборатория Энтропийно-информационного анализа, Химико-металлургичекий институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: eia_hmi@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3996-1533

Vitalyi Pavlovich Malyshev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Laboratory of Entropy-information analysis, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: eia_hmi@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3996-1533

Мамбеталиева Гулсара Сапиевна, профессор ассистенті Есенов университеті, Инжиниринг факультеті, Ақтау қ., 130000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulsara.mambetaliyeva@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0390-1886

Мамбеталиева Гулсара Сапиевна, ассистент профессора Есенов университет, факультет Инжиниринга, г. Актау, 130000, Республика Казахстан, e-mail: gulsara.mambetaliyeva@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0390-1886

Mambetaliyeva Gulsara Sapiyevna, Assistant Professor Yessenov University, Faculty of Engineering, Aktau, 130000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulsara.mambetaliyeva@yu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0390-1886

Манапов Қайсар Бауыржанұлы, Логистика (сала бойынша) мамандығы бойынша магистрант, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kaisarmanapov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9459-8753

Манапов Қайсар Бауыржанұлы, магистрант по специальности Логистика (по отраслям), Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: kaisarmanapov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9459-8753

Manapov Kaisar Baurzhanuly, Master's degree in Logistics (by Industry), Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kaisarmanapov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9459-8753

Маусумбаев Сабит Сапарбекович, докторант, Химия және химиялық технология кафедрасы, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sabit_mausumbaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2010-9227

Маусумбаев Сабит Сапарбекович, докторант, кафедра Химия и химические технологии, Факультет естественных наук, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: sabit_mausumbaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2010-9227

Maussumbayev Sabit Saparbekovich, Doctoral student of the Department of Chemistry and Chemical Technologies, Faculty of Natural Sciences, Toraigyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sabit_mausumbaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-2010-9227

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD, Ферроқорытпалар және тотықсыздандыру үрдістері зертханасының меңгерушісі, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., 100009, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.ye.n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Махамбетов Ерболат Нысаналыулы, PhD, Заведующий лабораторией Ферросплавов и процессов восстановления, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Караганда, 100009, Республика Казахстан, e-mail: m.ye.n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Makhambetov Yerbolat Nysanalyuly, PhD, Head of the Laboratory of Ferroalloys and Reduction Processes, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev, Karaganda, 100009, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.ye.n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8613-9932

Маханов Султан Нурболатович
Техника ғылымдарының магистрі, оқытушы (ассистент)
Торайгыров университеті
Павлодар қ.
140000
Қазақстан Республикасы,
e-mail: mahanov-s@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-8758-3987
8 747 218 2704

Маханов Султан Нурболатович
Магистр технических наук, преподаватель (ассистент)
Торайгыров университет
г. Павлодар
140000
Республика Казахстан,
e-mail: mahanov-s@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-8758-3987
8 747 218 2704

Makhanov Sultan Nurbolatovich
Master of Engineering Sciences, Lecturer (Assistant)
Toraigyrov University,
Pavlodar
140000
Republic of Kazakhstan,
e-mail: mahanov-s@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-8758-3987
8 747 218 2704

Махмутов Болат Бижанұлы - химия ғылымдарының кандидаты, ғылыми жұмыс және халықаралық қоғамдастық жөніндегі проректор, Қарағанды индустриалды университеті,Теміртау, 101400, Қазақстан Республикасы, e-mail: bb.makhmut@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-8978-8097

Махмутов Болат Бижанович - кандидат химических наук, проректор по научной работе и международному сотрудничеству, Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, 101400, Республика Казахстан, e-mail: bb.makhmut@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-8978-8097

Bolat B. Makhmutov Bizhanovich - Candidate of Chemical Sciences, Vice-Rector for Scientific Work and the International Community, Karaganda Industrial University, Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: bb.makhmut@tttu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-8978-8097

Машекенова Асия Хасеновна, техника ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: amashekenova@edu.ektu.kz 87771397141, https://orcid.org/0000-0003-3556-3033

Машекенова Асия Хасеновна, кандидат технических наук, старший преподаватель, Международная школа инженерии, Восточно Казахстанский технический Университет им. Д. Серикбаева , г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: amashekenova@edu.ektu.kz 87771397141, https://orcid.org/0000-0003-3556-3033

Mashekenova Asiya Khasenovna, candiate of technical sciences, senior lecturer, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: amashekenova@edu.ektu.kz 87771397141, https://orcid.org/0000-0003-3556-3033

Мәдина Есдәулетқызы Исаметова, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.issametova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4630-271X Үялы тел.:+77753219424

Мадина Есдаулетовна Исаметова, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: m.issametova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-4630-271X

Madina Yesdauletovna Issametova, candidate of technical sciences, associate professor, Satbayev University, Almaty, 050013, Kazakhstan e-mail: m.issametova@satbayev.university https://orcid.org/0000-0003-4630-271X

Cell phone: +77753219424
Сот.тел.: +77753219424

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

***В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.**

***Количество соавторов одной статьи не более 5.**

***Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 %.**

***Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.**

***Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.**

***Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

***Квитанция об оплате предоставляется после принятия статей к публикации. Стоимость публикации в журнале составляет 20 000 тенге для направлений металлургия, машиностроение и транспорт, а для остальных направлений 1 000 тенге за страницу.**

***Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз.**

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц печатного текста.** *Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).*

Структура научной статьи включает название, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. *ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Фамилия, имя, отчество** (полностью) автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках *(жирным шрифтом, по центру)*;

4 **Ученая степень, ученое звание;**

5 **Аффилиация** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

6 **E-mail;**

7 **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность *(не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий)*;

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (*рекомендуемый объем аннотации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец)*;

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования *(оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.)*. Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке *(см. образец)*;

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- Введение / Кіріспе / Introduction *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*. Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** *(при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

- **Выводы / Қорытынды / Conclusion** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов)*.

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников / Пайдаланған деректер тізімі / References** *(жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре)* включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 *(см. образец)*.

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. Объем не менее 10 не более чем 20 наименований (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом*.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

11 **Иллюстрации, перечень рисунков** и подрисуночные надписи к ним представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

12 **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)
В электронном варианте приводятся полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются):

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

Информация для авторов

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления.

Периодичность издания журналов – четыре раза в год (ежеквартально)

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 01 февраля;
- второй квартал до 01 мая;
- третий квартал до 01 августа;
- четвертый квартал до 01 ноября.

Квитанция об оплате предоставляется после принятия статей к публикации. Стоимость публикации в журнале составляет 20 000 тенге для направлений металлургия, машиностроение и транспорт, а для остальных направлений 1 000 тенге за страницу.

Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на почту: nitk.tou.edu.kz. Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,
НАО «Торайгыров университет»,
Издательство «Toraighyrov University», каб. 137.
Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).
E-mai1: **nitk.tou.edu.kz.**

Наши реквизиты:

НАО «Торайгыров университет» 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 16.05.25 ж. жіберілді. Басуға 30.06.25 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
5,07 Mb RAM
Шартты баспа табағы 1,09 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4420

«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