

зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан 04.04.2013 г.
 Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания 13508-Ж.

Издается с января 2003 г.

Приказом № 603 от 12.07.2024 г. Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК внесен в перечень научных изданий, рекомендуемых для публикации основных результатов научной деятельности.

В журнале публикуются материалы, отражающие состояние и перспективы развития геологии, горного дела и металлургии не только в нашей стране, но и за рубежом. Журнал освещает проблемы охраны труда и техники безопасности, экономики, подготовки кадров и других вопросов, связанных с горно-металлургическим комплексом. В журнале представлены статьи прикладного характера, результаты фундаментальных исследований, служащие основой для новых технических разработок.

При перепечатке материалов ссылка на Горный журнал Казахстана обязательна. Ответственность за достоверность сведений в публикуемых статьях и рекламных материалах несут авторы и рекламодатели. Мнение редакции не всегда может совпадать с мнением авторов.

Адрес редакции:
 050026, г. Алматы, ул. Карасай батыра, 146, оф. 401,
 +7 (747) 343-15-02
minmag.kz

Представитель журнала на специализированных мероприятиях – Общество с ограниченной ответственностью «Маркетинг от Тимченко»

Представители журнала:

Республика Узбекистан –
ШЕРЗОД ВАФО-ОГЛЫ КАРИМОВ
karimov20-13@mail.ru

Российская Федерация, Сибирский регион –
ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАПОШНИК
shaposhnikyury@mail.ru

Периодичность 12 номеров в год

Тираж 1500 экземпляров

ISSN 2227-4766

Подписной индекс 75807 в каталогах:
 АО «Казпочта»,
 ТОО «Агентство «Евразия пресс»

Подписано в печать 30.04.2026 г.

Отпечатано:

«Print House Geron»
 ул. Сатпаева 30А/3, офис 124
 тел: + 7 727 250-47-40,
 + 7 727 398-94-59,
 факс: + 7 727 250-47-39

УЧРЕДИТЕЛЬ И СОБСТВЕННИК
 ТОО «Научно-производственное
 предприятие «ИНТЕРРИН»



Главный редактор

М.Ж. БИТИМБАЕВ, mbitimbaev@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Л.А. КРУПНИК, leonkr38@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Х.А. ЮСУПОВ, yusupov_kh@mail.ru

Ответственный редактор

Т.С. ДОЛИНА, Tatyana.Dolina@interrin.kz

Редакционная коллегия:

Барменишинова М.Б., канд. техн. наук, ассоц. профессор

Бекботаева А.А., PhD, ассоц. профессор

Бондаренко В.И., д-р техн. наук, профессор (Украина)

Vach K., доктор Ph.D (Чехия)

Демин В.Ф., д-р техн. наук, профессор

Каримов Ш.В., PhD, и.о. доцента кафедры (Узбекистан)

Кожгозулов К.Ч., д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки КР, академик (Кыргызская Республика)

Levin E., доктор Ph.D, ассоц. профессор (США)

Mishra B.M., профессор (США)

Молдабаев С.К., д-р техн. наук, профессор

Nikoloski A.N., профессор (Австралия)

Петров Е.А., д-р техн. наук, профессор (Россия)

Ратов Б.Т., д-р техн. наук, профессор

Рысбеков К.Б., канд. техн. наук, профессор

Sladkovsky A., д-р техн. наук, профессор (Польша)

Столповских И.Н., д-р техн. наук, профессор

Тамбиев П.Г., канд. техн. наук

Хайитов О.Г., д-р геол.-минерал. наук, профессор, академик (Узбекистан)

Ченуштанова Т.А., доктор Ph.D, канд. техн. наук, профессор

Уенепех А.М., ассоц. профессор (Оман)

® – статья на правах рекламы

ⓘ – информационное сообщение

✍ – статья публикуется в авторской редакции

- 3 Колонка главного редактора
- 4 Точка опоры индустрии: как специфика производства определяет выбор оборудования
- 4 Решения для промышленной сварки: анализ моделей Transmig 500DP и 500H
- 5 Анализ работы Pike PSF и MXL под промышленной нагрузкой
- Взрывное дело**
- 7 *С.В. Аleshkova, И.А. Пустовалов, Т.Б. Наишауов, В.Е. Зарко
Оценка химической совместимости эмульсионных промышленных взрывчатых веществ с пиритсодержащими рудами месторождений Карагандинской области
- Разрушение горных пород**
- 15 С.А. Мустафин, Б. Хусан, Ш.Б. *Зейтинова, М. Iрhar
Экспериментальное исследование направленного взрывного разрушения бетонных образцов трубчатými вставками
- Геодезия**
- 21 *М.В. Igemberlina, G.E. Zhunussova, Zh. Aldanysh A.S. Tuyakbay
The use of geoinformation technologies to visualize the results of geodetic monitoring of the Earth's surface displacement
- Бурение скважин**
- 28 *Ж.С. Сарқұлова, Г.А. Исенгалиева, А.Г. Гусманова, А.А. Ибжанова
Жасанды интеллект негізінде горизонтальды бағытталған бұрғылау процестерін мониторинг жасау мен оңтайландыру
- 35 Н.А. Бесбаева, *Г.Ж. Бимбетова, Г.М. Эфендиев, К.С. Надилов
Мұнай және газ ұңғымаларын бұрғылауға арналған жеңілдетілген бұрғылау шаю сұйықтығы
- Обогащение полезных ископаемых**
- 43 И.Ю. Мотовилов, *А.К. Абушахманов, Ш.А. Телков, М.Б. Барменишинова
Исследование гравитационной обогатимости железосодержащей руды месторождения Алтын-Шоко
- Обогащение полезных ископаемых. Производственный опыт**
- 51 *А. Доберсек, А. Кирнарский
Теория и практика технологической однофункциональности в процессах обогащения полезных ископаемых
- Охрана труда и безопасность в горной промышленности**
- 60 Н.Д. Спатаев, *Г.С. Саттарова, С.С. Кудрявцев, Н.А. Медеубаев
Оценка сезонного влияния естественной тяги на вентиляцию подземных горных выработок рудников
- Геоэкология**
- 67 E. Ibragimova, A-B. Nurlybay, K. Berikkyzy, *N. Abdimutalip
Geocological assessment and ESG analysis of the environmental impact of mining activities
- 75 *А.С. Нуртаева, Р.А. Исаева, У.П. Байысбай, С.Е. Головатый
Оценка сравнительной экологической безопасности традиционных производственных схем и утилизации промышленных отходов
- 82 Памяти Гурьевского Бориса Алексеевича (19.09.1939 – 02.04.2026)
- 83 Памяти Гудкова Бориса Васильевича (16.09.1951 – 13.04.2026)
- 84 Требования к оформлению и условия предоставления статей

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



**Марат
Жакупович
Битимбаев**
главный редактор

Дорогие читатели!

Дорогие коллеги!

Апрель месяц имеет определенное сакральное значение в жизни геологов, для геолого-горнодобывающей (в т. ч. и для жидких и газообразных углеводородов) отрасли в целом и одновременно для оценки уровня развития науки в нашей стране. Все вы об этом знаете, и мы всегда и с нетерпением и радостью ждем мысли и выводы, куда и как страна должна идти. Вопросы технологического суверенитета, социального благополучия, обеспечения будущего уверенного развития экономики – это ежегодная тематика обсуждений, начиная с высоких трибун, критических раздумий о движении в нужном направлении, сознания в той высокой гуманной, нацеленной на постоянстве и сегодня, и завтра, и в далеком будущем – все эти насущные потребности сконцентрированы в апреле.

Апрель – это праздники, связанные с Днем геолога, Днем науки и днем космонавтики. Захочешь и не придумаешь, но день рождения великого К.И. Сатпаева, старт первой ракеты, унесшего в «безмолвную синеву» космического пространства первого человека, из казахстанской степи, весенний зов природы к началу сезона общения знатоков-геологов с недрами Матушки-Земли слились вместе и создали обстановку ежегодного желанного праздника.

Праздники радостные и ответственные, задачи и перед всей наукой, и перед геологами акцентированы на растущие требования, возможности и направления движения огромных финансовых ресурсов совокупно с ожиданиями – все вместе говорит, что наша страна вошла в новую эпоху успешного определения своей роли и места в цивилизованном мире.

Громадье планов, связанное с вхождением, начиная со школьной скамьи, в мир цифровых технологий, искусственного интеллекта, роботизированных комплексов, которые под управлением современного специалиста должны неузнаваемо и полезно изменить жизнь, конечно, будет реализовано.

Нам осталось только научиться добывать и перерабатывать полезные ископаемые с применением в подземных условиях, на фабриках и заводах новых технологических решений. Это и есть наша главная задача, которая и будет нашей путеводной звездой в будущем, начиная с сегодня.

С праздником и исполнением и желаний, и планов, и требований наступившей новой эпохи!

ТОЧКА ОПОРЫ ИНДУСТРИИ: КАК СПЕЦИФИКА ПРОИЗВОДСТВА ОПРЕДЕЛЯЕТ ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ

Путь человеческой цивилизации — это история поиска способов повышения эффективности труда. Именно эволюция инструментов открыла доступ к новым технологиям преобразования материи: от первого использования камня до самых сложных процессов термообработки металлов. Однако настоящий индустриальный прорыв, определивший облик современной промышленности, произошел с появлением технологии электродуговой сварки.

Именно сварка обеспечила прочность сверхсложным отраслям: строительству металлоконструкций, АЭС и аэрокосмической отрасли. Эффективность сварки определяется стабильной работой оборудования вне зависимости от внешних условий: будь то суровый климат или удаленные объекты.

Активное развитие промышленности и энергетики в Казахстане диктует новые стандарты скорости и качества. Так, выбор оборудования из технической рутины переходит в стратегическую задачу для бизнеса. Рост в горнодобывающем секторе, общем машиностроении, производстве грузовых вагонов и цистерн обуславливает высокий спрос на работу с углеродистыми сталями. Ее применение закреплено в действующих ГОСТах Казахстана для типовых конструкций.

Инверторы линейки Transmig от ESAB соответствуют отраслевой специфике: аппараты предназначены для сварки углеродистых и нержавеющей сталей, а также алюминиевых сплавов.

Проанализируем на их примере, какие параметры определяют стабильность сварочного процесса в промышленных условиях.

РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ СВАРКИ: АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ TRANSMIG 500DP И 500H

Общей платформой для моделей является система защиты от термических перегрузок. Инверторы оснащены блоком жидкостного охлаждения с интегрированным датчиком потока. В случае нарушения циркуляции или падения давления в системе охлаждения, аппарат выдает предупреждение и блокирует работу. Это предотвращает оплавление сварочной горелки и повреждение подводящих шлангов, исключая простои производства и затраты на замену дорогостоящих комплектующих.

Модель 500DP обеспечивает непрерывный производственный цикл в режиме 24/7. Технической особенностью является 100% продолжительность нагрузки при максимальном сварочном токе 500 А, что позволяет использовать аппарат без пауз на охлаждение.

Модель поддерживает режимы «импульс» и «двойной импульс»: функции обеспечивают стабильный перенос металла без образования брызг. Это гарантирует высокую прочность соединения и эстетику сварного шва, не требующего дополнительной механической обработки.

Встроенные синергетические программы для полуавтоматической сварки (MIG/MAG) оптимизируют рабочий процесс, повышая эффективность в цехах среднего масштаба и на крупных оборонных или машиностроительных предприятиях. Аппарат работает в газовых смесях и в чистом углекислом газе. На корпусе предусмотрена специализированная розетка 36В для подключения подогревателя газа.

Модель 500H оснащена чипом ARM, регулирующим выходное напряжение и форму волны тока. Это стабилизирует дугу при питании от автономных генераторов, защищая аппарат от скачков напряжения. Традиционные



аппараты требуют ручной синхронизации десятков параметров, в Transmig 500H сварщик корректирует только скорость подачи проволоки.



Система устанавливает значения тока и напряжения, опираясь на заложенные в память алгоритмы, учитывающие диаметр и тип проволоки, и вид защитного газа.

Области применения

Технические характеристики обеих моделей позволяют применять их в ответственных отраслях. В мостостроении инверторы используются для формирования соединений несущих элементов. Сфера транспортного машиностроения предполагает применение оборудования при производстве и ремонте дорожно-строительной спецтехники. Возможности аппаратов востребованы и в промышленном строительстве при монтаже металлокаркасов зданий и возведении сложных инженерных сооружений.

Высокая производительность инверторов требует эффективной передачи тока и охлаждения. Отдача системы достигается за счет использования профессиональных горелок, рассчитанных на экстремальные нагрузки.

АНАЛИЗ РАБОТЫ PIKE PSF И MXL ПОД ПРОМЫШЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

В технологической цепочке горелки серии Pike выполняют функцию финального звена, обеспечивающего подачу сварочного тока, защитного газа и присадочной проволоки в зону сварки.

Линейка разделена на две серии в зависимости от типа расходных материалов. Pike PSF спроектированы под комплектующие производителя, а Pike MXL совместимы со стандартными евро-расходниками.

Выбор модели зависит от диаметра проволоки и интенсивности производственных процессов. Для стандартных условий предусмотрены горелки с воздушным охлаждением: модификация на 300 А адаптирована под проволоку диаметром 1,2 мм. Версии на 400 и 500 А позволяют работать с материалом сечением 1,6 мм. В случаях, когда производственный цикл требует эксплуатации в режиме повышенных нагрузок, применяются решения с жидкостным охлаждением, представленные одноконтурной моделью 420, а также более мощными двухконтурными модификациями 430 и 520.

Горелки объединяет функции подачи проволоки, подвода тока и газовой защиты, создавая стабильные условия для формирования шва и изоляции расплава от атмосферных воздействий. Комплексная защита от износа вклю-

чает никелированные сопла с высокой отражающей способностью, износостойкие сплавы для стабилизации дуги и термостойкие рукоятки с накладками, защищенными от отслоения в условиях высоких температур.

Горелки Pike совместимы с 80% парка промышленного сварочного оборудования, включая модели других производителей. Задача инструмента — обеспечить бесперебойную подачу проволоки и газа.

В конечном итоге, выбор инструментов — это поиск баланса между текущими задачами и перспективами роста предприятия. Технологическая сложность проектов диктует новые правила: недостаточно обеспечить соединение, необходимо гарантировать его стабильную повторяемость в любых условиях. Опыт ведущих производителей показывает, что эволюция оборудования идет по пути защиты от человеческого фактора и внешних рисков. Интеграция умных систем управления и защиты превращает сварочный пост в высокотехнологичный узел, готовый к работе в составе цифрового производства. Это доказывает, что инвестиции в инженерно выверенные решения — это не только обновление парка техники, но и залог устойчивости индустрии перед будущими вызовами.



Инновационные решения с доказанной эффективностью

Надежные решения для процессов измельчения и дробления, основанные на экспертных знаниях в области инжиниринга, качественной технической поддержке и высоком качестве производства. Разработаны для обеспечения бесперебойной эксплуатации, повышения надежности технологического процесса и снижения эксплуатационных расходов.



Инженерные решения, которым можно доверять



Неизменное качество производства



Гарантированная стабильность эксплуатации

ME Elecmetal
Тел: +7 914 880 4545
+7 777 247 0787
+1 778 875 7525
Эл.Почта: mongolia@me-elecmetal.com

Код МРНТИ 52.13.21

*С.В. Алешкова^{1,2}, И.А. Пустовалов¹, Т.Б. Нашауов^{1,2}, В.Е. Зарко³¹ТОО «Экспертно-сертификационный центр взрывчатых материалов» (г. Алматы, Республика Казахстан),²Казахский национальный университет имени аль-Фараби (г. Алматы, Республика Казахстан),³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск, Россия)

ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ПИРИТСОДЕРЖАЩИМИ РУДАМИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАРАГАНДИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Настоящая работа посвящена оценке возможности использования безоболочных эмульсионных взрывчатых веществ с температурой около 60 °С при ведении взрывных работ на месторождениях Карагандинской области, где встречаются горные породы, агрессивность которых обусловлена содержанием серы и ее химических соединений. Актуальность исследования обусловлена риском снижения термохимической стабильности взрывчатых веществ на основе нитрата аммония при их контакте с пиритсодержащими рудами, что может приводить к незапланированным экзотермическим реакциям. В рамках исследования проведен рентгеноспектральный микроанализ и рентгенофазовый анализ для определения минерального и элементного состава, а также выполнены термические испытания. В результате исследования были разработаны мероприятия по промышленной безопасности, применительно и для аналогичных месторождений Республики Казахстан.

Ключевые слова: пиритсодержащая руда, эмульсионное взрывчатое вещество, термогравиметрический анализ (ТГА), химическая совместимость, нитрат аммония, самопроизвольное разложение, промышленная безопасность.

Қарағанды облысы кен орындарының пириттерді қамтитын кендерімен эмульсиялық өндірістік жарылғыш заттардың химиялық үйлесімділігін бағалау

Андатпа. Осы жұмыс Қарағанды облысының кен орындарында, құрамында күкірт және оның химиялық қосылыстары бар тау жыныстары кездесетін жағдайларда, температурасы шамамен 60 °С болатын қабықшасыз эмульсиялық өнеркәсіптік жарылғыш заттарды жару жұмыстарында қолдану мүмкіндігін бағалауға арналған. Зерттеудің өзектілігі пиритқұрамды кендермен жанау кезінде аммоний нитраты негізіндегі жарылғыш заттардың термохимиялық тұрақтылығының төмендеу қаупімен байланысты, бұл жоспардан тыс экзотермиялық реакцияларға әкелуі мүмкін. Зерттеу аясында минералдық және элементтік құрамды анықтау үшін рентгеноспектралдық микроанализ және рентгенфазалық талдау жүргізілді, сондай-ақ термиялық сынақтар орындалды. Зерттеу нәтижесінде Қазақстан Республикасындағы ұқсас кен орындары үшін де қолдануға болатын өнеркәсіптік қауіпсіздік шаралары әзірленді.

Түйінді сөздер: пиритті руда, эмульсиялық жарылғыш зат, термогравиметриялық талдау, химиялық үйлесімділік, аммоний нитраты, өздігінен ыдырау, өндірістік қауіпсіздік.

Evaluation of the chemical compatibility of emulsion industrial explosives with pyrite-containing ores from deposits of the Karaganda region

Abstract. This study is devoted to assessing the feasibility of using shell-less emulsion industrial explosives with a temperature of about 60 °C in blasting operations at deposits in the Karaganda region, where rocks occur whose aggressiveness is обусловлен by the presence of sulfur and its chemical compounds. The relevance of the study is determined by the risk of a decrease in the thermochemical stability of ammonium nitrate-based explosives when they come into contact with pyrite-containing ores, which may lead to unplanned exothermic reactions. Within the framework of the study, X-ray spectral microanalysis and X-ray phase analysis were carried out to determine the mineral and elemental composition, and thermal tests were also performed. As a result of the research, industrial safety measures were developed, applicable to similar deposits in the Republic of Kazakhstan as well.

Key words: pyrite-containing ore, emulsion explosive, thermogravimetric analysis (TGA), chemical compatibility, ammonium nitrate, spontaneous decomposition, industrial safety.

Введение

За последние годы при добыче рудных полезных ископаемых с использованием метода буровзрывных работ лидирующее место занимает применение эмульсионных взрывчатых составов, преимущественно на основе нитрата аммония, закачка которых в скважины осуществляется при помощи смесительно-зарядной самоходной техники [1].

Данная технология позволила обеспечить механизацию процесса ведения взрывных работ, повысить уровень его безопасности, решить проблемы с зарядкой обводненных скважин без предварительной откачки из них воды.

Разработка эмульсионных взрывчатых веществ является одним из наиболее перспективных направлений. Это обусловлено значительным улучшением эксплуатационных характеристик, а также безопасности данных материалов [2].

Однако, одним из остаточных препятствий в области безопасности при использовании эмульсионных взрывчатых веществ на основе нитрата аммония остается по-

вышенное содержание пирита в некоторых горнорудных массивах. Установлено, что основную опасность представляет пирит, содержащийся практически во всех сульфидных породах [3].

В присутствии пирита термическая стабильность эмульсионных взрывчатых веществ снижается. Присутствие пирита снижает температуру и увеличивает скорость разложения [4].

Взаимодействие нитрата аммония с пиритсодержащими рудами возникает при определенной температуре рудного тела. Эксперименты показали, что температура начала взаимодействия в присутствии кислотной воды связана с параметрами агрессивности следующей зависимостью [5]:

$$t = \frac{2981}{S^{0,93} * H^{0,28}}, \quad (1)$$

где S – содержание серы в руде, %;

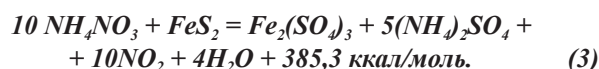
H – концентрация серной кислоты в рудничной воде, г/л.

Прямое взаимодействие нитрата аммония с пиритсодержащими рудами также возникает при определенной температуре, но характеризуется более интенсивным ее ростом в ходе реакции и спонтанным развитием без периода стабилизации. Зависимость температуры начала взаимодействия от содержания серы в руде имеет вид [6]:

$$t = 178,6 - 2,5S, \quad (2)$$

где S – содержание серы в руде, %.

Учитывая всевозможные реакции механизма взаимодействия нитрата аммония с пиритом, институтом «УНИПРОМЕДЬ» приведена суммарная реакция [7]:



Взаимодействие нитрата аммония в составе эмульсии с пиритсодержащими рудами происходит в отличных условиях от прямого взаимодействия. Из экспериментальных данных установлено, что в составе эмульсии температура начала взаимодействия снижается не так сильно, как при прямом взаимодействии [8].

На основании анализа литературных данных [4, 5, 6, 7, 8, 9] можно сделать вывод, что самопроизвольное разложение нитрата аммония в составе взрывчатых веществ при прямом контакте с пиритсодержащими рудами зависит от следующих факторов:

- температуры окружающей среды;
- площади поверхностного контакта с сульфидосодержащими рудами;
- дисперсности контактирующих веществ;
- наличия дополнительных примесей и агрессивных вод;
- присутствия влаги.

Из этого следует, что окисление пиритсодержащих руд, сопровождающееся повышением температуры окружающей среды и снижением водородного показателя (рН) рудничных вод, способствует созданию условий, снижающих термохимическую стабильность применяемых взрывчатых веществ [9].

Состав используемых эмульсионных взрывчатых веществ также влияет на совместимость с горными породами. Способность к химическому взаимодействию с горными породами и грунтовыми водами является одним из основных требований, предъявляемых к промышленным взрывчатым веществам [10].

Учеными был проведен ряд исследований, направленных на снижение взаимодействия между пиритом и эмульсией. Было установлено, что при добавлении определенных добавок возможно повысить стабильность эмульсионных взрывчатых веществ в среде пирита [11, 12].

Данные исследования ориентированы на лабораторные модельные системы и направлены преимущественно на изучение влияния стабилизирующих и ингибирующих добавок, без учета специфики минерального состава пиритсодержащих руд конкретных месторождений, а также реальных термических условий ведения взрывных работ на горнорудных предприятиях Казах-

стана. Вопрос химической совместимости эмульсионных промышленных взрывчатых веществ с такими рудами в условиях агрессивной среды остается недостаточно изученным.

В данной работе приведены результаты исследований химической совместимости эмульсионных промышленных взрывчатых веществ с пиритсодержащими рудами одного из месторождений Карагандинской области, в результате которых определены условия использования данного типа взрывчатых веществ для взрывания горнорудных массивов с агрессивной средой.

Ранее аналогичные исследования были проведены научными институтами «УНИПРОМЕДЬ», «ВНИИцветмет», ГосНИИ «Кристалл» и т. д., однако эти исследования распространялись только на порошкообразные (аммониты), горячельющиеся (ГЛТ) и гранулированные промышленные взрывчатые вещества.

Методы исследования

Перед проведением исследований, на одном из месторождений Карагандинской области, где ведется добыча полиметаллических руд, были отобраны пробы пиритсодержащей руды, а также рудничных вод с данных горизонтов.

Для определения содержания пирита и серы в отобранных образцах руды использовали метод рентгеноспектрального микроанализа и рентгенодифрактометрического анализа.

При исследовании элементного состава образцов использовали электронно-зондовый микроанализатор марки Superprobe 733, анализы элементного состава образцов и фотосъемку в различных видах излучений выполняли с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA ENERGY, установленного на электронно-зондовый микроанализатор марки Superprobe 733, при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе зонда 25 нА. Анализы были выполнены в диапазоне элементов от бора до урана. Ошибка анализа составляла плюс-минус 5% (отн.). Концентрации элементов определяли в диапазоне от 100% до 0,0%.

Данные, полученные в результате рентгеноспектрального микроанализа проб руды, приведены в таблице 1.

Для определения содержания пирита (минерального состава) в образцах руды проведен рентгенодифрактометрический анализ на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с CuK α – излучением, β -фильтр. Условия съемки дифрактограмм: $U = 35$ кВ; $I = 20$ мА; съемка θ - 2θ ; детектор 2 град/мин. Рентгенофазовый анализ на полуколичественной основе был выполнен по дифрактограммам порошковых проб с применением метода равных навесок и искусственных смесей. Определялись количественные соотношения кристаллических фаз. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием данных картотеки ICDD: база порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) и дифрактограмм чистых от примесей минералов.

Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа и дифрактограммы образцов руды приведены в таблице 2.

Таблица 1

Данные рентгеноспектрального микроанализа проб руды

Кесте 1

Кен үлгілерінің рентген-спектрлік микроталдауының деректері

Table 1

Data of X-ray spectral microanalysis of ore samples

Элементарный состав пробы руды № 1, среднее значение в весовых %														
O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	Ba	-	-	Итого
42,03	1,47	0,56	4,35	18,81	11,86	1,01	1,00	0,30	7,75	0,71	10,16	-	-	100,00
Элементарный состав пробы руды № 2, среднее значение в весовых %														
O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba	-	-	Итого
38,29	1,21	0,18	3,29	24,04	12,27	0,87	0,05	0,07	6,71	12,04	0,98	-	-	100,00

Таблица 2

Данные полуколичественного рентгенофазового анализа проб руды

Кесте 2

Кен үлгілерінің жартылай мөлшерлік рентгендік фазалық талдауының деректері

Table 2

Data of semiquantitative X-ray phase analysis of ore samples

Минерал (фаза)	Формула	Концентрация, %
Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа пробы № 1		
каолинит	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	28.7
кварц	SiO_2	26.6
барит	$BaSO_4$	21.0
пирит	FeS_2	14.2
слюда	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	6.0
гипс	$Ca(SO_4)(H_2O)_2$	3.5
Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа пробы № 2		
кварц	SiO_2	42.5
сфалерит	ZnS	29.4
пирит	FeS_2	13.9
каолинит	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	10.0
барит	$BaSO_4$	2.3
слюда	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	1.8

При замере показателей pH отобранных проб рудничных вод было определено, что на месторождении данный показатель варьируется в пределах 6,9–7,7, что характерно для слабощелочной среды (близкой к нейтральной).

Пробы эмульсионного взрывчатого вещества, состав которого приведен в таблице 3, отбирали на местах ведения взрывных работ на месторождении.

Непосредственно сама оценка химической совместимости эмульсионных промышленных взрывчатых веществ с пиритсодержащими рудами месторождений Карагандинской области проведена на экспериментальной установке, обеспечивающей нагрев образца до высоких температур и фиксацию температуры в разных точках, методом

регистрации данных термической активности и выделения сопутствующих газов в результате химического взаимодействия отобранных образцов руды (в мелкодисперсном агрегатном состоянии) с образцами эмульсионного взрывчатого вещества.

Таблица 3

Состав пробы эмульсионного взрывчатого вещества

Кесте 3

Эмульсиялық жарылғыш зат үлгісінің құрамы

Table 3

Composition of the emulsion explosive sample

Наименование компонента	Массовая доля, %, не менее
Эмульсионная матрица обратного типа на основе водного раствора нитрата аммония	70
Аммиачная селитра гранулированная	28
Жидкий нефтепродукт	1,8
Водный раствор нитрита натрия	0,2

Результаты и обсуждение

Известно, что при измельчении руды число ее частиц в единице объема возрастает, следовательно, возрастает и общая поверхность контактов руды и взрывчатого вещества [3]. Этим в значительной мере определяется увеличение реакционной способности пиритсодержащей руды при взаимодействии с нитратом аммония, а повышение температуры реакционной массы служит катализатором реакции окисления.

На основании вышеизложенных принципов и был выбран метод исследования, который заключается в проведении умеренного экзотермического тестирования смеси измельченных до порошкообразного состояния образцов руды – 10% и эмульсионного взрывчатого вещества в готовом виде – 90% (рис. 1).

Нагревание смеси проводили постепенно до 200 °С в течение 10 минут. Экзотермический эффект фиксировали при повышении температуры смеси во время проведения теста по сравнению с заданной температурой проведения испытаний. Так же фиксировали резкое повышения концентрации газообразных продуктов реакции.

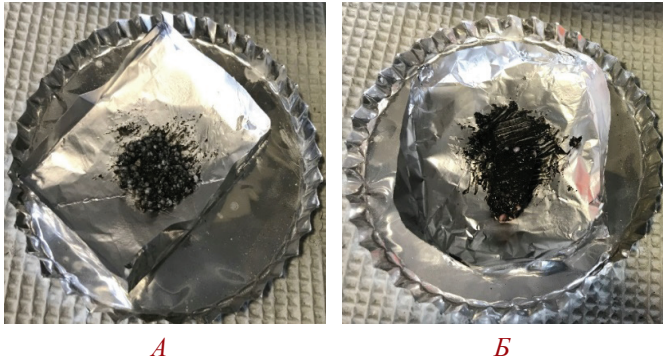


Рис. 1. Смесь руды (*A* – образец № 1; *B* – образец № 2) и эмульсионного взрывчатого вещества.
Сурет 1. Кен (*A* – үлгі № 1; *B* – үлгі № 2) мен эмульсиялық жарылғыш заттың қоспасы.
Figure 1. A mixture of ore (*A* – sample No. 1; *B* – sample No. 2) and emulsion explosive.

Для объективности выполнения сравнительного анализа, первоначально было проведено ТГА тестирование эмульсионного взрывчатого вещества в готовом виде без примесей образцов руды. Тестирование прошло в штатном режиме, скачков температуры и выбросов газов не зафиксировано, максимальная температура образца взрывчатого вещества не превышала 132,7 °С (рис. 2).

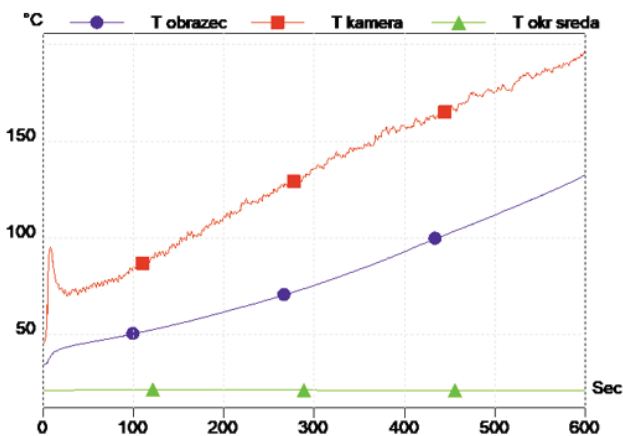


Рис. 2. Термограмма эмульсионного взрывчатого вещества.

Сурет 2. Эмульсиялық жарылғыш заттың термограммасы.

Figure 2. Thermogram of an emulsion explosive.

В процессе последовательного нагрева эмульсионного взрывчатого вещества можно было наблюдать образование плава нитрата аммония и остатков розового красителя на его поверхности в результате разрушения эмульсионной структуры и испарения жидкостных составляющих (рис. 3). Признаков возгорания не выявлено.

В результате исследования химической совместимости эмульсионного взрывчатого вещества с образцом пиритсодержащей руды № 1 можно было наблюдать аналогичные условия с предыдущим образцом эмульсионного взрывчатого вещества до температуры 154,38 °С (553 с), после

чего на термограмме (рис. 4) произошел скачок температуры исследуемого образца до 224,12 °С (584 с), визуально можно было наблюдать протекание экзотермической реакции с выделением газообразных продуктов: CO – 280 мг/м³, NO – 5 мг/м³ и NO_2 – 1040 мг/м³, концентрация которых была зафиксирована газоанализатором.



Рис. 3. Внешний вид эмульсионного взрывчатого вещества после тестирования.
Сурет 3. Зерттеуден кейінгі эмульсиялық жарылғыш заттың сыртқы пішіні.
Figure 3. Physical configuration of the emulsion explosive after experiment.

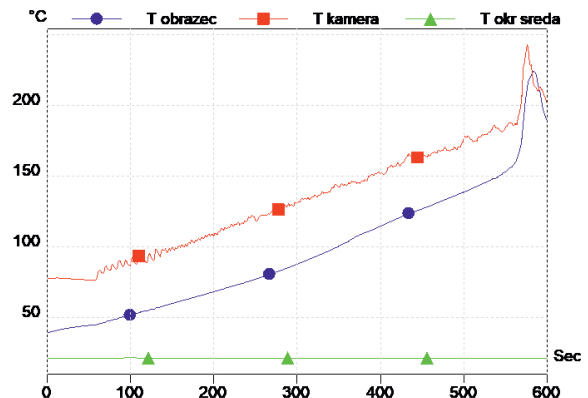


Рис. 4. Термограмма эмульсионного взрывчатого вещества с образцом пиритсодержащей руды № 1.
Сурет 4. № 1 пириттерді қамтитын кен үлгісімен бірге эмульсиялық жарылғыш заттың термограммасы.
Figure 4. Thermogram of an emulsion explosive with a sample of pyrite-bearing ore No. 1.

Полученные значения и частично обугленное состояние образца (рис. 5) свидетельствуют о неполном протекании экзотермической реакции разложения нитрата аммония и испарении жидкого нефтепродукта.

В результате исследования химической совместимости эмульсионного взрывчатого вещества с образцом пиритсодержащей руды № 2 можно было наблюдать плавное стабильное повышение температуры смеси до достиже-

Взрывное дело

ния 149,42 °C (525 с), после чего на термограмме (рис. 6) произошел скачок температуры исследуемого образца до 193,72 °C (566 с), визуально можно было наблюдать протекание экзотермической реакции с выделением газообразных продуктов в виде: CO – 595 мг/м³ и NO_2 – 60 мг/м³, концентрация которых была зафиксирована газоанализатором.



Рис. 5. Внешний вид эмульсионного взрывчатого вещества с образцом пиритсодержащей руды № 1 после тестирования.

Сурет 5. № 1 пириттерді қамтитын кен үлгісімен бірге эмульсиялық жарылғыш заттың зерттеуден кейінгі сыртқы пішіні.

Figure 5. Physical configuration of the emulsion explosive with a sample of pyrite-containing ore No. 1 after experiment.

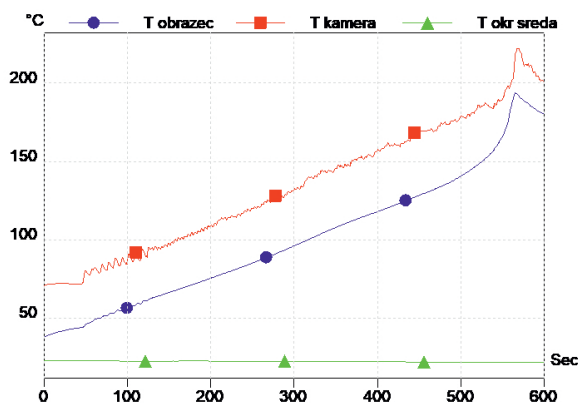


Рис. 6. Термограмма эмульсионного взрывчатого вещества с образцом пиритсодержащей руды № 2.

Сурет 6. № 2 пириттерді қамтитын кен үлгісімен бірге эмульсиялық жарылғыш заттың термограммасы.

Figure 6. Thermograph of an emulsion explosive with a sample of pyrite-containing ore No. 2.

Полученные значения, отсутствие выделения NO и полностью обугленное состояние образца (рис. 7) свидетельствуют о протекании быстрой экзотермической

реакции разложения нитрата аммония и испарения жидкого нефтепродукта, которая ввиду ограниченного объема образца протекает без перехода в горение открытым пламенем.



Рис. 7. Внешний вид эмульсионного взрывчатого вещества с образцом пиритсодержащей руды № 2 после тестирования.

Сурет 7. № 2 пириттерді қамтитын кен үлгісімен бірге эмульсиялық жарылғыш заттың зерттеуден кейінгі сыртқы пішіні.

Figure 7. Physical configuration of the emulsion explosive with a sample of pyrite-containing ore No. 2 after experiment.

При проведении термогравиметрического анализа было установлено, что при взаимодействии (имеющих большую поверхность контакта) образцов эмульсионного взрывчатого вещества в готовом виде и проб сульфидсодержащих руд, в которых содержание пирита не превышает 30%, а массовое содержание серы – меньше 15%, в нормальных условиях (20–50 °C) протекание экзотермических реакций не зафиксировано. В обоих случаях реакции протекают при нагреве смеси до температур близких к 150 °C, при этом экзотермический эффект проявляется резким повышением температуры смеси по сравнению с заданной температурой, а также резким повышением концентрации вредных газов, в основном NO_2 и CO . Данные факторы свидетельствуют о стойкости обратной эмульсии и отсутствии прямого контакта нитрата аммония с пиритсодержащими рудами до момента нарушения стабилизирующей способности эмульсии в результате термического воздействия.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволяют установить следующее:

1. Горнотехнические условия исследуемого месторождения с пиритсодержащими рудами Карагандинской области позволяют безопасно использовать при ведении взрывных работ взрывчатые составы на основе обратной эмульсий водного раствора нитрата аммония, которые имеют температуру на выходе из смесительно-зрядных устройств до 60 °C.

2. При наличии на месторождениях Карагандинской области участков сульфидсодержащих руд, в которых содержание пирита превышает 30%, а массовое содержание серы – более 20%, и нарушения стабилизирующей способности эмульсии в составе взрывчатых веществ, может быть спровоцировано самопроизвольное протекание экзотермической реакции с выделением тепла и нагрева большого количества реакционной смеси до температуры, превышающей 250 °С, достаточной для самовоспламенения взрывчатого вещества и перехода горения в детонацию с учетом замкнутого пространства (скважины).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Комащенко В.И., Воробьев Е.Д., Белин В.А. Перспективы развития промышленных взрывчатых веществ и применения современных технологий взрывных работ с учетом экологической безопасности // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2017. № 3. С. 157–165 (на русском языке)
2. Эмульсионные взрывчатые вещества: методическое руководство и обзор последних достижений / Kratarczyk V. [и др.] // Materials. 2022. Т. 15. С. 1–13 (на английском языке)
3. Козырев С.А., Власова Е.А. Исследование химического взаимодействия аммиачной селитры с сульфидсодержащими минералами в составе гематит-магнетитовых кварцитов Оленегорского месторождения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 2 (11). С. 54–60 (на русском языке)
4. Zhi-Xiang Xu, Qian Wang, Xiao-Qi Fu. Тепловая устойчивость и механизм разложения эмульсионных взрывчатых веществ в присутствии пирита // Journal of Hazardous Materials. 2015. Т. 300. С. 702–710 (на английском языке)
5. Катышев С.Ф., Десятник В.Н., Теслюк Д.М. Определение условий безопасного применения аммиачно-селитровых взрывчатых веществ на сульфидных месторождениях // Пожаровзрывобезопасность. 2009. № 2 (18). С. 24–28 (на русском языке)
6. Руководство по предупреждению самопроизвольных загораний и взрывов взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры при производстве взрывных работ в медно-колчеданных рудах, Екатеринбург: Унипромедь, 1991 (на русском языке)
7. Отчет НИР по разработке новых взрывчатых материалов для безопасного ведения взрывных работ на карьерах и рудниках цветной металлургии, Свердловск: «УНИПРОМЕДЬ», 1989 (на русском языке)
8. Кинетический анализ процесса термического разложения эмульсионной матрицы взрывчатого вещества в присутствии сульфидных руд / Yang F. [и др.] // Sustainability. 2022. Т. 14. С. 1–14 (на английском языке)
9. Яковенков А.Г. Самопроизвольные взрывы аммиачно-селитренных взрывчатых веществ при отбойке сульфидных руд // Совершенствование техники и технологии взрывных работ: М.: Недра, 1981. С. 68–77 (на русском языке)
10. Синицын В.А., Шеменев В.Г., Меньшиков П.В. Основные технические требования к промышленным взрывчатым веществам и пути их обеспечения // Проблемы недропользования. 2018. № 2 (17). С. 66–69 (на русском языке)
11. Исследование влияния стабилизирующих добавок на термическое разложение эмульсионных взрывчатых веществ в среде пирита / Петров Е.А. [и др.] // Горный журнал Казахстана. 2016. № 2. С. 18–21 (на русском языке)
12. Савин П.И., Петров Е.А., Бычин Н.В., Тамбиев П.Г. Исследование влияния стабилизирующих добавок на химическую стабильность эмульсионных взрывчатых веществ в сульфидных рудах // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Барнаул: изд-во Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 2017. С. 64–67 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Комащенко В.И., Воробьев Е.Д., Белин В.А. Өнеркәсіптік жарылғыш заттарды дамыту перспективалары және экологиялық қауіпсіздікті ескере отырып заманауи жару жұмыстары технологияларын қолдану // ТулМУ хабарлары. Жер туралы ғылымдар. 2017. № 3. Б. 157–165 (орыс тілінде)
2. Эмульсиялық жарылғыш заттар: әдістемелік нұсқаулық және соңғы жетістіктерге шолу / Kratarczyk V. [және т. б.] // Materials. 2022. Т. 15. Б. 1–13 (ағылшын тілінде)
3. Козырев С.А., Власова Е.А. Аммиак селитрасы мен сульфидтерге бай минералдардың Оленегор кенігіндегі гематит-магнетит кварциттер құрамындағы химиялық өзара әрекеттесуін зерттеу // PFA Кольск ғылыми орталығының хабаршысы. 2019. № 2 (11). Б. 54–60 (орыс тілінде)
4. Zhi-Xiang Xu, Qian Wang, Xiao-Qi Fu. Пирит қатысында эмульсиялық жарылғыш заттардың жылулық тұрақтылығы және ыдырау механизмі // Journal of Hazardous Materials. 2015. Т. 300. Б. 702–710 (ағылшын тілінде)

5. Катышев С.Ф., Десятник В.Н., Теслюк Д.М. Сульфидті кен орындарында аммиак-селитралы жарылғыш заттарды қауіпсіз қолдану шарттарын анықтау // *Өрт және жарылыс қауіпсіздігі*. 2009. № 2 (18). Б. 24–28 (орыс тілінде)
6. Мыс-пирит кендеріндегі жару жұмыстары кезінде аммоний нитраты негізіндегі жарылғыш заттардың өздігінен тұтануының және жарылуының алдын алу бойынша нұсқаулық, Екатеринбург: Унипромедь, 1991 (орыс тілінде)
7. Түсті металлургия карьерлері мен шахталарында жарылыс жұмыстарын қауіпсіз жүргізу үшін жаңа жарылғыш заттарды әзірлеу жөніндегі ғылыми-зерттеу есебі, Свердловск: «УНИПРОМЕДЬ», 1989 (орыс тілінде)
8. Эмульсиялық жарылғыш зат матрицасының сульфидті кендер қатысында термиялық ыдырау үрдісінің кинетикалық талдауы / Yang F. [және т. б.] // *Sustainability*. 2022. Т. 14. Б. 1–14 (ағылшын тілінде)
9. Яковенков А.Г. Сульфидті кендерді бұрғанда аммиак-селитралы жарылғыш заттардың өздігінен тұатын жарылыстары // *Жарылыс жұмыстарын жүргізу техникасы мен технологиясын жетілдіру*. М.: Недра, 1981. Б. 68–77 (орыс тілінде)
10. Сеницын В.А., Шеменов В.Г., Меньшиков П.В. Өнеркәсіптік жарылғыш заттарға қойылатын негізгі техникалық талаптар және оларды қамтамасыз ету жолдары // *Жер қойнауын пайдалану мәселелері*. 2018. № 2 (17). Б. 66–69 (орыс тілінде)
11. Пирит ортасында эмульсиялық жарылғыш заттардың термиялық ыдырауына тұрақтандырғыш қоспалардың әсерін зерттеу / Петров Е.А. [және т. б.] // *Қазақстанның тау-кен журналы*. 2016. № 2. Б. 18–21 (орыс тілінде)
12. Савин П.И., Петров Е.А., Бычин Н.В., Тамбиев П.Г. Сульфидті кендерде эмульсиялық жарылғыш заттардың химиялық тұрақтылығына тұрақтандырғыш қоспалардың әсерін зерттеу // *Материалдар: X Бүкілресейлік студенттер, аспиранттар және жас ғалымдардың халықаралық қатысуымен ғылыми-тәжірибелік конференциясы, Барнаул: И.И. Ползунов атындағы Алтай мемлекеттік техникалық университетінің баспасы, 2017. Б. 64–67 (орыс тілінде)*

REFERENCES

1. Komashchenko V.I., Vorobyev E.D., Belin V.A. Perspektivy razvitiya promyshlennykh vzryvchatykh veshchestv i primeneniya sovremennykh tekhnologiy vzryvnykh rabot s uchetom ekologicheskoy bezopasnosti [Prospects for the development of industrial explosives and the use of modern blasting technologies taking into account environmental safety], *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle [Izvestiya TulGU. Earth Sciences]*, 2017. No. 3. 157–165 pp. (in Russian)
2. Emulsion explosives: a methodological guide and review of recent advances / Kramarczyk B. [et al.] // *Materials*. 2022. V. 15. No. 14. 1–13 pp. (in English)
3. Kozyrev S.A., Vlasova E.A. Issledovanie khimicheskogo vzaimodeystviya ammiachnoy selitry s sulfidsoderzhashchimi mineralami v sostave gematit-magnetitovykh kvarttsitov Olenegorskogo mestorozhdeniya [Study of the chemical interaction of ammonium nitrate with sulfide-containing minerals in hematite-magnetite quartzites of the Olenegorsk deposit], *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN [Bulletin of the Kola Science Centre of RAS]*. 2019. No. 2 (11). 54–60 pp. (in Russian)
4. Zhi-Xiang Xu, Qian Wang, Xiao-Qi Fu. Thermal stability and decomposition mechanism of emulsion explosives in the presence of pyrite // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. V. 300. 702–710 pp. (in English)
5. Katyshev S.F., Desyatnik V.N., Teslyuk D.M. Opredelenie usloviy bezopasnogo primeneniya ammiachno-selitrovnykh vzryvchatykh veshchestv na sulfidnykh mestorozhdeniyakh [Determination of safe conditions for the use of ammonium-nitrate explosives at sulfide deposits], *Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and Explosion Safety]*. 2009. No. 2 (18). 24–28 pp. (in Russian)
6. Rukovodstvo po preduprezhdeniju samoproizvol'nyh zagoraniy i vzryvov vzryvchatykh veshchestv na osnove ammiachnoy selitry pri proizvodstve vzryvnykh rabot v medno-kolchedannykh rudakh [Guidelines for the Prevention of Spontaneous Ignition and Explosion of Ammonium Nitrate-Based Explosives during Blasting Operations in Copper-Pyrite Ores], *Yekaterinburg: Unipromed'*, 1991 (in Russian)
7. Otchet NIR po razrabotke novykh vzryvchatykh materialov dlja bezopasnogo vedeniya vzryvnykh rabot na kar'erakh i rudnikah cvetnoj metallurgii [Research Report on the Development of New Explosives for the Safe Conduct of Blasting Operations in Non-Ferrous Metallurgy Quarries and Mines], *Sverdlovsk: «UNIPROMED'»*, 1989 (in Russian)
8. Kinetic analysis of the thermal decomposition process of emulsion explosive matrix in the presence of sulfide ores / Yang F. [et al.] // *Sustainability*, 2022. V. 14. 1–14 pp. (in English)
9. Yakovenkov A.G. Samoproizvol'nye vzryvy ammiachno-selitrennykh vzryvchatykh veshchestv pri otkoyke sulfidnykh rud [Spontaneous explosions of ammonium-nitrate explosives during blasting of sulfide ores],

- Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii vzryvnykh rabot [Improvement of Techniques and Technologies of Blasting Operations]. Moscow: Nedra, 1981. 68–77 pp. (in Russian)*
10. *Sinitsyn V.A., Shemenov V.G., Men'shikov P.V. Osnovnye tekhnicheskie trebovaniya k promyshlennym vzryvchatym veshchestvam i puti ikh obespecheniya [Basic technical requirements for industrial explosives and ways to ensure them], Problemy nedropol'zovaniya [Problems of Subsoil Use]. 2018. No. 2 (17). 66–69 pp. (in Russian)*
 11. *Issledovanie vliyaniya stabiliziruyushchikh dobavok na termicheskoe razlozhenie emulsionnykh vzryvchatykh veshchestv v srede pirita [Study of the effect of stabilizing additives on the thermal decomposition of emulsion explosives in a pyrite environment], Petrov E.A. [et al.], Gornyy zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan], 2016. No. 2. 18–21 pp. (in Russian)*
 12. *Savin P.I., Petrov E.A., Bychin N.V., Tambiev P.G. Issledovanie vliyaniya stabiliziruyushchikh dobavok na khimicheskuyu stabil'nost' emulsionnykh vzryvchatykh veshchestv v sulfidnykh rudakh [Study of the effect of stabilizing additives on the chemical stability of emulsion explosives in sulfide ores], Materialy X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation], Barnaul: Izd-vo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.I. Polzunova, 2017. 64–67 pp. (in Russian)*

Сведения об авторах:

Алешкова С.В., магистр химической технологии взрывчатых веществ и пиротехнических средств, докторант химической технологии взрывчатых веществ и пиротехнических средств Казахского национального университета им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан); эксперт-аудитор, ТОО «Экспертно-сертификационный центр взрывчатых материалов» (г. Алматы, Казахстан), svetlana.aleshkova88@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-3950-4582>

Пустовалов И.А., доктор Ph.D по профилю «Химическая технология взрывчатых веществ и пиротехнических средств», директор, ТОО «Экспертно-сертификационный центр взрывчатых материалов» (г. Алматы, Казахстан), igpkz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8477-8060>

Нашауов Т.Б., магистрант по специальности «Химическая технология взрывчатых веществ и пиротехнических средств» Казахского национального университета им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан); лаборант ТОО «Экспертно-сертификационный центр взрывчатых материалов» (г. Алматы, Казахстан), tima6333@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-2360-6926>

Зарко В.Е., доктор физико-математических наук «Исследование нестационарного горения энергетических материалов», зав. лабораторией «Горение конденсированных систем», Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского, Сибирское отделение Российской академии наук (г. Новосибирск, Россия), zarko@kinetics.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0630-5134>

Авторлар туралы мәліметтер:

Алешкова С.В., жарылғыш заттар және пиротехникалық құралдардың химиялық технологиясы мамандығы бойынша магистр; аль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің жарылғыш заттар және пиротехникалық құралдардың химиялық технологиясы мамандығы бойынша докторанты (Алматы қ., Қазақстан); эксперт-аудитор, «Жарылғыш материалдарды сараптау және сертификаттау орталығы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Пустовалов И.А., Ph.D докторы (жарылғыш заттар және пиротехникалық құралдардың химиялық технологиясы мамандығы бойынша), директор, «Жарылғыш материалдарды сараптау және сертификаттау орталығы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Нашауов Т.Б., аль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Жарылғыш заттар және пиротехникалық құралдардың химиялық технологиясы» мамандығы бойынша магистрант (Алматы қ., Қазақстан); лаборант, «Жарылғыш материалдарды сараптау және сертификаттау орталығы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Зарко В.Е., физика-математика ғылымдарының докторы; тақырыбы: «Энергетикалық материалдардың уақытша алмасты жануын зерттеу»; Конденсацияланған жүйелердің жануы лабораториясының меңгерушісі, В.В. Воеводский атындағы Химиялық кинетика және жану институты, Ресей Ғылым академиясының Сібір бөлімі (Новосибирск қ., Ресей)

Information about the authors:

Aleshkova S.V., Master of chemical technology of explosives and pyrotechnics, Candidate for Ph.D in chemical technology of explosives and pyrotechnic, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan); expert-auditor, «Expert and Certification Center for Explosive Materials» LLP (Almaty, Kazakhstan)

Pustovalov I.A., Ph.D in the field of chemical technology of explosives and pyrotechnics, director, «Expert and Certification Center for Explosive Materials» LLP (Almaty, Kazakhstan)

Nashauov T.B., Master's Student in specialty «Chemical technology of explosives and pyrotechnic», al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan); laboratory assistant, «Expert and Certification Center for Explosive Materials» LLP (Almaty, Kazakhstan)

Zarko V.E., Doctor of Physical and Mathematical Sciences «Investigation of Nonstationary Combustion of Energetic Materials», Chief Scientist of Condensed systems combustion Laboratory, V.V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)

Код МРНТИ 52.13.07:52.13.21

С.А. Мустафин¹, Б. Хусан¹, Ш.Б. *Зейтинова¹, М. Ірһар²¹Қарағандинский технический университет им. Абылқаса Сағинова (г. Қарағанда, Қазақстан),²Eskisehir Osmangazi University (г. Эскишехир, Турция)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ТРУБЧАТЫМИ ВСТАВКАМИ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования взрывного разрушения бетонных цилиндрических образцов с трубчатыми направляющими вставками. Изготовлено 27 образцов диаметром 76 мм и высотой 152 мм из бетона. В центральной части каждого образца пробурено отверстие диаметром 16 мм глубиной 120 мм. Испытаны три серии образцов: без вставок, с полутрубчатыми вставками и с перфорированными вставками. Вставки изготовлялись из ПВХ, жести и тонкого пластика, имели наружный диаметр 14 мм и высоту 120 мм. Для создания напряженного состояния часть образцов обжималась металлическими хомутами по всей длине. Установлено, что образцы без трубчатых вставок разрушаются хаотично на 3–5 фрагментов, тогда как образцы с трубчатыми вставками распадаются на 2–3 части, причем трещина преимущественно ориентируется вдоль щели или перфорации. Отмечена перспективность применения полутрубчатых и перфорированных трубчатых вставок для управления трещинообразованием при взрывном разрушении.

Ключевые слова: взрывное разрушение, бетонные образцы, трубчатые вставки, перфорированные трубы, направленное трещинообразование, напряженное состояние.

Түтікшелі кірістірулерді пайдаланып, бетон үлгілерін бағытталған жарылыспен бұзылуын эксперименттік зерттеу

Аннотация. Мақалада бағыттаушы түтікшелі кірістірулері бар бетон цилиндрлік үлгілердің жарылыстық бұзылуын эксперименталды зерттеу нәтижелері келтірілген. Бетоннан жасалған диаметрі 76 мм, биіктігі 152 мм болатын 27 үлгі дайындалды. Әрбір үлгінің орталық бөлігінде диаметрі 16 мм, тереңдігі 120 мм ұңғыма бұрыланды. Үш серия сыналды: кірістірмесіз, жартылай түтікшелі кірістірмелермен және перфорацияланған түтікшелі кірістірмелермен. Кірістірмелер сыртқы диаметрі 14 мм, биіктігі 120 мм болатын ПВХ, қаңылтыр және жұқа пластиктен жасалды. Кернеулі күй жасау үшін үлгілердің бір бөлігі бүкіл ұзындығы бойынша металл қысқыштармен қысылды. Түтікшелі кірістірмесіз үлгілер 3–5 фрагментке ретсіз бөлінетіні, ал түтікшелі кірістірмелері бар үлгілер 2–3 бөлікке ыдырайтыны және жарықшақ саңылау немесе перфорация бойымен бағытталатыны анықталды. Жартылай түтікшелі кірістірмелер және перфорацияланған түтікшелі кірістірмелер жарылыс кезінде жарықшақ түзілуін басқарудағы маңызы атап өтілді.

Түйінді сөздер: жарылыстық бұзылу, бетон үлгілері, түтікшелі кірістірмелер, перфорацияланған түтіктер, бағытталған жарықшақ түзілу, кернеулі күй.

Experimental study of directional explosive destruction of concrete samples by tubular inserts

Abstract. The article presents the results of an experimental study on the explosive failure of concrete cylindrical specimens with tubular guiding elements. Twenty-seven specimens with a diameter of 76 mm and a height of 152 mm were made of concrete. A hole of 16 mm in diameter and 120 mm in depth was drilled in the central part of each specimen. Three series of specimens were tested: without inserts, with half-tubular inserts, and with perforated tubular inserts. The inserts were made of PVC, tinplate, and thin plastic; they had an outer diameter of 14 mm and a height of 120 mm. To create a stress state, some specimens were clamped along their entire length with metal clamps. It was found that specimens without inserts disintegrated randomly into 3–5 fragments, while specimens with tubular inserts broke into 2–3 fragments, with the crack propagating predominantly along the slit or perforation. The use of half-tubular and perforated inserts is promising for controlling crack formation during explosive failure.

Key words: explosive failure, concrete specimens, tubular inserts, perforated tubes, directional fracturing, stress state.

Введение

Буровзрывные работы являются одним из основных технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых открытым и подземным способами [1, 2]. Эффективность взрывного разрушения горных пород во многом определяет производительность горных работ, качество дробления и уровень сейсмического воздействия на окружающий массив. Одним из перспективных направлений повышения эффективности взрывных работ является применение направленных конструкций зарядов, позволяющих управлять трещинообразованием и минимизировать негативные последствия взрыва на приобортовой массив [3, 4]. К таким конструкциям относятся различные трубчатые вставки, которые перераспределяют энергию заряда и задают траекторию распространения трещин [5].

Физическое моделирование на образцах из искусственных материалов позволяет в контролируемых условиях изучать механизмы взрывного разрушения, варьировать параметры и оценивать эффективность различных конструктивных решений [6]. В данной работе методом физического моделирования исследуется влияние трубчатых вставок (полутрубчатых и перфорированных) на характер разрушения бетонных цилиндрических образцов при

взрывном воздействии. Проводится сравнительный анализ разрушения образцов без вставок и с вставками разных типов, оценивается направленность трещинообразования и степень фрагментации.

Методика эксперимента

Экспериментальные исследования выполнены на цилиндрических образцах из бетона [7]. Геометрические размеры образцов: диаметр 76 мм, высота 152 мм. Для изготовления образцов использовалась разборная форма из пластиковых труб диаметром 80 мм с продольным разрезом, что позволяло извлекать затвердевший образец без повреждений. После заливки бетонной смеси труба стягивалась сверху и снизу металлическими хомутами, что обеспечивало сохранение цилиндрической формы образца и предотвращало раскрытие формы в процессе твердения бетона (рис. 1).

В качестве материала модельного массива использовался бетон, свойства которого обеспечивают формирование хрупкого разрушения, сопоставимого по характеру с разрушением горных пород [7]. Бетонная смесь готовилась из портландцемента марки 500 и балласта (смесь песка и гравия) в массовом соотношении 1:3. После заливки образцы выдерживались в одинаковых условиях при постоянной

температуре и влажности в течение 28 суток для достижения требуемой прочности. Для контроля прочностных характеристик изготавливались четыре дополнительных образца, которые испытывались на сжатие и растяжение.



Рис. 1. а – разборная пластиковая форма, б – цилиндрические бетонные образцы.

Сурет 1. а – бөлшектелетін пластикалық қалып, б – цилиндр пішінді бетон үлгілері.

Figure 1. а – demountable plastic formwork, б – cylindrical concrete samples.

В центральной части каждого образца после полного затвердевания выполнялось сверление отверстия, имитирующее скважину (ОИС) диаметром 16 мм и глубиной 120 мм, которое имитировало зарядную полость и служило для размещения взрывчатого вещества и трубчатых вставок. Трубчатые вставки выполняли роль искусственных включений, моделирующих зоны пониженного сопротивления [8], и предназначались для исследования их влияния на направление и интенсивность развития трещин при взрывном воздействии (рис. 2).

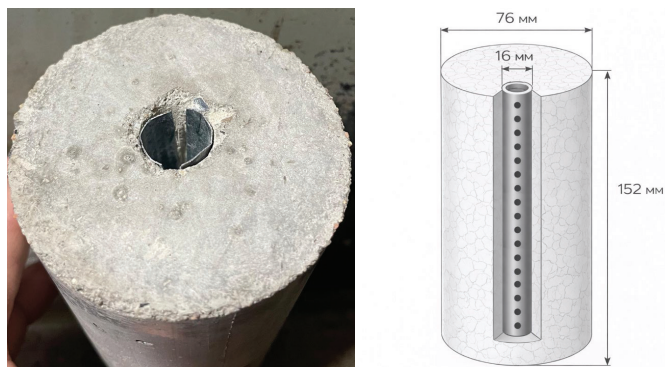


Рис. 2. Цилиндрический бетонный образец с центральным отверстием и трубчатой вставкой.

Сурет 2. Орталық тесігі және түтікшелі кірістірмесі бар цилиндр пішінді бетон үлгісі.

Figure 2. Cylindrical concrete specimen with a central hole and a tubular insert.

В экспериментах использовались три типа образцов:

- без вставок – заряд размещался непосредственно в ОИС;
- с полутрубчатыми вставками – в ОИС помещалась

трубка высотой 120 мм, наружным диаметром 14 мм, имеющая продольный разрез (щель) на всю длину (рис. 3, а). Ориентация разреза задавала направление выхода энергии взрыва;

- с перфорированными трубчатыми вставками – трубка аналогичных размеров с отверстиями (перфорацией), расположенными по одной образующей линии, что также создавало направленное ослабление стенки (рис. 3, б).



Рис. 3. а – полутрубчатая вставка,

б – перфорированная трубчатая вставка.

Сурет 3. а – жартылай түтікшелі кірістірме, б – перфорацияланған түтікшелі кірістірме.

Figure 3. а – half-tubular insert, б – perforated tubular insert.

Трубчатые вставки изготавливались из различных материалов: ПВХ, жести, тонкого пластика. Толщина стенки варьировалась в зависимости от материала, но наружный диаметр во всех случаях составлял 14–15 мм, что обеспечивало свободную установку в ОИС диаметром 16 мм (с зазором для позиционирования). Трубчатые вставки устанавливались в ОИС после сверления. Основные параметры экспериментальной установки и образцов приведены в таблице 1.

Взрывное воздействие осуществлялось с использованием заряда цилиндрической формы высотой 70 мм и диаметром 12,5 мм. Заряд свободно размещался внутри ОИС или внутри трубчатой вставки (для образцов с трубчатыми вставками). Иницирование заряда производилось с соблюдением требований безопасности.

Для имитаций напряженного состояния, приближенно к условиям горного массива, часть образцов с трубчатыми вставками перед взрывом дополнительно обжималась по всей длине металлическими хомутами [9]. Хомуты устанавливались на образец после размещения трубчатой вставки и заряда в отверстии, создавая равномерное радиальное сжатие. Это позволяло имитировать влияние горного давления на процесс трещинообразования и оценить эффективность трубчатых вставок в условиях, приближенных к натурным.

Всего было подготовлено и испытано 27 образцов, из которых:

- 7 образцов – без трубчатых вставок;

Основные параметры экспериментальной установки и образцов

Таблица 1

Эксперименттік қондырғы мен үлгілердің негізгі параметрлері

Кесте 1

Main parameters of the experimental setup and specimens

Table 1

Параметр	Обозначение	Значение	Примечание
Материал цилиндрического образца блока	–	Бетон	Искусственный модельный массив
Типы модельных образцов	–	Без включений; с трубчатыми вставками	Сравнительный эксперимент
Материал трубчатых вставок	–	ПВХ, жесть, тонкий пластик	Моделирование зон пониженного сопротивления
Внешний диаметр трубчатых вставок	D_t	14–15 мм	ПВХ, жесть, тонкий пластик
Толщина стенки трубчатых вставок	δ	0,1–0,5 мм	ПВХ, жесть, тонкий пластик
Длина трубчатых вставок	L_t	120 мм	По глубине отверстия
Тип контрольных образцов	–	Испытательные образцы цилиндрической формы	Для определения прочности
Диаметр образцов	D_k	76 мм	Определяется формой
Высота образцов	H_k	154 мм	Определяется формой
Количество образцов	n_k	27 шт	
Конструкция формы	–	Продольный надрез + хомуты	Облегчение распалубки
Условия твердения	–	Одинаковые для всех образцов	Обеспечение сопоставимости
Метод фиксации результатов	–	Фото- и видеосъемка	До и после взрыва

• 8 образцов – с полутрубчатыми вставками (из них 3 с обжатием хомутами);

• 8 образцов – с перфорированными трубчатыми вставками (из них 3 с обжатием хомутами);

• 4 образца – для определения прочности бетона на сжатие.

После взрыва проводилась фото- и видеосъемка разрушенных образцов. Для удобства визуального анализа фрагменты собирались и скреплялись скотчем, сохраняя их относительное расположение. Оценивались

характер трещинообразования, количество образовавшихся фрагментов и соответствие направления трещин заданной ориентации (для образцов с трубчатыми вставками).

Результаты эксперимента

В ходе экспериментальных исследований получены данные, характеризующие разрушение бетонных цилиндрических образцов в зависимости от наличия трубчатых вставок и условий нагружения (таблица 2).

Характеристики трещинообразования и смещения трубчатых вставок в зависимости от условий испытаний

Таблица 2

Сынау жағдайларына байланысты жарықшақтың түзілу және түтікшелі кірістірмелердің ығысу сипаттамалары

Кесте 2

Characteristics of crack formation and tubular insert displacement depending on test conditions

Table 2

Группа образцов	Количество фрагментов (среднее)	Характер трещинообразования	Смещение трубчатой вставки от проектного направления
Без трубчатых вставок	3–5	Хаотичное	—
С трубчатыми вставками (без обжатия)	2–3	Преимущественно однонаправленное	До 5° по углу
С трубчатыми вставками (с обжатием)	2 (по одному с каждой стороны)	Симметричное, в обе стороны	2–4 мм (линейное смещение)

В образцах с полутрубчатыми и перфорированными трубчатыми вставками, не подвергавшихся обжатию, трещина развивалась преимущественно в одну сторону – в направлении щели или перфорации. Количество фрагментов составляло 2–3. В ряде случаев фиксировалось незначительное отклонение траектории трещины (до 5°) (рис. 4, а).

В образцах, обжатых металлическими хомутами, наблюдалось наиболее выраженное направленное разрушение: трещина распространялась одновременно в обе стороны от трубчатой вставки, формируя практически симметричную плоскость разрушения (рис. 4, б). Количество образующихся фрагментов составляло 2. При этом трубчатая вставка смещалась относительно проектного направления на 2–4 мм. Несмотря на это, общая ориентация трещин соответствовала заданному направлению, что подтверждает эффективность трубчатых вставок в условиях напряженного состояния.



Рис. 3. а – вид торцевой поверхности бетонного образца после взрыва, б – вид торцевой поверхности обжатого металлическими хомутами бетонного образца после взрыва.

Сурет 3. а – бетон үлгісінің жарылыстан кейінгі көрінісі, б – металл қысқыштармен сығылған бетон үлгісінің жарылыстан кейінгі көрінісі.

Figure 3. a – view of the concrete specimen after explosion, b – view of the concrete specimen compressed by metal clamps after explosion.

Таким образом, использование трубчатых вставок позволяет упорядочить процесс трещинообразования, а дополнительное обжатие, имитирующее горное давление, способствует формированию симметричного разрушения и повышает точность направления трещин.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что применение трубчатых вставок (полутрубчатых и перфорированных) позволяет управлять процессом трещинообразования при взрывном воздействии на бетонные образцы. В образцах без трубчатых вставок разрушение носит хаотичный характер, что соответствует классическим представлениям о радиальном распространении трещин от зоны заряда [2].

Использование трубчатых вставок, имеющих направленное ослабление стенки (щель или перфорация), при-

водит к концентрации напряжений в заданном направлении. В отсутствие внешнего обжатия трещина развивается преимущественно в одну сторону, что объясняется асимметричным полем напряжений, создаваемым трубчатой вставкой. При этом энергия взрыва перераспределяется таким образом, что основная трещина формируется вдоль ослабленной образующей.

Создание напряженного состояния с помощью металлических хомутов позволяет имитировать влияние горного давления. В этих условиях трещина распространяется симметрично в обе стороны от трубчатой вставки. Это можно объяснить тем, что равномерное радиальное сжатие повышает эффективность направляющего действия трубчатой вставки: энергия взрыва не рассеивается в неконтролируемых направлениях, а концентрируется в двух противоположных направлениях, заданных конструкцией трубчатой вставки.

Небольшое смещение трубчатой вставки (2–4 мм) относительно проектного направления в обжатых образцах может быть связано с несколькими факторами: неидеальным центрированием трубчатой вставки в ОИС, локальными неоднородностями бетона, а также возможной неравномерностью затяжки хомутов. Тем не менее, отклонение не превышает 5% от диаметра образца и не нарушает общей направленности разрушения.

Сравнение результатов, полученных для полутрубчатых и перфорированных трубчатых вставок, не выявило принципиальных различий в характере трещинообразования. Оба типа трубчатых вставок показали свою эффективность в создании направленного разрушения [4]. Выбор конкретного типа может определяться технологическими соображениями (удобство изготовления, жесткость конструкции).

Следует отметить, что выявленные закономерности носят качественный характер и обусловлены масштабом физической модели, а также отличием механических свойств бетона от свойств природных горных пород. Тем не менее, результаты эксперимента позволяют сделать обоснованные выводы о тенденциях влияния трубчатых вставок на управление процессом взрывного разрушения.

Вместе с тем, полученные экспериментальные данные могут быть использованы для калибровки и верификации численных моделей взрывного разрушения, в частности при применении программного комплекса ANSYS LS-DYNA [10].

Выводы

Разработана методика физического моделирования взрывного разрушения бетонных цилиндрических образцов с использованием трубчатых вставок (полутрубчатых и перфорированных). Установлены параметры образцов (диаметр 76 мм, высота 152 мм), ОИС (диаметр 16 мм, глубина 120 мм) и заряда (диаметр 12,5 мм, высота 70 мм), обеспечивающие воспроизводимость результатов.

Экспериментально подтверждено, что образцы без трубчатых вставок разрушаются хаотично с образованием 3–5 фрагментов, тогда как использование полутрубчатых и перфорированных трубчатых вставок позволяет снизить количество фрагментов до 2–3 и обеспечить преимуще-

ственное направление трещины вдоль щели или перфорации.

Показано, что создание напряженного состояния (обжатие металлическими хомутами) способствует формированию симметричной трещины, распространяющейся в обе стороны от трубчатой вставки. При этом трубчатая вставка может смещаться относительно проектного направления на 2–4 мм, что не нарушает общей направленности разрушения.

Результаты работы могут быть использованы при разработке и оптимизации конструкций скважинных зарядов с направляющими элементами для управления трещинообразованием в горных породах, а также для калибровки численных моделей взрывного разрушения.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем численном моделировании взрывного разрушения массива, а также при разработке и оптимизации параметров буровзрывных работ [10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жариков С.Н., Шеменев В., Кутуев В. Об особенностях производства буровзрывных работ в условиях Севера // Проблемы недропользования. 2017. № 3. С. 1–7 (на русском языке)
2. Джон Рид, Питер Стейси. Руководство по проектированию бортов карьера: Екатеринбург: Правовед. 2015. С. 544 (на русском языке)
3. Исследование взрывных повреждений: комплексное изучение профилей развития трещин при разобленных зарядах / Carlota R.M. [и др.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2026. № 2. С. 55–80 (на английском языке)
4. Направленное распространение трещин и оптимизация стратегии при многозабойном (многоскважинном) кумулятивном взрывании в строительстве тоннелей / Shixiang X. [и др.] // Structures. 2025. № 72. С. 116–130 (на английском языке)
5. Renshu Y., Jinjing Z. Экспериментальное исследование направленного трещинообразования при взрыве патрона с прорезью // Shock and Vibration. 2019. № 1. С. 1070–1081 (на английском языке)
6. Влияние ширины щели в патроне на распространение трещины и концентрацию энергии при взрывной нагрузке / Xianglong L. [и др.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2024. № 58. С. 1707–1721 (на английском языке)
7. Neville A.M. Свойства бетона // Longman Scientific and Technical. 2011. С. 864 (на английском языке)
8. Камалян Р.З., Камалян С.Р., Нестерова Н.С. К вопросу о физическом моделировании взрывного разрушения горных пород // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2024. № 3. С. 18–22 (на русском языке)
9. Повышение энергоэффективности взрывного импульса при буровзрывных работах для улучшения качества дробления и условий конвейерной доставки вскрышных пород в карьерах и разрезах / Igbaev T.M. [и др.] // Mechanical Engineering in Transport. 2025. № 27. С. 96–108 (на английском языке)
10. Hallquist J.O. Теоретическое руководство LS-DYNA: Livermore Software Technology Corporation, 2006. С. 680 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Жариков С.Н., Шеменев В., Кутуев В. Солтүстік жағдайында бұрғылау-жару жұмыстарын жүргізудің ерекшеліктері туралы // Жер қойнауын пайдалану мәселелері. 2017. № 3. Б. 1–7 (орыс тілінде)
2. Джон Рид, Питер Стейси. Карьер жағдайларын жобалау бойынша нұсқаулық: Екатеринбург: Заңгер, 2015. Б. 544 (орыс тілінде)
3. Жарылыс әсерінен болатын зақымдануды зерттеу: ажыратылған зарядтар кезіндегі жарықшақтардың даму профилдерін кешенді зерттеу / Carlota R.M. [және т. б.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2026. № 2. Б. 55–80 (ағылшын тілінде)
4. Тоннель құрылысында көп ұңғымалы пішінді зарядтармен жарудағы бағытталған жарықшақтардың таралуы және олардың стратегияларын оңтайландыру / Shixiang X. [және т. б.] // Structures. 2025. № 72. Б. 116–130 (ағылшын тілінде)
5. Renshu Y., Jinjing Z. Ашық саңылауы бар патронды қолданып бағытталған жарықшақшандыру арқылы жаруды эксперименттік зерттеу // Shock and Vibration. 2019. № 1. Б. 1070–1081 (ағылшын тілінде)
6. Жарылыс жүктемесі кезінде патрондағы саңылау енінің жарықшақтардың таралуына және энергия концентрациясына әсері / Xianglong L. [және т. б.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2024. № 58. Б. 1707–1721 (ағылшын тілінде)
7. Neville A.M. Бетонның қасиеттері // Longman Scientific and Technical. 2011. Б. 864 (ағылшын тілінде)
8. Камалян Р.З., Камалян С.Р., Нестерова Н.С. Тау жыныстарын жарылыспен бұзуды физикалық модельдеу мәселесі туралы // Өнеркәсіптік және экологиялық қауіпсіздік жөніндегі ВостНИИ ғылыми орталығының хабаршысы. 2024. № 3. Б. 18–22 (орыс тілінде)
9. Карьерлер мен тіліктерде бұрғылау-жару жұмыстары кезінде жарылыс импульсінің энергия тиімділігін арттыру, үгіту сапасын және бос тау жыныстарын конвейермен жеткізу

жағдайларын жақсарту / Igbaev T.M. [және т. б.] // *Mechanical Engineering in Transport*. 2025. № 27. Б. 96–108 (ағылшын тілінде)

10. Hallquist J.O. *LS-DYNA теориялық нұсқаулығы: Livermore Software Technology Corporation*, 2006. Б. 680 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Zharikov S.N., Shemenev V., Kutuyev V. *Ob osobennostyah proizvodstva burovzryvnykh работ v usloviyah Severa [On the Features of Drilling and Blasting Operations in the North]*, *Problemy nedropol'zovaniya [Problems of Subsoil Use]*. 2017. No. 3. 1–7 pp. (in Russian)
2. John Read, Peter Stacey. *Rukovodstvo po proektirovaniyu bortov kar'era [Guidelines for open pit slope design]*. Yekaterinburg: Pravoved, 2015. 544 p. (in Russian)
3. *Investigating Blast-Induced Damage: A Comprehensive Study of Crack Development Profiles Under Decoupled Charges* / Carlota R.M. [et al.] // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2026. No. 2. 55–80 pp. (in English)
4. *Directional crack propagation and optimization strategies for multi-hole shaped charge blasting in tunnel construction* / Shixiang X. [et al.] // *Structures*. 2025. No. 72. 116–130 pp. (in English)
5. Renshu Y., Jinjing Z. *Experimental Study on Directional Fracture Blasting of Cutting Seam Cartridge* // *Shock and Vibration*. 2019. No. 1. 1070–1081 pp. (in English)
6. *Influence of Slot Width in Cartridge on Crack Propagation and Energy Concentration Under Explosion Load* / Xianglong L. [et al.] // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024. No. 58. 1707–1721 pp. (in English)
7. Neville A.M. *Properties of concrete* // Longman Scientific and Technical. 2011. 864 p. (in English)
8. Kamalyan R.Z., Kamalyan S.R., Nesterova N.S. *K voprosu o fizicheskom modelirovanii vzryvnogo razrusheniya gornyh porod [On the issue of physical modeling of explosive destruction of rocks]*, *Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i jekologicheskoy bezopasnosti [Bulletin of the Scientific Center of VostNII for Industrial and Environmental Safety]*. 2024. No. 3. 18–22 pp. (in Russian)
9. *Improving the energy efficiency of the explosive pulse during drilling and blasting operations to increase the quality of crushing and conditions for conveyor delivery of overburden rocks in quarries and sections* / Igbaev T.M. [et al.] // *Mechanical Engineering in Transport*. 2025. No. 27. 96–108 pp. (in English)
10. Hallquist J.O. *LS-DYNA theory manual: Livermore Software Technology Corporation*, 2006. 680 p. (in English)

Сведения об авторах:

Мустафин С.А., докторант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Некоммерческого акционерного общества «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), saken.mustafin.89@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3811-990X>

Хусан Б., Ph.D, и. о. доцента кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Некоммерческого акционерного общества «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), hbolat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0996-348X>

Зейтинова Ш.Б., Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), zeitinova_rmpi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3489-8969>

Ірһар М., Ph.D, профессор кафедры «Горное дело» Эскишехирского университета Османгазы (г. Эскишехир, Турция), miphar@ogu.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0003-1202-6497>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мустафин С.А., «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, «Пайдалы қазбалар кенорындарын өндіру» кафедрасының докторанты (Қарағанды қ., Қазақстан)

Хусан Б., Ph.D, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, «Пайдалы қазбалар кенорындарын өндіру» кафедрасының доцент м. а. (Қарағанды қ., Қазақстан)

Зейтинова Ш.Б., Ph.D, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, «Пайдалы қазбалар кенорындарын өндіру» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

Ірһар М., Ph.D, «Эскишехир Османгазы университеті», «Тау-кен ісі» кафедрасының профессоры (Эскишехир қ., Түркия)

Information about the authors:

Mustafin S., doctoral student of the Department «Development of mineral deposits» NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Khussan B., Ph.D, acting associate professor at the Department of «Development of mineral deposits» NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Zeitinova Sh., Ph.D, associate professor of the Department «Development of mineral deposits» NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Iрһar M., Ph.D, professor of the Department «Mining Engineering», «Eskisehir Osmangazi University» (Eskisehir, Turkey)

Код МРНТИ 36.23.31

*M.B. Igemberlina¹, G.E. Zhunussova¹, Zh. Aldanysh¹ A.S. Tuyakbay²

¹Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov (Karaganda, Kazakhstan),

²Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov (Astana, Kazakhstan)

THE USE OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES TO VISUALIZE THE RESULTS OF GEODETIC MONITORING OF THE EARTH'S SURFACE DISPLACEMENT

Abstract. The article provides a comparative analysis of seven spatial interpolation methods used in the construction of digital surface models (DEM) in the tasks of geodetic monitoring of man-made deformations. The study is based on observations of the subsidence of the Earth's surface in the mined area of the Zhezkazgan deposit. The data was processed in the Golden Software Surfer software environment, which implements a wide range of interpolation algorithms. The effectiveness of the methods was assessed according to the criteria of accuracy, stability and visual smoothness. The results showed that the Kriging method provides the best quality of modeling by taking into account spatial correlation. A method of complex analysis is proposed, which makes it possible to reasonably choose the optimal interpolation algorithm for engineering and geodetic applications and monitoring systems.

Key words: geodetic monitoring, spatial interpolation, visualization, digital surface model, the Kriging method, geostatistics, Golden Software Surfer.

Жер бетінің жылжуын геодезиялық мониторинг нәтижелерін визуализациялау үшін геоақпараттық технологияларды пайдалану

Аңдатпа. Мақалада техногендік деформациялардың геодезиялық мониторингі міндеттерінде беттің цифрлық модельдерін (dem) құру кезінде қолданылатын кеңістіктік интерполяцияның жеті әдісіне салыстырмалы талдау жасалды. Зерттеу Жезқазған кен орнының өңделетін учаскесінде жер бетінің шөгін бақылау деректеріне негізделген. Деректерді өңдеу интерполяция алгоритмдерінің кең ауқымын жүзеге асыратын Golden Software Surfer бағдарламалық ортасында жүзеге асырылды. Әдістердің тиімділігін бағалау дәлдік, тұрақтылық және визуалды Тегістік критерийлері бойынша жүргізіледі. Нәтижелер Кригинг әдісі кеңістіктік корреляцияны ескере отырып, ең жақсы модельдеу сапасын қамтамасыз ететінін көрсетті. Инженерлік-геодезиялық қосымшалар мен мониторингтік жүйелер үшін онтайлы интерполяция алгоритмін негізді таңдауға мүмкіндік беретін кешенді талдау әдісі ұсынылған.

Түйінді сөздер: геодезиялық бақылау, кеңістіктік интерполяция, визуализациялау сандық беттік модель, Крингінг тәсілі, геостатистика, Golden Software Surfer.

Использование геоинформационных технологий для визуализации результатов геодезического мониторинга за движением земной поверхности

Аннотация. В статье выполнен сравнительный анализ семи методов пространственной интерполяции, применяемых при построении цифровых моделей поверхности (ЦМР) в задачах геодезического мониторинга техногенных деформаций. Исследование основано на данных наблюдений за оседанием земной поверхности на подрабатываемом участке Жезказганского месторождения. Обработка данных осуществлялась в программной среде Golden Software Surfer, реализующей широкий спектр алгоритмов интерполяции. Оценка эффективности методов проведена по критериям точности, устойчивости и визуальной гладкости. Результаты показали, что метод Кригинга обеспечивает наилучшее качество моделирования за счет учета пространственной корреляции. Предложена методика комплексного анализа, позволяющая обоснованно выбирать оптимальный алгоритм интерполяции для инженерно-геодезических приложений и мониторинговых систем.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, пространственная интерполяция, визуализация, цифровая модель поверхности, метод Крингінг, геостатистика, Golden Software Surfer.

Introduction

Currently, the geographic information system Surfer Golden Software is used to build graphical images of the functions of two variables. Basically, using this program, surface maps on isolines or contour maps are created. The main advantage of the Surfer program is, first of all, the interpolation algorithms built into it, which make it possible to create high-quality digital surface models based on data unevenly distributed in space. The Kriging method is most often used to represent data related to the image of the Earth's surface.

A digital surface model is traditionally represented as values at the nodes of a rectangular regular grid, the discreteness of which is determined depending on the specific task being solved. To store such values, Surfer uses its own GRD files, which have long become the standard for mathematical modeling packages.

When building a surface, Surfer proceeds from the following principles:

- obtaining an image by superimposing several transparent and opaque graphic layers;
- using special drawing tools, as well as applying text information and formulas to create new and edit old images [1].

Modern tasks of geodetic monitoring of man-made deformations of the earth's surface require not only high mea-

surement accuracy, but also the use of effective methods of mathematical modeling and visualization of spatial data. In the conditions of mining territories of mining enterprises, such as the Zhezkazgan deposit, an important direction is the creation of digital relief models (DEM) that allow detailed analysis of subsidence and deformation of the earth's surface, which in turn will allow forecasting possible collapses.

The choice of spatial interpolation method has a decisive influence on the reliability of geodetic conclusions. An incorrect choice of algorithm can lead to local distortions of the model, underestimation of the amplitude of deformations and erroneous engineering interpretation. Despite the widespread use of software packages that automate the construction of DEM, the question of the optimal choice of the interpolation method remains controversial.

The purpose of the study is based on a comparative analysis of the effectiveness of various spatial interpolation methods implemented in the Surfer software environment in relation to geodetic subsidence monitoring data, and to determine the most reliable algorithm for constructing digital models for engineering and geodetic tasks.

The scientific novelty of using Golden Software Surfer in research lies in the transition from simple visualization of sur-

faces to the creation of complex digital counterparts of geological and ecological environments using dynamic analysis tools. The scientific novelty of using Golden Software Surfer in research lies in the transition from simple visualization of surfaces to the creation of complex digital counterparts of geological and ecological environments using dynamic analysis tools.

The main aspects of novelty include:

- *integration of 3D drilling data with surface models: the latest versions allow not only to visualize boreholes, but also to create contact surfaces directly in 3D based on lithological data or complex queries. This provides a qualitatively new level of interpretation of stratigraphy and mineralization in a single space;*

- *multi-touch lighting and detailing: Using up to four independent light sources in 3D models allows you to identify microrelief features and structural anomalies that were previously hidden in shadows during standard rendering;*

- *direct work with georeferenced data: the novelty lies in the possibility of seamlessly superimposing analytical grids on high-resolution satellite images (for example, Google Maps) directly in the Golden Software Surfer environment, which eliminates binding errors when combining data;*

- *two-way data exchange with BIM and CAD: support for exporting 3D geometry to DXF format while preserving Z parameters allows you to use the results of Surfer geostatistical analysis as a design basis for engineering modeling in AutoCAD [1].*

Materials and research methods

The research methods in Golden Software Surfer are based on geostatistics and mathematical modeling of spatial data.

Main groups of methods:

1. Methods of spatial interpolation (Gridding):

- *Kriging: the «gold standard» of geostatistics. It allows not only to build a map, but also to estimate a statistical error (variogram), which is critically important for scientific reliability;*

- *Radial Basis Function: one of the most accurate methods for modeling smooth surfaces and complex hydrogeological fields;*

- *Inverse Distance to a Power a classic deterministic method for fast visualization of local anomalies.*

2. Geometric and volumetric analysis:

- *Grid Calculus method: calculation of derivatives (slopes, aspects) and second derivatives (curvature), which is necessary for the analysis of runoff and slope stability;*

- *Grid Volume: numerical integration methods (trapezoid rules, Simpson's rules) for precision calculation of volumes between two surfaces (for example, production volumes or mineral reserves).*

3. Geostatistical analysis (Variogram Graphics):

- *The study of spatial autocorrelation of data, the method allows us to scientifically substantiate at what distance data points cease to influence each other.*

4. Digital Terrain Modeling (DEM) method:

- *Creating multi-layered models where vector layers (flow directions) are superimposed on raster grids, allowing for cross-factor analysis.*

The main stages of creating a geostatistical model include:

- *data analysis and preprocessing (identification of trends and areas of spatial heterogeneity, analysis of distribution, anisotropy);*

- *calculation of empirical variogram or covariance values;*

- *construction of a variogram or covariance model;*

- *obtaining the prognostic value and the error (uncertainty) of the estimate at any point of the studied territory [2].*

When creating a contour map, in addition to the usual controls for displaying isolines, axes, frames, markers, legends, and other features, it was possible to create maps by filling individual zones with color or different types of lines. A contour map is usually referred to as an «isolated map». Visualization of geodetic observations of the Earth's surface movement in the form of contour maps, vector maps, DEM, superimposing combinations of various maps, wireframe maps of the studied area of the Earth's surface based on instrumental observations.

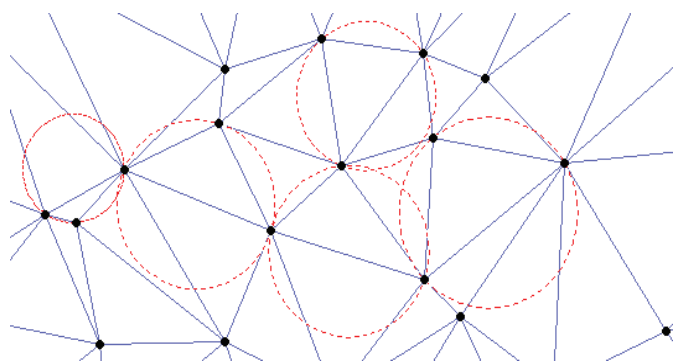
The studies for the construction of the DEM were carried out using six spatial interpolation methods: Inverse Distance to a Power method, Modified Shepard's Method, Triangulation with Linear Interpolation, Natural Neighbor method, Minimum Curvature method, Radial Basic Function Method, Kriging Methods [3].

Each of the interpolation methods has its own set of parameters. To describe the behavior of spatially distributed phenomena, the concept of a spatial variable is used – it is a numerical variable $Z = Z(X, Y)$, which takes on a value at any point in the studied area; X, Y are the coordinates of a point in space (on a plane). For example, the content of heavy metals in the upper soil layer, the height of the relief, and the thickness of the geological layer can be considered as spatial variables in two-dimensional space [4].

The Inverse Distance to a Power method. As an estimate of the variable Z at some point in the study area, this method uses the weighted average of the values of the variable Z at the sample points. The inverse distance method works on the assumption that experimental values measured close to the interpolated position have a greater impact on the evaluation result than those that are far from it. Therefore, it is necessary to give more weight to the sampling points closest to the point where the estimate is made; the weight of the sampling points should decrease as the distance from the interpolated position increases.

Modified Shepard's Method, which works under the same assumptions as the inverse distance method, but reduces «the bull's-eye effect». The weighted average of the approximation functions at a given point is used as an estimate of the variable Z at any point (X_0, Y_0) of the studied area.

Triangulation with Linear Interpolation. This method uses the Delaunay triangulation algorithm to construct a division of the studied area into a set of triangles. This is a method of constructing a digital surface model (DMP) by connecting the source points into a network of triangles (TIN), inside each of which the value is interpolated along an inclined plane defined by the vertices. This precise interpolator ensures that the values at the nodes match, and is suitable for data with sharp discontinuities, but it can create a «faceted» surface (Figure 1) [5].



Сурет 1. Delone триангуляциясы.
Рис. 1. Триангуляция Делоне.
Figure 1. Delaunay triangulation.

The vertices of the triangles are adjacent sampling points; the points are connected so that the sides of the triangles do not intersect. None of the triangulation points fall within the circle described around any constructed triangle. Using this method with a small number of sampling points leads to the appearance of obvious triangular faces on the raster surface of the model or large rectilinear segments on the contour map [6].

The estimate of the variable Z at the point (X_0, Y_0) will be the corresponding value on this plane:

$$\hat{Z}_0 = \frac{-a \cdot X_0 - b \cdot Y_0 - d}{c},$$

where a, b and c – coefficients.

Linear interpolation triangulation works best if the data is evenly distributed over the study area.

Building a digital model of the Earth's surface (DEM/DTM) based on Delaunay triangulation allows you to create a TIN model (Triangulated Irregular Network), an irregular network of triangles that describes complex terrain as accurately as possible with minimal data.

The Minimum Curvature method. Under this name, Surfer uses a 2D spline with tension (minimizing curvature). The surface constructed by this method is like a thin elastic plate, tending to pass through all experimental points with a minimum number of bends. The method is not an accurate interpolator, it generates the smoothest possible surface that comes closest to the experimental points. The resulting Z estimate is obtained by summing the polynomial approximating surface and the interpolated residuals [4–8].

Unlike all the methods described above, which belong to the deterministic class, the Kriging method is a geostatistical method. Geostatistical methods are based on a probabilistic model that considers the spatial variable $Z(X, Y)$ under study as a realization of a random function $Z(X, Y)$ [6].

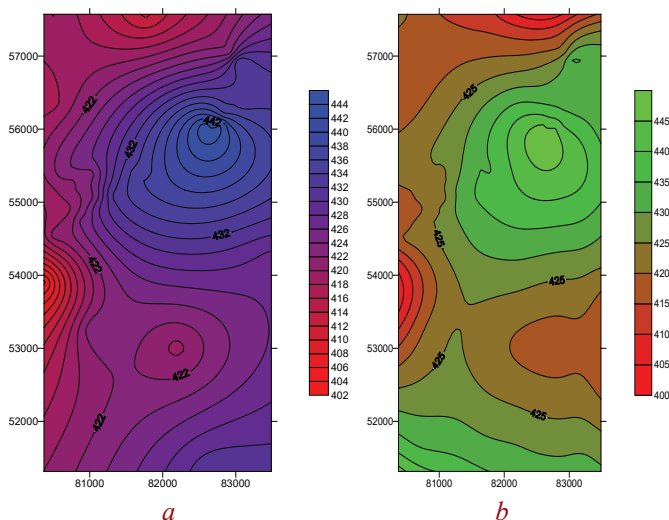
This approach allows you to take into account the spatial correlation of data and makes it possible not only to create surface models, but also to evaluate the accuracy of these models. The geostatistical interpolation method is based on statistical analysis. Statistical techniques allow you to create surfaces of preliminary values and interpret the degree of reliability of these preliminary calculations.

Results

The data obtained by the high-precision leveling method for 2015, 2018 and 2020 years as the initial data for the Zhezkazgan deposit under development. The results of geodetic monitoring showed the spatial variability of the subsidence of the Earth's surface in the mined area of the Zhezkazgan deposit.

In 2020, the area of maximum subsidence shifted to the southeastern part of the site, which indicates a gradual intensification of processes in the field's re-mining area. The greatest elevation changes are observed in the central part of the profile, where the main production workings are located, while the peripheral areas are characterized by relative terrain stability.

Figure 2 shows contour maps constructed using the Kriging method and the minimum curvature method based on 2020 year, demonstrating the distribution of deformation zones.



а – the Kriging method; б – the minimum curvature method
Figure 2. Contour maps based on geodetic subsidence monitoring data from the Zhezkazgan deposit.

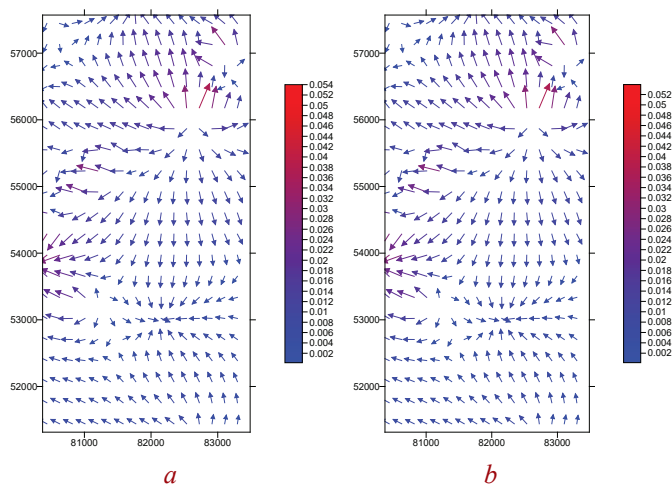
а – Kriging тәсілі; б – минималды қисықтық тәсілі
Сурет 2. Жезқазған кен орнының шөгүнінің геодезиялық мониторингі деректері бойынша контурлық карталар.

а – метод Kriging; б – метод минимальной кривизны
Рис. 2. Контурные карты по данным геодезического мониторинга оседаний Жезказганского месторождения.

On the contour map, the zones of subsidence and rise of the displacement values of the ground reference points are expressed in color. The vector map shows the direction and rate of decrease of the z-indicators of the reference points, and the arrows on the vector map indicate the downward direction, and the length of the arrows corresponds to the size (steepness) of the reference point. tilt.

A comparison of the methods made it possible to identify not only the absolute values of subsidence, but also their directional displacement, which is important for predicting further deformation processes.

Figure 3 shows contour and vector models of the surface constructed by various interpolation methods.



a – the IDW method; *b* – the Shepard method

Figure 3. Contour and vector models of the surface constructed by various interpolation methods.

a – IDW тәсілі; *б* – Shepard тәсілі

Сурет 3. Интерполяцияның әртүрлі әдістерімен салынған беттің контурлық және векторлық модельдері.

a – метод IDW; *б* – метод Shepard

Рис. 3. Контурные и векторные модели поверхности, построенные различными методами интерполяции.

A comparison of the results of various spatial interpolation algorithms was carried out on the basis of contour and vector models reflecting the distribution of subsidence of the Earth's surface. The methods of inverse distance weighting (IDW), Shepard and triangulation implemented in the Golden Software Surfer software environment were used for the analysis [7].

Overlaying a vector layer onto a contour map or 3D surface allows you to see how the flows relate to the terrain. To increase the visibility and comprehensive interpretation of the results of spatial interpolation, the contour and frame models of the site surface were combined (Figure 4). This overlay allows you to simultaneously visualize the distribution of subsidence and the geometric structure of the relief, providing a three-dimensional perception of spatial changes.

The use of a combined approach increases the information content of the analysis, as it allows us to identify the relationship between areas of intense subsidence and relief elements. At the same time, the Kriging method demonstrated the optimal balance between smoothness and accuracy of surface reconstruction, correctly interpolating areas of local deformations and ensuring a minimum value of the RMS error ($RMSE \approx 0,006$ м) [8].

The use of overlay models is recommended in engineering and geodetic research and monitoring systems, where integration of various types of spatial data and visual comparison of modeling results with the geometry of the terrain are required.

The standard error map shows minimal values in areas with a dense observation network, where the main reference points are located, and a gradual increase in errors to the periphery of the site. This confirms the correctness of the applied interpolation model and the high predictive reliability of the Kriging method in assessing relief deformations. The results

obtained indicate that the geostatistical structure of subsidence corresponds to the physical nature of the process and ensures sufficient stability of the model for practical application in engineering and geodetic monitoring.



Figure 4. Overlay of contour and wireframe models of the Earth's surface, built using Surfer GIS.

Сурет 4. Жер бетінің контурлық және рамалық модельдерінің қабаттасуы, surfer ГАЗ көмегімен салынған.

Рис. 4. Оверлей контурной и каркасной моделей земной поверхности, построенные с помощью ГИС Surfer.

Discussion of the results

The results of the study showed that the use of geostatistical interpolation methods allows not only to reconstruct the subsidence surface with high accuracy, but also to quantify the uncertainty of the model. The Kriging method, unlike deterministic approaches, takes into account spatial correlation, anisotropy and trends of the initial data, which makes it the most preferred tool for engineering and geodetic monitoring of deformations.

The use of combined approaches, such as pre-smoothing by the radial basis functions (RBF) method followed by refinement by kriging approximation, further improves the accuracy of modeling. Error analysis showed that with an irregular distribution of benchmarks, the discrepancy between the RBF and Kriging results does not exceed 10%, however, it is the kriging model that remains an unbiased predictor and provides confidence intervals for estimating spatial error [9].

Conclusion

The Kriging method provides an optimal balance between accuracy and smoothness of the surface when modeling subsidence and allows you to estimate the spatial uncertainty of the forecast. According to the analysis results, the standard deviation was $RMSE \approx 0.006$ m, which confirms the high reliability of the model.

For applied engineering and geodetic tasks, it is recommended to use the Kriging method in conjunction with standard error maps and cross-validation procedures, which provides an objective assessment of the reliability of the results. The prospects for further research are related to the consideration of the anisotropy of subsidence, variations in the geological

structure and the development of adaptive models combining geostatistical and neural network approaches to the prediction of deformations.

The Kriging method is a very flexible method, it can be either an accurate or a smoothing interpolator, depending on the parameter values. It allows you to efficiently and naturally incorporate anisotropy and trends into the model. If we consider only interpolation methods that work on the basis of weighted aver-

aging, then the Kriging method is the best unbiased predictor. If the data has a normal distribution, then the Kriging method becomes the best predictor among all unbiased predictors [10].

When visualizing quantities using the Kriging method, good results are obtained for most data, and therefore it is recommended to use this method to visualize geodetic monitoring data for the displacement of the Earth's surface during the development of mineral deposits.

REFERENCES

1. Kazhdan A.B., Guskov O.I., Shimansky A.A. *Matematicheskoe modelirovanie v geologii i razvedke poleznyh iskopaemyh [Mathematical modeling in geology and mineral exploration]*. Moscow, Nedra, 1979. 170 p. (in Russian)
2. Maltsev K.A., Mukharamova S.S. *Postroenie modelej prostranstvennyh peremennyh (s primeneniem paketa Surfer): uch. posobie [Building models of spatial variables (using the Surfer package): A textbook]*. Kazan: Kazanskiy universitet, 2014. 103 p. (in Russian)
3. Ivanov I.A., Chekantsev V.A. *Kazanskiy universitet [Solving geological problems using the Surfer software package]*. Tomsk: izdatel'stvo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2008. 92 p. (in Russian)
4. Silkin K.Y. *Geoinformacionnaja sistema Golden Software Surfer 8 [Geographic information system Golden Software Surfer 8]*. Voronezh: izdatel'sko-poligraficheskij centr Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008. 66 p. (in Russian)
5. *Primenenie sovremennyh tehnologij pri provedenii geodezicheskogo monitoringa sdvizhenija zemnoj poverhnosti [Application of modern technologies in geodetic monitoring of the Earth's surface displacement]*, Igemberlina M.B. [et al.], *Gornyj zhurnal Kazahstana [Mining Magazine of Kazakhstan]*. 2020. No. 3. 19–23 pp. (in Russian)
6. Heuvelink G.B.M., Webster R. *Spatial statistics and soil mapping: A blossoming partnership under pressure // Spatial Statistics*. 2022. V. 50. 1–12 pp. (in English)
7. Tomasso Carla, Paolo Farina, Emanuele Intrieri, Kostas Botsialas, Nicola Casagli. *On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine / Tomasso Carla [et al.] // Engineering Geology*. 2017. Vol. 228. 71–81 pp. (in English)
8. Oliver M.A., Webster R. *Basic steps in geostatistics: the variogram and Kriging*: London: Springer, 2015. 100 p. (in English)
9. *Surfer User Guide*. «Golden Software» LLC, 2019. – 1086 p. (in English)
10. Gubaidullin A.M. *Primenenie metodov kriginga v inzhenernoj geodezii [Application of kriging methods in engineering geodesy]*, *Izvestija vuzov. Geodezija i aerofotos'emka [University News. Geodesy and aerial photography]*. 2021. No. 4. 62–68 pp. (in Russian)

ПАЙДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Каждан А.Б., Гуськов О.И., Шиманский А.А. *Геология мен пайдалы қазбаларды барлаудағы математикалық модельдеу*: М.: Недра, 1979. 170 б. (орыс тілінде)
2. Мальцев К.А., Мухарамова С.С. *Кеңістіктік айнымалы модельдерді құру (Surfer пакетін қолдана отырып): оқу құралы-қазан: Қазан университеті, 2014. 103 б. (орыс тілінде)*
3. Иванов И.А., Чеканцев В.А. *Surfer бағдарламалық пакетін қолдану арқылы геологиялық есептерді шешу*: Томск: Томск политехникалық университетінің баспасы, 2008. 92 б. (орыс тілінде)
4. Силкин К.Ю. *Golden Software Surfer 8 Геоақпараттық жүйесі: Воронеж: Воронеж мемлекеттік университетінің баспа-полиграфиялық орталығы, 2008. 66 с. (орыс тілінде)*
5. *Жер бетінің жылжуына геодезиялық мониторинг жүргізу кезінде заманауи технологияларды қолдану / Игемберлина М.Б. [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен журналы. 2020. № 3. Б. 19–23 (орыс тілінде)*
6. Heuvelink G.B.M., Webster R. *Кеңістіктік статистика және топырақты картаға түсіру: қысыммен гүлденген серіктестік // Кеңістіктік статистика. 2022. № 50. Б. 1–12 (ағылшын тілінде)*
7. *Қатты тау жыныстарындағы сынғыш беткейлердің бұзылуын бақылау және алдын-ала ескерту туралы: ашық кеніштен Алынған Мысалдар / Tomasso Carla [және т. б.] // Инженерлік геология. 2017. № 228. Б. 71–81 (ағылшын тілінде)*
8. Oliver M.A., Webster R. *Геостатистикадағы негізгі қадамдар: вариограмма және Кригинг: Лондон: Шпрингер, 2015. 100 б. (ағылшын тілінде)*
9. *Surfer пайдаланушыларға арналған нұсқаулық. «Golden Software» ЖШС, 2019. – 1086 б. (ағылшын тілінде)*

10. Губайдуллин, А.М. Инженерлік геодезияда кригинг әдістерін қолдану // Жогары оқу орындарының жаңалықтары. Геодезия және аэрофототүсірілім. 2021. № 4. Б. 62–68 (орыс тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Каждан А.Б., Гуськов О.И., Шиманский А.А. Математическое моделирование в геологии и разведке полезных ископаемых: М.: Недра, 1979. 170 с. (на русском языке)
2. Мальцев К.А., Мухарамова С.С. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): уч. пособие: Казань: Казанский университет, 2014. 103 с. (на русском языке)
3. Иванов И.А., Чеканцев В.А. Решение геологических задач с применением программного пакета Surfer: Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2008. 92 с. (на русском языке)
4. Силкин К.Ю. Геоинформационная система Golden Software Surfer 8: Воронеж: издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. 66 с. (на русском языке)
5. Применение современных технологий при проведении геодезического мониторинга сдвижения земной поверхности / Игемберлина М.Б. [и др.] // Горный журнал Казахстана. 2020. № 3. С. 19–23 (на русском языке)
6. Heuvelink G.V.M., Webster R. Пространственная статистика и картографирование почв: успешное партнерство в сложных условиях // Пространственная статистика. 2022. № 50. С. 1–12 (на английском языке)
7. О мониторинге и раннем предупреждении хрупких отколов в массивах твердых пород: примеры из открытых горных работ / Tomasso Carla [и др.] // Инженерная геология. 2017. № 228. С. 71–81 (на английском языке)
8. Oliver M.A., Webster R. Основные этапы геостатистики: вариограмма и кригинг: Лондон: Шпрингер, 2015. 100 с. (на английском языке)
9. Руководство для пользователей Surfer. ООО «Golden Software», 2019. – 1086 с. (на английском языке)
10. Губайдуллин А.М. Применение методов кригинга в инженерной геодезии // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. № 4. С. 62–68 (на русском языке)

Information about the authors:

Igemberlina M.B., Doctor of Ph.D, associate professor of the Department of Surveying and Geodesy, NAO «Karaganda Technical University named after A. Saginov» (Karaganda, Kazakhstan), igemberlina@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4243-7748>

Zhunussova G.E., Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Surveying and Geodesy, NAO «Karaganda Technical University named after A. Saginov» (Karaganda, Kazakhstan), lena_gulya@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5472-4061>

Aldanysh Zh., Master of Engineering Science, Senior Lecturer of the Department of Surveying and Geodesy, NAO «Karaganda Technical University named after A. Saginov» (Karaganda, Kazakhstan), zhadra.bota.90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4106-0176>

Tuyakbay A.S., Doctor of Ph.D, associate professor of the Department of Chemistry, Chemical technology and Ecology, K. Kulazhanov Kazakh University of technology and business (Astana, Kazakhstan), assem_jan@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7333-6419>

Авторлар туралы мәліметтер:

Игемберлина М.Б., Ph.D, «Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті», «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

Жунусова Г.Е., т. ғ. к., «Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті», «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

Алданыш Ж., т. ғ. м., «Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті», «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының аға оқытушысы (Қарағанды қ., Қазақстан)

Тұяқбай Ә.С., Ph.D, К. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, «Химия, химиялық технология және экология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Астана қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:

Игемберлина М.Б., Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылқаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

Жунусова Г.Е., к.т.н., ассоциированный профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылқаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

Алданыш Ж., м. т. н., ст. преподаватель кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылқаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

Тұяқбай А.С., Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Химия, химическая технология и экология» Казахского университета технологии и бизнеса им. К. Кулажанова» (г. Астана, Казахстан)



2026

21-22
октября

КЦДС «Атакент»
Алматы, Казахстан



plastex.kz

Казахстанская международная выставка

ПЛАСТМАСС И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



По вопросам участия обращаться

+7 705 888 8819

Gaukhar.Bekmanova@iteca.events

Код МРНТИ 52.47.15

*Ж.С. Сарқұлова¹, Г.А. Исенғалиева¹, А.Г. Гусманова², А.А. Ибжанова³¹Aktobe regional university named after K. Zhubanov (Ақтөбе қ., Қазақстан),²Caspian University of Technology and Engineering named after S. Yesenov (Ақтау қ., Қазақстан),³Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin (Астана қ., Қазақстан)

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ ГОРИЗОНТАЛЬДЫ БАҒЫТТАЛҒАН БҰРҒЫЛАУ ПРОЦЕСТЕРІН МОНИТОРИНГ ЖАСАУ МЕН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аннотация. Бұл мақала көлденең бағытталған бұрғылауда жасанды интеллект (ЖИ) технологияларын қолданудың теориялық және практикалық аспектілерін қарастырады. Зерттеу нақты уақыттағы датчик деректерін жинау, өңдеу және талдауға негізделеді. Машиналық және терең оқыту алгоритмдері арқылы бұрғылау параметрлерін болжау, технологиялық режимдерді бейімдеу және ұнғы траекториясын оңтайландыру жолдары ұсынылады. Цифрлық егіздер виртуалды модельдеуді, тәуекелдерді бағалауды және шешім қабылдауды жетілдіруге мүмкіндік береді. IoT интеграциясы және техникалық күйді болжау жүйелері бұрғылау дәлдігі мен қауіпсіздігін арттырады, шығындар мен экологиялық тәуекелдерді азайтады. ЖИ жүйелерін енгізу бұрғылау процесін автоматтандыруға, өндірістік тиімділікті арттыруға және жабдық ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: көлденең бағытталған бұрғылау, интеллектуалды бақылау, бұрғылау жұмыстарын оңтайландыру, машиналық оқыту, цифрлық егіздер, параметрлерді бақылау, траекторияны оңтайландыру.

Monitoring and optimization of horizontal directional drilling processes based on artificial intelligence

Abstract. This article explores the theoretical and practical aspects of applying artificial intelligence (AI) technologies in industrial processes. The study is based on the real-time analysis and interpretation of sensor data. Particular attention is given to predicting key operational parameters, adapting technological regimes, and optimizing process performance using machine learning and deep learning algorithms. Furthermore, the implementation of digital twin technology enhances virtual modeling capabilities, improves risk assessment, and supports more effective decision-making. The integration of Internet of Things (IoT) systems with predictive maintenance approaches significantly increases operational efficiency and safety, while reducing costs and minimizing environmental risks. Overall, the adoption of AI-driven solutions enables the automation of production processes, improves productivity, and ensures more efficient utilization of resources.

Key words: horizontal directional drilling, intelligent surveillance, optimization of drilling operations, machine learning, digital twins, parameter control, trajectory optimization.

Мониторинг и оптимизация процессов горизонтально-направленного бурения на основе искусственного интеллекта

Аннотация. В этой статье рассматриваются теоретические и практические аспекты использования технологий искусственного интеллекта (ИИ) в горизонтально-направленном бурении. Исследование основано на сборе, обработке и анализе данных датчиков в реальном времени. Предложены способы прогнозирования параметров бурения, адаптации технологических режимов и оптимизации траектории бурения с помощью алгоритмов машинного и глубокого обучения. Цифровые близнецы позволяют совершенствовать виртуальное моделирование, оценку рисков и принятие решений. Системы интеграции IoT и прогнозирования технического состояния повышают точность и безопасность бурения, снижают затраты и экологические риски. Внедрение систем ИИ позволит автоматизировать процесс бурения, повысить эффективность производства и эффективно использовать ресурсы оборудования.

Ключевые слова: горизонтально-направленное бурение, интеллектуальное наблюдение, оптимизация буровых работ, машинное обучение, цифровые близнецы, контроль параметров, оптимизация траектории.

Кіріспе

Ұнғымаларды бұрғылау процесі мұнай-газ жұмыстарының өте қымбат кезеңі болып табылады. Бұл көмірсутектерді өндірудің өзіндік құнына байланысты. Асқинуына байланысты тау жыныстарын жоюдың бұл процесі ескі кен орындарының сарқылуына және қажеттілігіне қарай, шығарылуы қиын қорларды әзірлеу, жаңа технологияларды қолдану қажеттілігі туындайды.

Күрделі ұнғымаларды салу. Бүгінгі таңда бұрғылау тиімділігін арттыруға болады мысалы, үлкен деректерді талдау (Big Data), заттар интернеті (Internet of Things, IoT) жасанды интеллект (Artificial intelligence, AI) сияқты цифрлық технологияларды тарту арқылы болады. Атап айтқанда, Машиналық оқыту (Machine Learning) өте жылдам қарқынмен қолданыла бастады, соңғы жылдары жасанды интеллект технологиясы мен деректер ғылымының қиылысында пайда болған ғылым саласы ретінде үлкен дамуға ие болды [1].

Машиналық оқыту-бұл жасанды интеллектті дамытуға және зерттеуге арналған ғылымның бір саласы, ол өз кезегінде әртүрлі компьютерлерді қамтиды. Бұл жүйе адамның ойлауына еліктеуге мүмкіндік беретін жүйелер. Бұл ұғымдар бір контексте жиі қолданылады және кейде бір-бірін алмастырады, бірақ сонымен бірге олар әртүрлі мағынаға ие. Сонымен, Машиналық оқыту әрқашан жа-

санды интеллектті қолдануға негізделген, ал жасанды интеллект әрқашан машиналық оқытуды қамтымайды.

Машиналық оқыту кез-келген деректерді зерттеу үшін математикалық модельдер құрумен айналысады. Осы модельдердің теңшелетін параметрлерін бақыланатын деректерді көрсету үшін бейімдеуге болады, осылайша бағдарлама деректерден үйрене бастайды. Қолда бар бақылау деректері бойынша оқуды аяқтағаннан кейін модельдерді келесі бақылаулардың деректерін болжау үшін пайдалануға болады [2].

Машиналық оқыту алгоритмдерінің көмегімен бірнеше негізгі категорияларды шешуге болады:

1) регрессия міндеті-әртүрлі объектілерді іріктеу негізінде болжам жасау белгілері. Нәтижесінде нақты сан алынады, мысалы, бір жыл ішінде күтілетін дебит немесе өнімді қабаттың пайда болу тереңдігі.

2) жіктеу міндеті-категориялық белгілердің белгілі бір жиынтығына негізделген қорытынды жауап. Геологиялық барлау мәліметтері бойынша пайдалы қазбалар кен орындарын болжау сияқты оң немесе теріс жауап алуға мүмкіндік береді.

3) кластерлеу міндеті – қолда бар деректерді топтарға бөлуді жүргізу, мысалы, қабаттарды немесе қабаттар топтарын игерудің пайдалану объектісіне біріктіру.

4) өлшемділікті азайту міндеті-белгілердің үлкен санын көбірек азайту деректерді жазықтықта немесе 3D форматында кейіннен визуализациялауды қолдану ыңғайлылығы үшін қысылған көрініс.

Нәтижелер

Методологиялық негіз мыналарды қамтиды: 2019–2024 жылдар аралығындағы жарияланымдарға салыстырмалы-талдамалық шолу; бұрғылау үдерісіне жасанды интеллектті (ЖИ) енгізу бойынша индустриялық кейстерді талдау; әдістерді міндеттеріне қарай құрылымдау, атап айтқанда параметрлерді мониторингтеу, апаттық жағдайларды болжау және траекторияны оңтайландыру.

Зерттеу барысында машиналық және терең оқыту алгоритмдері (регрессиялық модельдер, ансамбльдік әдістер, нейрондық желілер), сондай-ақ гидромеханиканың физикалық модельдерін сенсорлық деректермен біріктіретін гибриді цифрлық егіздер қарастырылды.

Эмпирикалық база ретінде әдебиетте сипатталған тәжірибелер пайдаланылды (оның ішінде автоматтандырылған бұрғылау, предиктивті техникалық қызмет көрсету, бұлтты IoT-платформалармен интеграция), сондай-ақ тиімділіктің жалпыланған нәтижелері (мысалы, бұрғылау жылдамдығының (ROP) артуы, тоқтап қалу уақыттарының азаюы және траекторияны дәл ұстап тұрудың жақсаруы).

Салыстыру критерийлері ретінде тәсілдердің қайта өндірілу мүмкіндігі, олардың көлденең бағытталған бұрғылауға (ГНБ) қолданбалылығы және технико-экономикалық көрсеткіштерге әсері алынды.

Нәтижелерді талдау

Нәтижелер жасанды интеллектті (ЖИ) көлденең бағытталған бұрғылау (КББ) процестеріне біріктіру операциялардың тиімділігі мен қауіпсіздігінің өсуін қамтамасыз ететінін растайды. Жарияланымдар мен өндірістік жағдайларды талдау негізінде AI жүйелері сенсорлардың ағындық деректерін нақты уақыт режимінде өңдеуге, өзгерістерді болжауға қабілетті екендігі анықталды. Бұрғылау параметрлері және жабдықтың жұмысын автоматты түрде реттеу. Іске асырудың негізгі бағыттарының бірі-өріс деректерімен синхрондалатын технологиялық процестің динамикасын көрсететін виртуалды модельдердің бұрғылау қондырғыларының цифрлық егіздерін құру. Мұндай шешімдер операторға жүйенің күйін қадағалап қана қоймай, сонымен қатар жылдамдық, тұрақтылық және қуат тұтыну критерийлері бойынша оңтайлы параметрлерді таңдай отырып, балама бұрғылау сценарийлерін модельдеуге мүмкіндік береді.

ЖИ интеграциясы бұрғылау қондырғыларының «цифрлық егіздерін» құру перспективаларын ашады. Сандық егіз-өріс деректерімен синхрондалған бұрғылау бағанасы мен қашаудың төменгі орналасуының виртуалды моделі; ол процестің динамикасын болжауға және сценарийлік талдауды орындауға мүмкіндік береді. AI нақты уақыт режимінде бұрғылау параметрлерін бақылауды және болжауды қамтамасыз етеді, бұл автоматтандырылған бұрғылау стратегияларын жүзеге асыру үшін қажет.

Көптеген зерттеулер құрылымдық бұрғылау деректерін өңдеу үшін мұғаліммен оқытуды (регрессия, нейрондық

желілер) және мұғалімсіз оқытуды (кластерлеу, дискриминантты талдау) қолданады [3]. Деректерді қатаң өңдеу және модельдерді кросс-тексеру (cross validation) ЖИ шешімдерінің тұрақтылығы мен жалпылануын қамтамасыз етеді. Нәтижесінде заманауи ЖИ жүйелері әртүрлі мәселелерді шешуге мүмкіндік береді: бұрғылау ерітіндісінің қасиеттерін және ұңғыманың жылдамдығын болжаудан бастап ақауларды жіктеуге дейін (айналымның жоғалуы, құбырды төсеу және т. б.).

Көлденең бағытталған бұрғылауда цифрлық егіз тұжырымдаманы дамыту тек нақты деректерді жинауды ғана емес, сонымен қатар процестер физикасы мен машиналық оқытуды біріктіретін көп қабатты модельдерді құруды қажет етеді. Іс жүзінде бұл гибриді цифрлық егіздер түрінде жүзеге асырылады, онда гидродинамика мен тау жыныстарының механикасының классикалық теңдеулеріне нейрондық желіні болжау алгоритмдері рұқсат береді.

Бұл тәсіл сызықтық емес әсерлерді ескеруге мүмкіндік береді, мысалы, қашаудың әртүрлі тау жыныстарымен өзара әрекеттесуі немесе ауыспалы қысым жағдайында бұрғылау ерітіндісінің әрекеті. Гибриді егіздерді қолдану әсіресе тығыз қалалық құрылыстың астындағы жолдарды жобалауда тиімді, мұнда кез келген ауытқулар коммуникацияларға немесе төтенше жағдайларға зақым келтіруі мүмкін.

Сонымен қатар, цифрлық егіздер «what-if» талдау тұжырымдамасын жүзеге асырудың платформасына айналады. Оператор әртүрлі сценарийлерді алдын ала модельдей алады – ерітінді беру жылдамдығының өзгеруі, қашау жүктемесінің өзгеруі немесе бұрғылау құралының басқа түрін қолдану – және болжамды нәтижені бақылай алады [3]. Бұл бұрғылау кезеңіндегі қателіктердің ықтималдығын едәуір азайтуға және дизайн шешімдерінің сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Өзекті бағыттардың бірі-сандық егіздерді AR жүйелерімен біріктіру, мұнда нақты уақыттағы оператор бұрғылау басының орналасуы және берілген траекториядан ықтимал ауытқулар туралы көрнекі түсінік алады.

ЖИ бұрғылаудың ағымдағы көрсеткіштерін бақылау және ықтимал проблемаларды ерте анықтау үшін белсенді қолданылады. Жабдықтағы сандық сенсорлар қашау салмағы, көлбеу бұрышы, айналу жылдамдығы және геомагниттік деректер сияқты параметрлерді түсіреді. ЖИ жүйелері бұл кірістерді Тарихи модельдермен және физикалық заңдармен салыстыру арқылы талдайды. Мысалы, Halliburton интеллектуалды платформалары ағындық датчиктерді бұрғылау қозғалтқышының физикалық моделімен және қашаудың сандық егізімен (Digital twin) біріктіреді [4]. Бұл қашаудың мінез-құлқындағы тенденцияларды анықтауға және бұрғылау траекториясын уақтылы реттеуге мүмкіндік береді.

Әдебиеттерде Машиналық оқыту арқылы төтенше жағдайлар мен сәтсіздіктерді болжау мысалдары сипатталған. Мысалы, бір шолуда үш жағдай келтірілген: бұрғылау ерітінділерінің реологиялық қасиеттері мен сүзілуін болжау, бұрғылау бағанасы мен сынама деректеріне негізделген бұрғылау жылдамдығын болжау (ROP) және бұрғылау параметрлерінің үлкен массивіне негізделген циркуляцияны жоғалту жағдайларын жіктеу [5]. Әр жағдайда мұғалім-

мен оқыту модельдері (нейрондық желілер, регрессиялық әдістер) бұрғылау тарихында оқығаннан кейін болжаудың жоғары дәлдігін көрсетті. Бұл төтенше жағдайлар басталғанға дейін бұрғылау ерітіндісінің құрамын немесе бұрғылау параметрлерін уақтылы өзгертуге мүмкіндік береді. Сол сияқты, нейрондық желі модельдері созылу күштерін және басқа да маңызды жүктемелерді болжау үшін қолданылады. Эксперименттік зерттеулерде гибридті әдістер (мысалы, RBF-нейрондық желілер) қашау жүктемесінің болашақ ауытқуын болжай отырып, бірнеше секундқа алға қарау қабілетін көрсетті. Мұндай тәсілдер кептелудің алдын алуға көмектеседі және жуу сұйықтығының жұмысын оңтайландыру.

Кесте 1

Halliburton платформасын пайдалану кезінде бұрғылаудың негізгі көрсеткіштерін арттыру [5]

Table 1

Improving core drilling performance when using the Halliburton platform [5]

Таблица 1

Повышение основных показателей бурения при использовании платформы Halliburton [5]

Параметр	ЖИ-мен жақсарту
Ұңғыма жылдамдығы (ROP)	+33%
Құбыр тізбегін отырғызу жылдамдығы	+15-45%

1-кестеден ЖИ-мен автоматтандырылған бұрғылау айтарлықтай артықшылық бергенін көруге болады: қашау тау жыныстарынан әлдеқайда жылдам өтіп, құбырларды ауыстыру және орнату уақыты қысқарды. Мұндай жақсартуларға деректерді үнемі талдау және адаптивті басқару арқылы қол жеткізілді. Мониторингтен басқа, ЖИ бұрғылау алгоритмдерін оңтайландыру және траекторияларды жобалау үшін қолданылады. Заманауи оңтайландыру алгоритмдері автоматтандырылған шешімдерді ұсынады. Сонымен, Jip және Wei (2022) жетілдірілген радиалды оңтайландыру алгоритмін қолдана отырып, бұрғылау траекторияларын автоматты түрде жобалау және оңтайландыру әдісін жасады. Бұл геология мен техникалық шектеулерді ескере отырып, бұрғылаудың оңтайлы жолын алдын-ала есептеуге мүмкіндік береді.

Нақты уақыт режимінде ЖИ жүйелері бұрғылау кезінде бұрғылау траекториясын реттеуге көмектеседі. Мысалы, Halliburton автоматтандырылған геоштурман модулі бар LOGIX жүйесін құрды, онда геологиялық барлау деректері мен қосымша сенсорлар сайттың интерактивті моделін құрайды. Бір жағдайда бүкіл жүйе көлденең ұңғыманы адамның араласуынсыз 87% қашықтыққа бұрғылауға мүмкіндік берді [6]. Машиналық оқыту алгоритмдері бұрғылау кезіндегі каротаж деректеріне (LWD) негізделген геологиялық кадрдың өзгеруін талдады және мақсатты траекторияны автоматты түрде қайта есептеді [6]. Тәжірибе көрсеткендей, біріктірілген ЖИ + адам операторы жүйелері жоспарланған күрделілік индексі (DDI) ұстап

тұра алады және қолмен бірдей траектория дәлдігіне қол жеткізе алады.

Көлденең бағытталған бұрғылау процестеріне ЖИ енгізудің негізгі артықшылығы жүйелердің өзін-өзі оқыту қабілеті болып табылады. Адамның үнемі түзетуін қажет ететін дәстүрлі сараптамалық жүйелерден айырмашылығы, терең оқытудың заманауи алгоритмдері жаңа деректерді жинақтау кезінде болжамдарын автоматты түрде жақсартып алады. Бұл әсіресе бұрғылау үшін өте маңызды, мұнда әр жоба ерекше: геологиясы, тереңдігі, тау жыныстарының тығыздығы, бұрғылау ерітіндісінің құрамы және жабдықтың дизайны әр түрлі.

Нақты жағдайларда адаптивті оқыту жүйелері траекториялық ауытқуларды дәлірек болжау және тәуекелдерді ерте анықтау арқылы маңызды оқиғалардың санын шамамен 40% төмендету мүмкіндігін көрсетті [7]. Бірнеше Машиналық оқыту модельдерін қамтитын ансамбльдік әдістерді қолдану болжамдардың сенімділігін арттырады, өйткені әрбір модель басқалардың әлсіз жақтарын «өтейді». Бұл тәсіл әсіресе ұңғыма қабырғаларының құлау қаупі едәуір жоғары тұрақсыз топырақтарда бұрғылауға сұранысқа ие.

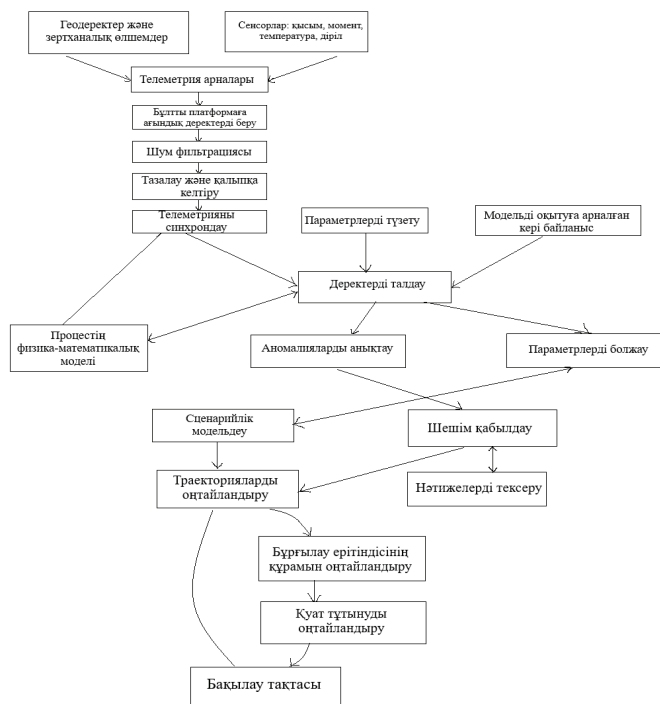
Қолданудың қосымша бағыты-электр қуатын тұтыну тұрғысынан бұрғылау режимдерін интеллектуалды оңтайландыру. ЖИ жүйелері, айналу моменті мен айналу жиілігін талдай отырып, қажетті жылдамдықты ұстап тұратын және энергия шығынын азайтатын жұмыс режимін ұсына алады. Осылайша, жасанды интеллект тек техникалық тиімділікті ғана емес, сонымен қатар жобалардың экологиялық тұрақтылығын арттыру құралына айналады.

Жабдықты болжамды басқару маңызды бағыт болып табылады. ЖИ модельдері құралдардың тозуын және жөндеу қажеттілігін болжау үшін дірілді, температураны және машинаның басқа параметрлерін талдайды. Бұл жоспардан тыс аялдамаларды жояды, сенімділікті арттырады және ресурстарды үнемдейді. Мұндай модельдердің егжей-тегжейлі ерекшелігі жеке зерттеулерді қажет етсе де, жалпы болжамды техникалық қызмет көрсету тәсілдері қазіргі бұрғылауда стандартқа айналуға.

Көлденең бағытталған бұрғылау ЖИ жүйелері қазірдің өзінде энергетикалық коммуникацияларды төсеу жобаларында қолданылуға. Мысалы, Кречович (2021) КББ тәуекелдерін бағалау үшін ЖИ модельдерін (логистикалық регрессия және нейрондық желілер) ұсынды [8]. Бұл модельдердің дамуы жобадағы әртүрлі сәтсіздіктердің пайда болуын болжауға және қолданыстағы инфрақұрылымның зақымдану қаупін алдын-ала азайтуға мүмкіндік берді. Жұмыс нәтижелері бойынша модельдер сәтсіздіктерді жіктеудің жоғары дәлдігін көрсетті, бұл тәуекелді бағалаудағы интеллектуалды тәсілдің артықшылықтарын растады.

Мақалада ұсынылған бағытталған бұрғылау сызбасы жасанды интеллект негізінде жеңілдетілген, теориялық түрде, яғни тегіс және идеалдандырылған траектория ретінде көрсетілген. Алайда нақты өндірістік жағдайда ұңғыма траекториясы мұндай түрде болмайды. Іс жүзінде бағытталған бұрғылау траекториясы инклинометриялық өлшеулер нәтижелері бойынша кезең-кезеңімен қалып-

тастырылады және өлшеу қателіктерін, бұрғылау құралдарының (ВНА) жұмыс режимдерін, сондай-ақ геологиялық жағдайлардың өзгергіштігін ескеретін дискретті нүктелер жиынтығы түрінде сипатталады.



Сурет 1. КББ процестерінде жасанды интеллектті қолданудың құрылымдық схемасы.

Figure 1. Block diagram of the application of artificial intelligence in HDD processes.

Рис. 1. Структурная схема применения искусственного интеллекта в процессах ГНБ.

Тағы бір мысал – көлденең ұңғымаларды бұрғылау кезінде мұнай өндіруде ЖИ қолдану. Жақында жүргізілген зерттеуде Пискун мен Давуди (2024) көлденең газ ұңғымаларының шығынын болжау үшін машиналық оқыту модельдерін (кездейсоқ орман және градиентті күшейту) жасады.

Модельдер дебитті өте дәл болжай алды: R^2 анықтау коэффициенті 0,991-ге жетті, бұл дәстүрлі модельдердің нәтижелерінен едәуір жоғары. Мұндай жетістік машиналық оқытудың ұқсас әдістерін КББ бұрғылау және пайдалану міндеттеріне ауыстыруға болатындығын, жобалардың тиімділігін арттыратындығын көрсетеді.

Бұлты технологиялармен және заттар интернетімен (IoT) ЖИ интеграциясының перспективалық бағыты ерекше назар аударуға тұрарлық. Қазіргі заманғы жобаларда бұрғылау жабдықтары ондаған датчиктермен жабдықталған, олар нақты уақыт режимінде деректерді бұлты платформаға жібереді [9]. Онда ауқымды талдау мен ұжымдық қол жетімділікті қамтамасыз ететін үлкен деректерді өңдеу алгоритмдері (Big Data analytics) жұмыс істейді. Нәтижесінде тапсырыс берушілер, инженерлер мен мердігерлер бұрғылау барысын қатар бақылай алады, бірлескен шешімдер қабылдай алады және стратегияны жедел реттей алады.

Кесте 2

КББ және онымен байланысты салаларда AI қолдану мысалдары

Table 2

Examples of AI applications in HDD and related fields (methods and results)

Таблица 2

Примеры применения ИИ в ГНБ и смежных областях

Қолдану саласы	Әдістері ЖИ/МЛ	Нәтиже
КББ жобаларының тәуекелдерін бағалау	Логистикалық регрессия, кездейсоқ орман алгоритмі, нейрондық желілер	Сәтсіздіктер мен үзілістердің нақты болжамы, шығындар мен тәуекелдердің төмендеуі
Траекторияны бақылау және басқару	МЛ-нақты уақыттағы Алгоритмдер	Бұрғылау жылдамдығын (ROP +33%) және корпуссты босату жылдамдығын (+15-45%) арттыру
Көлденең ұңғымалардың дебитін болжау	Кездейсоқ орман алгоритмі, градиентті күшейту	Кен орнын игеруді оңтайландыру үшін ұңғыманың шығынын дәл болжау ($R^2 \approx 0.99$)

IoT және ЖИ интеграциясы әр қондырғының (мысалы, сорғы немесе бұрғылау қозғалтқышы) өзіндік интеллектуалды агенті бар таратылған бұрғылауды басқару жүйелерін құру мүмкіндігін ашады. Бұл агенттер орталықтан-дырылмаған шешім қабылдау жүйесін құру үшін өзара әрекеттеседі. Бұл тәсіл орталық басқару модуліне жүктемені азайтады және жеке компоненттер істен шыққан жағдайда бүкіл жүйенің тұрақтылығын арттырады [9].

Көлденең бағытталған бұрғылау жобаларының экономикалық тиімділігін бағалау үшін ЖИ қолдану да маңызды бағыт болып табылады. Бұрғылау уақыты, материалдар шығыны, энергия шығыны және төтенше жағдайлардың ықтималдығы туралы мәліметтер негізінде Машиналық оқыту модельдері жобаның жалпы құнының болжамын құрайды. Бұл әр түрлі сценарийлерді жоспарлау кезінде салыстыруға және техникалық және экономикалық факторларды ескере отырып, ең жақсы нұсқаны таңдауға мүмкіндік береді.

Көлденең бағытталған бұрғылауға жасанды интеллектті енгізу процестерді бақылау мен басқаруда сапалы өзгеріске әкеледі. ЖИ жүйелері бұрғылау қондырғысының әрекетін болжау және оның жұмысын автоматты түрде реттеу үшін геодатчиктерден алынған деректерді, физикалық модельдерді және тарихи ақпаратты біріктіреді [10]. Нәтижесінде ұңғыманың жылдамдығы, траек-

торияның дәлдігі және операциялардың сенімділігі сияқты көрсеткіштер жақсарды [11]. Сонымен қатар, Машиналық оқыту төтенше жағдайларды болжау және бұрын есептеулерге көп уақытты қажет ететін бұрғылау параметрлерін оңтайландыру мәселелерін шешуге мүмкіндік береді. Тәсілдердің тиімділігі далалық жағдайлармен де (адамның қатысуынсыз траекторияның 87% автономды бұрғылау [11]), сондай-ақ ГНБ және мұнай-газ ұңғымаларының деректерінде сыналған модельдермен расталады [12]. Осылайша, ЖИ технологиялары КББ әдістерін белсенді түрде өзгертіп, оларды автоматтандырылған және үнемді етеді. Әрі қарайғы зерттеулердің болашағы терең оқыту алгоритмдерін жетілдірумен, бұрғылау қондырғыларының цифрлық егіздерін дамытумен және қосымша деректер көздерін (мысалы, геометриялық және лингвистикалық) біріктірумен байланысты, бұл осы саладағы интеллектуалды жүйелердің мүмкіндіктерін одан әрі кеңейтеді.

Қорытынды

Көлденең бағытталған бұрғылау (КББ) процестеріне жасанды интеллект (ЖИ) енгізу адаптивті және болжамды басқару модельдеріне көшуді қамтамасыз етеді. Сандық егіздерді, телеметриялық деректерді және ИОТ платформаларын біріктіру бұрғылау дәлдігін, ұңғыма жылдамдығын және Жабдықтың сенімділігін арттырады. ЖИ қолдану құралдардың тозуын және төтенше жағдайларды болжауға мүмкіндік береді, пайдалану тәуекелдері мен энергия шығындарын азайтады. Практикалық жағдайлар өнімділіктің 30-40% жоғарылауын, тоқтап қалудың төмендеуін және дизайн шешімдерінің сапасының өсуін көрсетеді.

Зерттеулердің одан әрі дамуы терең оқыту алгоритмдерін жетілдірумен, көп сенсорлық жүйелерді кеңейтумен және цифрлық егіздердің интероперабельділігін арттырумен байланысты. Мұның бәрі жаңа буынның интеллектуалды, энергияны үнемдейтін және экологиялық тұрақты бұрғылау кешендерін құруға негіз болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Вуд Д.А. Жасанды интеллект әдістерін қолдана отырып, нақты уақыт режимінде бұрғылау өнімділігін бақылау және оңтайландыру: шолу. *Тұрақты табиғи газ бұрғылау: Амстердам: Elsevier, 2024. Б. 169–210 (ағылшын тілінде)*
2. Аббас А.К., Баших А.А., Мұхаммед Х.Х.К. Машиналық оқыту негізінде бұрғылау ерітіндісінің жоғалуын тоқтату немесе азайту бойынша интеллектуалды шешімдер // *Energy. 2019. Т. 183. Б. 104–113 (ағылшын тілінде)*
3. Хан М., Ахмед С., Рехман А. бұрғылау қондырғыларында болжамды техникалық қызмет көрсетуге арналған Жасанды интеллект // *Табиғи газ туралы ғылым және инженерия журналы. 2021. Т. 96. Б. 259–272 (ағылшын тілінде)*
4. Пискунов С.А., Давуди Ш. Машиналық оқыту моделін қолдана отырып, көлденең ұңғымалардың дебитін болжау // *Томск политехникалық университетінің жаңалықтары. Георесурстарды жобалау. 2024. Т. 335. № 5. Б. 45–56 (орыс тілінде)*
5. Халибуртон жасанды интеллектке негізделген толық автоматтандырылған технологияны қолдана отырып бұрғыланған алғашқы көлденең ұңғыма. *Кейс-стади. Хьюстон: Halliburton Sperry ұңғымаларын бұрғылау, 2024. Б. 25 (ағылшын тілінде)*
6. Ли Х, Ван П, Чжао Т. көлденең бағытталған бұрғылау кезінде терең оқыту негізінде траекторияны болжау // *Автоматтандыру құрылыста. 2022. Т. 141. Б. 442–456 (ағылшын тілінде)*
7. Чен Ю., Ли Х., Чжан Дж. Бұрғылау процесін оңтайландыруға арналған гибриді цифрлық Қос модельдер: физикалық және деректерге негізделген тәсілдердің үйлесімі // *Мұнай ғылымы және инженерия журналы. 2023. Т. 225. Б. 372–385 (ағылшын тілінде)*
8. Мохегег С.Д. Мұнай өнеркәсібінде жасанды интеллект пен деректерді өндіруді қолдану // *Мұнай ғылымы және инжиниринг журналы. 2020. Т. 186. Б. 682–695 (ағылшын тілінде)*
9. Аль-Хамиди А., Данн-Норман С., Алкинани Х. Нақты уақыт режимінде бұрғылау мен шешім қабылдауды оңтайландыру үшін машиналық оқытуды қолдану // *Energy. 2020. Т. 13. № 22. С. 54–68 (ағылшын тілінде)*
10. Кречович М., Кречович А. Машиналық оқытуды пайдалана отырып, көлденең бағытталған бұрғылау әдісімен энергетикалық инфрақұрылым объектілеріндегі тәуекелдерді бағалау // *Energy. 2021. Т. 14. № 2. Б. 289–302 (ағылшын тілінде)*
11. Цзинь Л., Вэй Дж. Көлденең бағытталған траекторияны жобалау және оңтайландыруды зерттеу жетілдірілген радиалды қозғалысты оңтайландыруды қолдана отырып бұрғылау // *Қолданбалы ғылымдар. 2022. Т. 12. № 23. Б. 207–220 (ағылшын тілінде)*
12. Ву Х., Сун Дж., Тан Ю. Интеллектуалды бұрғылау жұмыстарына арналған заттар интернеті мен жасанды интеллекттің бұлтты интеграциясы // *Таза өндіріс журналы. 2024. Т. 430. Б. 139–144 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. Wood D.A. Monitoring and optimization of drilling performance in real time using Artificial Intelligence Methods: an overview. *Sustainable Natural Gas Drilling. Amsterdam: Elsevier, 2024. 169–210 pp. (in English)*
2. Abbas A.K., Bashikh A.A., Mohammed H.H.K. Intelligent solutions for stopping or reducing drilling mud losses based on machine learning // *Energy. 2019. V. 183. 104–113 pp. (in English)*

3. Khan M., Ahmed S., Rehman A. Artificial intelligence for predictive maintenance in drilling rigs // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021. V. 96. 259–272 pp. (in English)
4. Piskunov S.A., Davudi S. Prognozirovanie debita gorizontallykh skvazhin s primeneniem modeli ma shinnogo obucheniya [Forecasting the flow rate of horizontal wells using a machine learning model], *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering]*. 2024. V. 335. No. 5. 45–56 pp. (in Russian)
5. Halliburton. The first horizontal well drilled using fully automated technology based on artificial intelligence. Case study. Houston: Halliburton Sperry Drilling, 2024. 25 p. (in English)
6. Li H., Wang P., Zhao T. Deep learning-based trajectory prediction in horizontal directional drilling // *Automation in Construction*. 2022. V. 141. 442–456 pp. (in English)
7. Chen Y., Li X., Zhang J. Hybrid digital twin models for drilling process optimization: Combining physics-based and data-driven approaches // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2023. V. 225. 372–385 pp. (in English)
8. Mohaghegh S.D. Application of artificial intelligence and data mining in the petroleum industry // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. V. 186. 682–695 pp. (in English)
9. Al-Hameedi A., Dunn-Norman S., Alkinani H. Application of machine learning for drilling optimization and real time decision making // *Energy*. 2020. V. 13. No. 22. 54–68 pp. (in English)
10. Krechovich M., Krechovich A. Risk assessment at energy infrastructure facilities by horizontal directional drilling using machine learning // *Energy*. 2021. V. 14. No. 2. 289–302 pp. (in English)
11. Jin L., Wei J. Investigation of the design and optimization of the trajectory of horizontal directional drilling using advanced radial motion optimization // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. No. 23. 207–220 pp. (in English)
12. Wu X., Sun J., Tang Y. Cloud-based IoT and AI integration for smart drilling operations // *Journal of Cleaner Production*. 2024. V. 430. 139–144 pp. (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вуд Д.А. Мониторинг и оптимизация производительности бурения в реальном времени с использованием методов искусственного интеллекта: обзор. Устойчивое бурение на природном газе: Амстердам: Elsevier, 2024. С. 169–210 (на английском языке)
2. Аббас А.К., Баших А.А., Мохаммед Х.Х.К. Интеллектуальные решения по остановке или уменьшению потерь бурового раствора на основе машинного обучения // *Energy*. 2019. Т. 183. С. 104–113 (на английском языке)
3. Хан М., Ахмед С., Рехман А. Искусственный интеллект для прогнозирования технического обслуживания буровых установок // *Журнал науки и техники о природном газе*. 2021. Т. 96. С. 259–272 (на английском языке)
4. Пискунов С. А., Давуди Ш. Прогнозирование дебита горизонтальных скважин с применением модели машинного обучения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 5. С. 45–56 (на русском языке)
5. Халибуртон. Первая горизонтальная скважина, пробуренная с использованием полностью автоматизированной технологии, основанной на искусственном интеллекте. Тематическое исследование: Хьюстон: Бурение скважин Halliburton Sperry, 2024. С. 25 (на английском языке)
6. Ли Х., Ван П., Чжао Т. Прогнозирование траектории на основе глубокого обучения при горизонтально-направленном бурении // *Автоматизация в строительстве*. 2022. Т. 141. С. 442–456 (на английском языке)
7. Чен Ю., Ли Х., Чжан Дж. Гибридные цифровые модели-двойники для оптимизации процесса бурения: сочетание физических подходов и подходов, основанных на данных // *Журнал нефтяной науки и техники*. 2023. Т. 225. С. 372–385 (на английском языке)
8. Мохегг С.Д. Применение искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных в нефтяной промышленности // *Журнал нефтяной науки и техники*. 2020. Т. 186. С. 682–695 (на английском языке)
9. Аль-Хамиди А., Данн-Норман С., Алкинани Х. Применение машинного обучения для оптимизации бурения и принятия решений в режиме реального времени // *Энергия*. 2020. Т. 13. № 22. С. 54–68 (на английском языке)
10. Кречович М., Кречович А. Оценка рисков на объектах энергетической инфраструктуры методом горизонтально-направленного бурения с использованием машинного обучения // *Energies*. 2021. Т. 14. № 2. С. 289–302 (на английском языке)
11. Цзинь Л., Вэй Дж. Исследование проектирования и оптимизации траектории горизонтально-направленного бурения с использованием усовершенствованной оптимизации радиального перемещения // *Прикладные науки*. 2022. Т. 12. № 23. С. 207–220 (на английском языке)

12. Ву Х., Сун Дж., Тан Ю. Облачная интеграция Интернета вещей и искусственного интеллекта для интеллектуальных буровых работ // Журнал более чистого производства. 2024. Т. 430. С. 139–144 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Сарқұлова Ж.С., Ph.D доктор, қауымдастырылған профессор, Қ. Жұбанов атындағы АӨУ «Мұнай газ ісі» кафедрасының оқытушысы (Ақтөбе қ., Қазақстан), zhadi_0691@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8539-1802>

Исенғалиева Г.А., т. ғ. к., қауымдастырылған профессор, Қ. Жұбанов атындағы АӨУ «Экология» кафедрасының оқытушысы (Ақтөбе қ., Қазақстан), isengul@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8742-6378>

Гусманова А.Г., т. ғ. к., Ph.D доктор, профессор, Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инженерия университеті оқытушысы (Ақтау қ., Қазақстан), aigul.gusmanov@yu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-3163-153X>

Ибжанова А.А., Ph.D доктор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті оқытушысы (Астана қ., Қазақстан) ibzhanovaaainur@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-6768-3262>

Information about the authors:

Sarkulova Zh.S., Ph.D doctor, Associate Professor, K. Zhubanov University, lecturer of the Department of «Oil and Gas Business» (Aktobe, Kazakhstan)

Issengaliyeva G.A., candidate of Technical Sciences, Associate Professor, lecturer of the Department of «Ecology» (Aktobe, Kazakhstan)

Gusmanova A.G., candidate of Technical Sciences, professor, lecturer of the Caspian University of Technology and Engineering named after S. Yesenov (Aktau, Kazakhstan)

Ibzhanova A.A., Ph.D doctor, docent, lecturer of the Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin (Astana, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Сарқұлова Ж.С., Ph.D доктор, ассоциированный профессор, К. Zhubanov University, преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело» (г. Актөбе, Казахстан)

Исенғалиева Г.А., к. т. н., ассоциированный профессор, К. Zhubanov University, преподаватель кафедры «Экология» (г. Актөбе, Казахстан)

Гусманова А.Г., к. т. н., профессор, преподаватель, Каспийский университет технологий и инженерии им. Ш. Есенова (г. Ақтау, Казахстан)

Ибжанова А.А., Ph.D доктор, доцент, преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина (г. Астана, Казахстан)



Планирование подземных горных работ, продуманное до мельчайших деталей

Micromine Advance — специализированное решение для планирования подземных рудников, помогающее инженерам создавать реалистичные и выполнимые планы с учетом всех деталей. Благодаря современным технологиям и инструментам система точно моделирует сложные подземные условия и поддерживает фундаментальный подход к планированию.

micromine

ТОО «МАЙКРОМАЙН Центральная Азия»

Казахстан, г. Алматы, 050062

Ул. Кабдолова, 16, корпус 1, офис 501

Тел.: +7 727 339 51 45, e-mail: [mmkz@micromine.com](mailto:mmmkz@micromine.com)

micromine.kz



Код МРНТИ 52.47.15

Н.А. Бесбаева¹, *Г.Ж. Бимбетова¹, Г.М. Эфендиев², К.С. Надиров¹¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан),²Мұнай және газ институты (Баку қ., Әзербайжан Республикасы)

МҰНАЙ ЖӘНЕ ГАЗ ҰҢҒЫМАЛАРЫН БҰРҒЫЛАУҒА АРНАЛҒАН ЖЕҢІЛДЕТІЛГЕН БҰРҒЫЛАУ ШАЮ СҰЙЫҚТЫҒЫ

Аннотация. Мақалада сіңіру қабаттары жағдайында бұрғылау ерітінділерінің сүзілуін төмендетуге арналған модификацияланған полимерлі реагенттерді әзірлеу нәтижелері баяндалады. Әзірленген полимерлік жүйелер ерітіндінің сүзу және реологиялық қасиеттерін тиімді реттеуге мүмкіндік беріп, бұрғылау кезінде технологиялық сенімділікті арттырады. Бұл жүйелер тығыз өткізбейтін сүзгі қабыршақтарын түзе отырып, иілімді тұтқырлық пен ығысу кернеуін онтайлы деңгейде ұстайды. Зерттеуде модификацияланған полиакрилонитрил мен әртүрлі қатынастағы ұсақталған мақта сабақтарының ерітінді қасиеттеріне әсері қарастырылған. Ұңғыма қабырғалары арқылы сіңу дәрежесін төмендету мақсатында зертханалық сынақтар жүргізіліп, олардың тиімділігі бағаланған. Нәтижесінде полимер мен өсімдік толтырғышының онтайлы құрамы анықталды.

Түйінді сөздер: бұрғылау, ұңғыма, сіңірілу, мұнай, газ, шайынды сұйықтық, гудрон, полиакрилонитрил, модификациялау.

Lightweight drilling fluid for oil and gas well drilling

Abstract. The article presents the results of developing modified polymer reagents aimed at reducing the filtration of drilling fluids under conditions of loss circulation zones. The developed polymer systems make it possible to effectively regulate the filtration and rheological properties of the drilling fluid, thereby enhancing the technological reliability of the drilling process. These systems form dense, low-permeability filter cakes, ensuring optimal values of plastic viscosity and yield stress. The study examines the effect of modified polyacrylonitrile and ground cotton stalks in various ratios on the properties of the drilling fluid. Laboratory tests were conducted to reduce fluid loss through the wellbore walls, and their efficiency was evaluated. As a result, the optimal composition of the polymer-plant filler was determined.

Key words: drilling, well, loss circulation, oil, gas, drilling fluid, tar, polyacrylonitrile, modification.

Облегченная буровая промывочная жидкость для бурения нефтегазовых скважин

Аннотация. В статье представлены результаты разработки модифицированных полимерных реагентов, предназначенных для снижения фильтрации буровых растворов в условиях поглощающих пластов. Разработанные полимерные системы позволяют эффективно регулировать фильтрационные и реологические свойства раствора, повышая технологическую надежность процесса бурения. Данные системы формируют плотные, малопроницаемые фильтрационные корки, обеспечивая поддержание оптимальных значений пластической вязкости и предельного напряжения сдвига. В исследовании рассмотрено влияние модифицированного полиакрилонитрила и измельченных хлопковых стеблей в различных соотношениях на свойства бурового раствора. С целью снижения степени поглощения через стенки скважины проведены лабораторные испытания, в ходе которых оценена их эффективность. В результате определен оптимальный состав полимерно-растительного наполнителя.

Ключевые слова: бурение, скважина, поглощение, нефть, газ, промывочная жидкость, гудрон, полиакрилонитрил, модифицирование.

Кіріспе

Мұнайгаз саласын дамытудың қазіргі жағдайында күрделі геологиялық-техникалық жағдайларда ұңғымаларды бұрғылау тиімділігін арттыру ерекше өзекті болып отыр. Мұнай және газ ұңғымаларын салудағы негізгі мәселелердің бірі бұрғылау ерітіндісінің сіңірілуі болып табылады, бұл айтарлықтай материалдық шығындарға, бұрғылау жылдамдығының төмендеуіне, ұңғыма оқпанының тұрақтылығының нашарлауына және апаттық жағдайлардың туындауына әкеледі. Осыған байланысты жақсартылған өнімділігі бар бұрғылау ерітінділерінің жаңа құрамдарын әзірлеу маңызды ғылыми және практикалық міндет болып табылады [1].

Бұрғылау шаю сұйықтықтары немесе ұңғымаларды бұрғылау кезінде қолданылатын ерітінділер олардың функционалдық қасиеттерін қамтамасыз ететін бірқатар талаптарға сай болуы тиіс. Ұңғыма түбін тазарту, бұрғылау шламын шығару, бұрғылау қашауын тазалау және салқындатумен қатар, бұл ерітінділер ұңғымадағы гидродинамикалық қысымды ұстап тұруды қамтамасыз етуі қажет. Бұл өз кезегінде қабаттық флюидтердің ұңғыма оқпанына енуінің және бұрғылау ерітіндісінің сіңуін алдын алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұрғылау ерітінділері бұрғыланып жатқан тау жыныстардағы кеуектерді жауып тұратын жұқа сүзгілік қабықшаның түзілуін реттеуі тиіс, бұл олардың опырылуы мен құлауын болдырмайды [2].

Бұрғылау тәжірибесінде су негізіндегі, көмірсутек негізіндегі және азрацияланған негіздегі бұрғылау ерітінділері қолданылады. Экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан су не-

гізіндегі ерітінділер анағұрлым қолайлы болып табылады және мұнай-газ ұңғымаларын бұрғылау тәжірибесінде кенінен таралған. Қажетті қасиеттерді қамтамасыз ету үшін мұндай ерітінділердің құрамында уытты және қоршаған ортаға зиянды әсер ететін қоспалар болмауы тиіс. Сулы ерітінділердің қажетті реологиялық қасиеттерін қалыптастыру және олардың экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатында қазіргі уақытта экологиялық тұрғыдан қауіпсіз қоспаларды пайдалану ұсынылады. Бұрғылау ерітіндісінің реологиялық сипаттамалары оның әртүрлі температура, қысым және ығысу жылдамдығы жағдайларында қалай жұмыс істейтінін көрсетеді. Мысалы, ерітіндінің тұтқырлығы оның ағынға қарсы тұру қабілетін сипаттайды. Сонымен қатар, ерітінділердің тек тұтқырлық қасиеттерін ғана емес, олардың иілімді және тиксотропиялық қасиеттерін де ескеру қажет.

Ерітіндінің маңызды сипаттамаларының бірі иілімді тұтқырлық, ол бұрғылау ерітінділеріндегі қатты бөлшектер мен сұйық қабаттары арасындағы үйкелістен туындайтын ағынға меншікті кедергіні сипаттайды. Бұл көрсеткіш негізгі сұйықтықтардың (мысалы, су мен органикалық фазаның) тұтқырлығына, қатты бөлшектердің концентрациясы мен өлшеміне тәуелді. Бұрғылау ерітінділеріндегі иілімді тұтқырлықтың едәуір артуы ерітіндінің қозғалысының баяулауына және бұрғылау жылдамдығының төмендеуіне әкелуі мүмкін. Иілімді тұтқырлықты төмендету сұйылтқыш қоспаларды қолдану арқылы жүзеге асырылады [3]. Сонымен қатар, тұтқырлығы жоғары бұрғылау ерітінділері терең ұңғымаларды, сондай-ақ жоғары қысым

мен жоғары температура жағдайындағы ұңғымаларды бұрғылау кезінде тиімді болып табылады, өйткені мұндай жағдайларда ерітіндінің тұтқырлығы төмендеу үрдісіне ие болады.

Тығыздық та бұрғылау шаю сұйықтығының қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді. Кейбір жағдайларда ерітіндінің тығыздығы ұңғыма оқпанының тұрақтылығын жақсартып, қабат қысымын ұстап тұруға мүмкіндік береді. Бұрғылау ерітіндісінің тығыздығының төмен болуы ұңғыма оқпанының бұзылуына және флюидтердің атқылауына әкелуі мүмкін. Керісінше, ерітінді тығыздығының шамадан тыс жоғары болуы циркуляция жылдамдығының төмендеуіне және бұрғылау кезінде механикалық өту жылдамдығының азаюына себеп болады [3].

Ұңғыманы бұрғылау тиімділігіне ерітіндінің сүзгіленуі (фильтрациясы) де үлкен әсер етеді. Бұл көрсеткіш гидростатикалық қысымның кеуек қысымынан артық болуы нәтижесінде бұрғылау ерітіндісінің қабаттарға ену мөлшерін сипаттайды. Сүзгілену процесіне байланысты ұңғыма қабырғаларындағы тау жынысының кеуектері бұрғылау ерітіндісіндегі қалқымалы қатты бөлшектермен толып, сапалы сазды сүзгілік қабықша түзіледі. Ерітіндідегі қатты бөлшектер концентрациясы артқан сайын сүзгілену жылдамдығы мен сазды қабықша қалыңдығы азаяды.

Бұрғылау шаю сұйықтығының маңызды көрсеткіштерінің бірі ығысудың динамикалық кернеуі. Бұл шама ерітіндінің бұрғылау шламын ұңғыма оқпанында және сақиналы кеңістікте циркуляция кезінде қалқымалы күйде тасымалдау қабілетін сипаттайды. Қоспадағы қатты бөлшектердің өлшемі азайған сайын ағымдылық шегі артады. Бұл қатты бөлшектер арасындағы тартылыс күштерінің ұлғаюымен түсіндіріледі, нәтижесінде бұрғылау шламын тасымалдау қабілеті артып, ұңғыма оқпанының тиімді тазалануы қамтамасыз етіледі [2–4].

Көтеріп-түсіру операциялары кезінде бұрғылау ерітіндісінің маңызды реологиялық көрсеткіштерінің бірі гель беріктігі немесе ығысудың статикалық кернеуі болып табылады. Бұл көрсеткіш ерітіндінің статикалық жағдайда бұрғылау шламын қалқымалы күйде ұстап тұру қабілетін сипаттайды. Гель беріктігінің уақыт өте артуы ерітіндінің құрылымдық беріктігінің ұлғаюына әкеледі, сәйкесінше жинақталған гель құрылымын бұзып, ерітіндінің циркуляциясын қайта бастау үшін жоғары қысым қажет болады. Сіңірілу қаупі жоғары интервалдар үшін сіңу құбылысының пайда болу ықтималдығын барынша азайтуға мүмкіндік беретін арнайы бұрғылау режимдері мен бұрғылау ерітіндісінің параметрлері әзірленеді. Ал сіңу құбылысының алдын алу мүмкін болмаған жағдайда, оны жоюдың әртүрлі технологиялық әдістері қолданылады. Бұрғылау тәжірибесінде механикалық тампонаждау сіңуді жоюдың ең кең таралған және тиімді тәсілдерінің бірі болып табылады. Қазіргі заманғы тампонаж ерітінділері бірнеше фракциядағы қатты бөлшектерден тұратын күрделі композициялар болып табылады. Ірі бөлшектер жарықшақ аузына көпір (мост) түзсе, ұсақ бөлшектер оның ішкі кеңістігін толтырады. Тығынның беріктігін арттыру мақсатында талшықты компоненттер, ал тау жынысы бетімен адгезияны жақсарту үшін полимерлік қоспалар қолданылады. Ерекше назар реттелетін тығыздыққа және реологиялық

қасиеттерге ие материалдарды әзірлеуге аударылады, бұл оларды сіңу аймағына тиімді жеткізуге мүмкіндік береді. Күрделі ұңғымаларды бұрғылау тәжірибесінде органикалық және техногенді дәстүрлі емес кольматанттарды қолдану маңызды рөл атқарады. Мұндай материалдарға ұсақталған жаңғақ қабықтары, резеңке ұнтағы және басқа да ұқсас компоненттер жатады. Олар әртүрлі геологиялық жағдайларда тиімділігі дәлелденген сіңуге қарсы қоспалардың ерекше класына жатады. Оларды қолдану сіңу аймағында сенімді сүзгілік қабықшалар мен тығындар түзетін қабілетке негізделген, бұл бұрғылау ерітіндісінің қабатқа өту жолдарын тиімді түрде бөгейді [5].

Бұрғылау ерітіндісінің сіңу мәселесін шешудің бір жолы – полимерлік композициялық материалдар мен ұсақ резеңке ұнтағын қолдану болып табылады. Бұл қоспалар ұңғыма қабырғаларында тығыз, төмен өткізгіштікке ие сазды қабықша түзеді, нәтижесінде ерітіндінің қабатқа енуі азайып немесе толық тоқтайды.

Резинотехникалық өнімдер (РТӨ) өндірісінде көп мөлшерде қалдықтар түзіледі, олардың айтарлықтай бөлігі қайта өңделмейді, мысалы, этиленпропилен қалдықтары және т.б. Ұзақ уақыт бойы резеңке химиялық құрылымы (үшөлшемді химиялық тор) себебінен қайта өңделмейтін және қиындық туғызатын материал деп есептелген. Алайда, қазіргі таңда РТӨ қалдықтарын соңғы өнімге, шикізатқа немесе энергия көзіне айналдыруға мүмкіндік беретін бірқатар технологиялар бар [6].

Тәжірибелік зерттеулердің нәтижелерін талдау [7] бұрғылау ерітінділерінің құрамына металл оксидтерінің нанобөлшектерін (Fe_2O_3 , SiO_2) енгізу, тығыз өткізбейтін сүзгі қабығын қалыптастыру арқылы сіңуді 40–50% дейін төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Сонымен қатар, реологиялық сипаттамалардың жақсаруы, соның ішінде жүйенің аққыштығы мен құрылымдық беріктігінің артуы байқалады. Нанобөлшектердің төмен концентрациясының ең тиімдісі (шамамен 0,3–0,5 мас.%), онда бұрғылау ерітіндісінің тұтқырлығы мен сіңу қасиеттері арасында оңтайлы тепе-теңдікке қол жеткізіледі.

Шетелдік зерттеулерде бұрғылау ерітінділерінің сіңуіне жол бермеуге арналған полимерлі материалдарды жасауға көп көңіл бөлінеді. Атап айтқанда, жұмыста [8] көмірсутек негізіндегі бұрғылау ерітінділерінің құрамында май мен ісінетін полимерлерді қолдану ұсынылды. Мұндай полимерлер дисперсиялық ортаны өз көлемінің ұлғаюымен сіңіре алатындығы анықталды, бұл олардың микрожарықтар мен кеуекті арналарға тиімді енуін қамтамасыз етеді, содан кейін герметикалық тосқауылдар пайда болады. Бұл қоспаның 1,5%-дан аз концентрациясы ерітіндінің реологиялық қасиеттеріне іс жүзінде теріс әсер етпейтіні көрсетілген, бірақ олар сіңу шығындарын едәуір төмендетеді және жүйенің герметизациялау қабілетін арттырады. Сонымен қатар, сіңіруді жою үшін полимерлерді дәстүрлі материалдармен қолдану кезінде синергетикалық әсер анықталды, бұл шығын аймақтарын оқшаулау тиімділігінің айтарлықтай жоғарылауына әкеледі.

Қазіргі кезде бұрғылау ерітінділерінде полимерлік қоспалары бар су негізіндегі ерітінділер кеңінен қолданылады. Бұл ерітінділердің жоғары су ұстайтын қасиеті қиындықтардың қарқындылығын азайтуға мүмкіндік береді.

Елдің оңтүстік аймақтарында орналасқан мұнай және газ кен орындарының геологиялық қималарында ең жиі кездесетін қиындықтарға ұңғыма оқпанының тұрақтылығының төмендеуі жатады, бұл құбылыстарға ерітіндінің сіңуі, ұңғыма қабырғаларының опырылуы, сазды тау жыныстардың құлауы және т. б. жатады [9].

Зерттеулердің айтарлықтай санына қарамастан, бірқатар мәселелер әлі де жеткілікті зерттелмеген. Атап айтқанда, қарқынды сіңірілу жағдайында тиімді жұмыс істей алатын композициялық полимерлі реагенттерді пайдалана отырып, жергілікті шикізат негізінде бұрғылау ерітінділерін әзірлеуге шектеулі көңіл бөлінеді. Сонымен қатар, мұндай жүйелердің құрылымдық механизмдері және олардың нақты геологиялық-техникалық жағдайлардағы әрекеті жеткілікті зерттелмеген.

Осылайша, қазіргі ғылыми әдебиеттерді талдау қол жеткізілген жетістіктерге қарамастан, осы зерттеудің бағытын анықтайтын полимерлік технологиялар мен қол жетімді шикізатты қолдануды біріктіретін тиімді бұрғылау ерітінділерін құру тәсілдерін одан әрі дамыту қажеттілігі бар екенін көрсетеді.

Осы зерттеудің мақсаты мұнай және газ ұңғымаларын бұрғылау кезінде сіңіруді азайтуды қамтамасыз ететін полимерлі реагенттерді пайдалана отырып, тиімді бұрғылау ерітіндісінің құрамын әзірлеу болып табылады.

Бұрғылаудың геологиялық-техникалық шарттарына сәйкес полимерлі реагенттер негізінде жеңілдетілген бұрғылау, шаю сұйықтығының мамандандырылған құрамын таңдау, сондай-ақ ұңғымаларды салу процесінде сапаны бақылауды қолдану және мұнай және газ ұңғымаларында қиындықтар мен апаттарды алдын алу өзекті міндет болып табылады.

Зерттеу объектісі жергілікті шикізаттан синтезделген полимерлі қоспалардың жаңа буынына негізделген бұрғылау ерітінділері, сондай-ақ оларды мұнай және газ ұңғымаларын бұрғылау кезінде қолдану процестері болып табылады.

Зерттеу пәні жаңа полимерлі реагенттермен модификацияланған бұрғылау ерітінділерінің құрамы мен құрылымы болып табылады.

Ұңғыманы бұрғылау кезінде қолданылатын бұл ерітінді жеңілдетілген, белгілі бір тығыздық пен тұтқырлыққа ие және ұңғыма қабырғасында қажетті қабықша қалыңдығын қалыптастыра отырып, бұрғылау процесінде тиімді циркуляцияны қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, ерітінді құрамына сазды ерітіндіге полиакрилонитрил полимерлік реагентін, сабындалған гудронды (май қышқылдарының дистилляциясы) модификацияланған нұсқасын және ұсақталған мақта сабағын қосу арқылы бұрғылау ерітіндісінің сіңу жылдамдығын төмендету мүмкіндігі енгізілген [10, 11].

Материалдар мен әдістер

Модификациялау үшін қолданылған бастапқы мақта гудронының сабындалу көрсеткіші 80–130 мг КОН құрайды. Сабындалған гудрон 120–130°C температурада 45–50% май қышқылдарының тұздарын, 8–10% глицеридтерді, конденсация және полимеризация өнімдерін, оның ішінде 30% дейін госсипол туындыларын қамтиды.

Сабындалған фракция (май қышқылдарының тұздары мен госсиполаттар) полиакрилонитрилмен бірге шаю сұйықтығына тұрақтылық береді, қосымша антикоррозиялық және майлаушы қасиеттерін қамтамасыз етеді, сондай-ақ бұрғылау кезінде ерітіндінің сіңу жылдамдығын төмендетуге мүмкіндік туғызады.

Полиакрилонитрилді модификациялау келесі әдіспен жүзеге асырылды. Саз ұнтағы және карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) қамтылған су ерітіндісіне сабындалған гудрондағы май қышқылдарының тұздарымен модификацияланған полиакрилонитрил енгізілді. Гудронның сабындалуы 120–130°C температурада 20% натрий гидроксиді ерітіндісінде құм ваннасында жүргізілді. Сабындалу процесі аяқталған соң есептелген мөлшерде ұсақталған мақта сабағының массасы (ҰМС) ерітіндіге қосылды.

Ерітінді циркуляцияланған кезде және тау жынысына енгенде, модификацияланған полиакрилонитрил (МПАН) ісініп, ҰМС-пен бірге оның тау жыныс арқылы өту жылдамдығын төмендетуге ықпал етеді, осылайша сіңетін ерітіндінің көлемін азайтады.

Бұрғылау ерітіндісі циркуляцияланған сайын ұсақталған мақта сабағының мөлшері ұңғыма қабықшасында ішінара шөгіп қалу салдарынан азаяды. Сондықтан бұрғылау ерітіндісі циркуляцияланған кезде оны бастапқы концентрацияға жеткізу үшін ұсақталған мақта сабағын периодтық түрде қосу арқылы түзету қажет. Сол сияқты ерітінді құрамын модификацияланған полиакрилонитрил және бентонит сазы бойынша да түзету жүзеге асырылады [12].

Жоғарыда айтылғандай, бұрғылау ерітіндісінің реологиялық қасиеттері бұрғылау процесінің тиімділігін, ұңғыма оқпанының тұрақтылығын, шламның шығу сапасын және циркуляциялық жүйедегі гидравликалық шығындарды анықтайтын негізгі параметрлер болып табылады. Бұл қасиеттерді бағалау лабораториялық жағдайда, стандартталған аспаптар мен әдістемелерді қолдана отырып жүргізіледі, бұл нәтижелердің қайталанушылығын және салыстырмалылығын қамтамасыз етеді.

Зерттеулер барысында келесі көрсеткіштер анықталды: тығыздық, шартты (ШТ) және иілімді тұтқырлық (ИТ), ығысудың динамикалық кернеуі (БДК), ығысудың статикалық кернеуі (ЫСК) және басқа да параметрлер. Ұсынылған әдістеме бұрғылау ерітіндісінің құрылымдық-механикалық қасиеттерін талдауға және оны нақты бұрғылау жағдайларында қолдануға жарамдылығын бағалауға қажетті сандық деректерді алуға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері мен талқылау

1-ші кестеде көрсетілген тәжірибе нәтижелері модификацияланған полиакрилонитрилдің әртүрлі құрамдарының бұрғылау ерітіндісінің кейбір реологиялық қасиеттеріне әртүрлі әсер ететінін көрсетеді.

Зерттелетін бастапқы бұрғылау ерітіндісі, жоғарыда айтылғандай, суда 10% саз ұнтағын (Дарбаза бентониті), натрий гидроксиді және кальцинирленген соддан тұрады. Содан кейін құрамына модификацияланған полиакрилонитрил (ПАН), КМЦ және ұсақталған мақта сабағы (ҰМС) енгізіліп, ұсынылған бұрғылау ерітіндісінің кейбір реологиялық көрсеткіштері өлшенді. Ұсыныл-

Кесте 1

Әртүрлі құрамдағы модификацияланған полиакрилонитрилдің бұрғылау ерітіндісінің реологиялық көрсеткіштеріне әсері

Table 1

Effect of modified polyacrylonitrile of different compositions on the rheological properties of the drilling fluid

Таблица 1

Влияние модифицированного полиакрилонитрила различного состава на реологические показатели бурового раствора

Бұрғылау ерітіндісінің компоненттерінің құрамы, масс. %	ρ , кг/м ³	ШТ, с	Ф, см ³ /30 мин	ЫДК, Па	ИТ, мПа·с	ЫСК, мг/см ²	
						1 мин	10 мин
Бастапқы ерітінді	1200	29	7,0	13,0	10	65	70
Бастапқы ерітінді + 0,5 МПАН + 0,5 ҰМС. + 0,5 КМЦ + 0,2 Na ₂ CO ₃	1085	40	5,8	14,0	12	69	68
Бастапқы ерітінді + 1,0 МПАН + 1,0 ҰМС. + 0,75 КМЦ + 0,2 Na ₂ CO ₃	1072	65	4,2	15,7	14,5	64	69
Бастапқы ерітінді + 1,5 МПАН + 1,5 ҰМС. + 1,0 КМЦ + 0,2 Na ₂ CO ₃	1060	85	3,8	16,5	15,7	70	70
Бастапқы ерітінді + 2,0 МПАН + 2,0 ҰМС. + 1,25 КМЦ + 0,2 Na ₂ CO ₃	1040	120	3,5	18,0	16,0	72	74
Бастапқы ерітінді + 2,5 МПАН + 2,5 ҰМС. + 1,50 КМЦ	1040	155	3,9	20,0	18,8	69	68
Бастапқы ерітінді + 3,0 МПАН + 3,0 ҰМС. + 1,75 КМЦ + 0,2 Na ₂ CO ₃	1040	255	4,0	30,0	20,5	67	67

ған жеңілдетілген, полимерлік қоспалары бар бұрғылау ерітіндісі негізгі технологиялық параметрлер бойынша зерттелді, оларға иілімді тұтқырлық, тығыздық, шартты тұтқырлық, сүзгілену (филтрация) және ығысудың динамикалық кернеуі (ЫДК) кіреді. Ерекше назар иілімді тұтқырлық пен ығысудың динамикалық кернеуі (ЫДК) арасындағы өзара байланыстың бағалануына аударылды, себебі бұл жүйенің құрылымдық-механикалық қасиеттерін анықтайтын негізгі реологиялық параметрлер болып табылады.

Иілімді тұтқырлық ерітінді ағысына қарсы ішкі кедергіні сипаттайды және қатты фазаның концентрациясына және дисперстігіне тәуелді болады. Ал ығысудың динамикалық кернеуі (ЫДК) ерітіндінің құрылымдалу дәрежесін көрсетеді және шлам бөлшектерін қалқымалы күйде ұстап тұру қабілетін бағалауға мүмкіндік береді. Иілімді тұтқырлық пен ығысудың динамикалық кернеуінің (ЫДК) оптималды қатынасы бұрғыланған тау жынысының тиімді шығарылуын қамтамасыз етеді, ұңғыма қабырғасының опырылуын болдырмайды және ұңғыма оқпанының тұрақтылығын арттырады.

Өзірленген құрам ұңғыма қабырғасында берік және төмен өткізгіш сүзгі қабықшасын қалыптастырады, бұрғылау ерітіндісінің шығындарын азайтады және суды шығару мөлшерін төмендетеді. Сонымен қатар, иілімді тұтқырлық пен ығысудың динамикалық кернеуінің (ЫДК) тұрақты мәндері қамтамасыз етіледі, бұл ерітіндіде тұрақты кеңістік құрылымының түзілуін және оны сіңірілетін қабаттардың шарттарына бейімделуін көрсетеді.

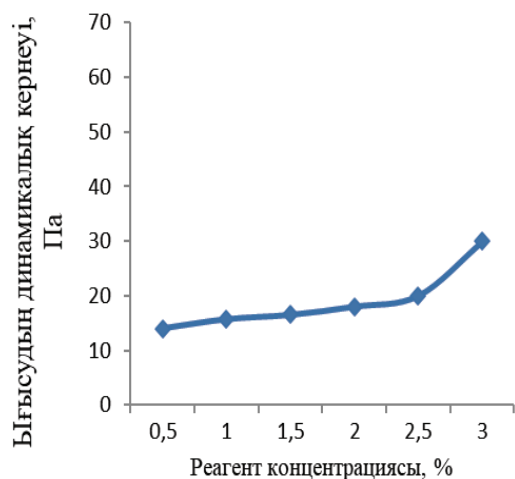
1-ші кестеде берілген № 5 құрамдағы бұрғылау ерітіндісі ығысудың динамикалық кернеуінің тұрақты мәнін сақтайды (18,0 Па), бұл гель құрамындағы (ерітінді)

бұрғыланған бөлшектерді тиімді ұстап тұруға мүмкіндік береді. Оптималды нұсқаны таңдау критерийі ретінде иілімді тұтқырлық диапазоны, яғни гидравликалық кедергілердің минималды өсуімен шламның тиімді шығарылуын қамтамасыз ететін интервал алынған. Зерттеулер көрсеткендей, оптималды құрам – № 5, мұнда иілімді тұтқырлық мәні (16 мПа·с) технологиялық тұрғыдан рұқсат етілген интервалда орналасқан және реологиялық мен сүзгілік қасиеттердің тепе-тең үйлесімін қамтамасыз етеді, циркуляциялық жүйенің тығыздығын шамадан тыс арттырмайды.

1 және 2-суреттерде модификацияланған полиакрилонитрил негізіндегі сазды бұрғылау ерітінділерінің ығысудың динамикалық кернеуі мен иілімді тұтқырлық мәндері, құрамындағы реагент концентрациясына байланысты көрсетілген.

Айта кету керек, бұрғылау ерітіндісінің ығысуының динамикалық кернеуі мен иілімді тұтқырлығының реагент концентрациясына тәуелділігі бір-бірінен аз ерекшеленеді. Көрсетілген тәуелділіктерге сәйкес деректер зерттелген жаңа реагент концентрациясына байланысты бұрғылау ерітінділерінің ығысуының динамикалық кернеуі (ЫДК) мен иілімді тұтқырлығының (ИТ) өзгерістері шамамен сызықтық сипатқа ие екенін көрсетеді.

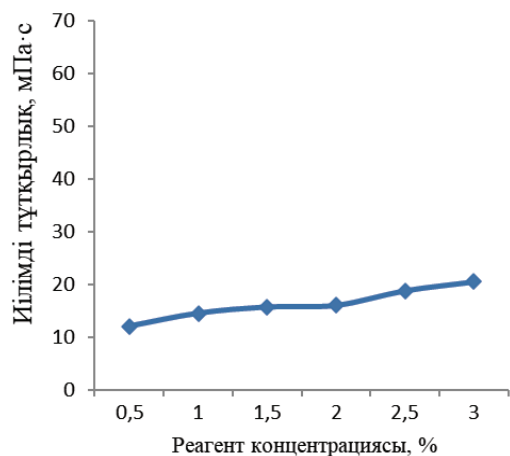
Реагент мөлшерінің артуы ИТ мен ЫДК мәндерінің бір уақытта өсуіне әкеледі, бұл ерітіндінің құрылымдалу дәрежесінің артуын және шлам бөлшектерін қалқымалы күйде ұстап тұру қабілетінің жақсарғанын көрсетеді. Мұндай реологиялық қасиеттердің үйлесімі су бергіштігін азайтуға және ұңғыма қабырғасында берік, сапалы сүзгі қабықшасын қалыптастыруға ықпал етеді. Эксперименттік деректерді талдау негізінде № 5 құрамдағы ерітінді (кесте 1)



Сурет 1. Бұрғылау ерітіндісінің ығысуының динамикалық кернеуінің реагент концентрациясына тәуелділігі.

Figure 1. Dependence of the dynamic shear stress of the drilling fluid on the reagent concentration.

Рис. 1. Зависимость динамического напряжения сдвига бурового раствора от концентрации реагента.



Сурет 2. Бұрғылау ерітіндісінің илімді тұтқырлығының реагент концентрациясына тәуелділігі.

Figure 2. Dependence of the plastic viscosity of the drilling fluid on the reagent concentration.

Рис. 2. Зависимость пластической вязкости бурового раствора от концентрации реагента.

оптимально деп таңдалды, себебі ол негізгі көрсеткіштер бойынша ең жақсы нәтижелерді көрсетті: тұрақты илімді тұтқырлық, жеткілікті ығысудың динамикалық кернеуі және минималды ерітінді шығыны.

Алынған бұрғылау ерітіндісінің ұңғыма қабырғасы арқылы сіңу дәрежесін азайту және ерітінді шығынын төмендету тиімділігін бағалау мақсатында зерттеулер лабораториялық стендте жүргізілді (3-сурет). Жабдық құрамына кіретін элементтер: бастапқы бұрғылау ерітіндісіне арналған сыйымдылық (1), полимерлік қоспаға арналған сыйымдылық (2), араластырғыш (3); сұйықтық ағынын

жабатын клапандар (4); сорап (5), манометр (6), қабат моделі (7), және тау жынысынан өткен бұрғылау ерітіндісінің өлшейтін сыйымдылық (8).

Біртекті сызықтық қабат моделі екі ұшынан фланецтермен бекітілген, тау жынысымен толтырылған болат құбыр. Соңғы фланецке модельді стендке қосуға және бұрғылау ерітіндісінің тау жынысы арқылы сіңу жылдамдығын бақылауға мүмкіндік беретін клапан орнатылған. Қабат моделіне бастапқы ерітінді мен полимерлік қоспасы бар ерітінді енгізіліп, кейін тау жынысынан өткен ерітінді көлемі анықталды.



Сурет 3. Бұрғылау ерітіндісінің сіңу дәрежесін анықтау үшін қолданылатын стенд схемасы.

Figure 3. Scheme of the apparatus for determining the degree of drilling fluid loss (absorption).

Рис. 3. Схема установки для определения степени поглощения бурового раствора.

Бастапқы және жеңілдетілген бұрғылау ерітінділеріне арналған сыйымдылық 1 және 2 сорап 5 арқылы тау жынысы мен толтырылған қабат моделіне 7 жіберіледі, содан кейін тау жынысынан өткен ерітіндінің көлемі 8 сыйымдылықта анықталады.

Бұрғылау ерітінділерінің қасиеттерін реттеу үшін жарамды полимерлік заттарды таңдау кезінде, полимер макромолекуласында жоғары полярлыққа ие функционалды топтардың жиналуы ескерілуі қажет. Бұл полярлық топтардың сипаты дипольдік моменттің шамасымен бағыты арқылы бағаланады. Аталған жағдайда, полимерлік реагентті қолданғанда макромолекулаларда карбоксилдік, гидроксилдік және басқада полярлық топтардың жиналуы тұрақты торлы құрылымдардың түзілуіне қолайлы жағдай жасайды.

Жоғарыда келтірілгендей, полимерлі реагентті жергілікті шикізат негізіндегі өсімдік гудроны және толтырғышпен бірге қолдану бұрғылау ерітіндісінің тұрақтылығын арттырып, оны ұңғыманы бұрғылау процесінде тиімді етеді. Сабындалған өсімдік гудронының май қышқылдарының тұздары мен ұсақталған мақта сабағының құрамына байланысты алынған бұрғылау ерітіндісі ерітінді құрылымын нығайтуға ықпал етеді. Сонымен қатар, бұл құрам тау жынысын бұзушы құралға майлаушы және салқындатушы әсер береді, сүзгі коэффициентін төмендетеді және қабықша түзілуін сапалы түрде қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде жоғары сіңіру қабаттарда сүзгілеуді төмендетуге арналған жаңа модификацияланған полимерлі реагент әзірленіп, эксперименттік түрде тексерілді. Зерттеу көрсеткендей, реагент концентрациясының артуы иілімді тұтқырлық пен ығысудың динамикалық кернеуінің бір уақытта өсуіне әкеледі, бұл ерітіндіде тұрақты құрылымның түзілуін, шламның тиімді шығарылуын және су бергіштік дәрежесінің төмендеуін қамтамасыз етеді.

Оптималды құрам негізгі көрсеткіштер бойынша ең жақсы нәтижелерді көрсетті: су бергіштікті төмендету, жеткілікті БДК мәні, ерітінді шығынының минималды болуы және ұңғыма қабырғасында сапалы сүзгі қабықшасының түзілуі. Аталған нәтижелер модификациялан-

ған полимерлердің бұрғылау ерітінділерінің реологиялық және сүзгілік қасиеттерін кешенді түрде реттеуде тиімділігін, бұрғылау технологиясының сенімділігін арттыратынын және жоғары өткізгіштігі бар және сіңіргіш қабаттардағы қиындықтар қаупін төмендететінін растады.

Осылайша, жүргізілген зерттеулердің нәтижелері көрсеткендей, ұсынылған бұрғылау ерітіндісінің құрамы ұңғыманы бұрғылау процесінде ерітіндінің сіңірілуін азайтуға арналған талаптарға толық сәйкес келеді.

АЛҒЫС

Бұл зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің (BR24992809) қолдауымен жүргізілді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Чудинова И.В. Тұрақсыз сазды жыныстарда барлау ұңғымаларын бұрғылауға арналған полимерлі шаю сұйықтықтарының құрамын негіздеу және әзірлеу: техн. ғылым. канд. ғылыми дәрежесін алуға арналған диссертацияның авторефераты: Санкт-Петербург, 2019 (орыс тілінде)
2. Маусымдық су басқан жағалау аймақтарынан Арктикалық қайраңды игерудің тұжырымдамалық шешімін әзірлеу / Литвиненко В.С. [және т. б.] // Халықаралық Тау-кен ғылымы және технологиясы. 2021. № 32. Б.1–1 (ағылшын тілінде)
3. Көмірсутек негізіндегі ерітінділердің реологиясын олардың құрамдас құрамына қарай зерттеу / Дубликов М.В. [және т. б.] // Құрлықта және теңізде мұнай және газ ұңғымаларын салу. 2020. № 10. Б. 25–28 (орыс тілінде)
4. Табиғи алынған хина жапырағы мен гибискус жапырағы сығындыларын пайдалана отырып, су негізіндегі бұрғылау сұйықтықтарының реологиялық және сүзу сипаттамаларын жақсарту / Исмаил А.Р. [және т. б.] // Бензин. Зерттеуші. Өнім. Технол. 2020. Т. 10. С. 3541–3556 (ағылшын тілінде)
5. Карпов Е.О. Бұрғылау ерітіндісін сіңіру: проблеманы кешенді талдау және заманауи шешімдер // Ғылым хабаршысы. 2025. Т. 1. № 5 (86). Б.1212–1217 (орыс тілінде)
6. Бесбаева Н.А. және т. б. Мұнай-газ ұңғымаларын бұрғылау кезінде бұрғылау, жуу сұйықтықтарының сіңуін болдырмау жөніндегі іс-шаралар // Әзірбайжан Республикасының жас ғалымдары мен мамандарының республикалық ғылыми-практикалық конференциясы, 2023. Б. 28–32 (орыс тілінде)
7. Врызас З., Келесидис В.С. Нанобөлшектер негізіндегі бұрғылау ерітінділері: шолу // Энергия. 2017. Т. 10. Б. 1–34 (ағылшын тілінде)
8. Мұнай негізіндегі бұрғылау ерітінділеріндегі жұтылуды азайту: мұнайды сіңіретін полимерлерді қолдану / Чжун Х. [және т. б.] // Материалдар. 2018. Т. 11 (10). Б. 2020 (ағылшын тілінде)
9. Пат.пайдалы модель үшін № 10053. Модификацияланған бұрғылау ерітіндісі / Бесбаева Н.А., Бимбетова Г.Ж., Надиров К.С., Надирова Ж.К., Бондаренко В.П., Батыр Г.Ж.; өтініш беруші және «Оңтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ патент иегері. М. Әуезова (КЗ.); жарияланды 10.01.2025 (орыс тілінде)
10. Мұнайгаз ұңғымаларын бұрғылау кезінде бұрғылау ерітіндісінің сіңуін төмендетуге арналған полимерлі реагент / Бимбетова Г.Ж. [және т. б.] // ҚазТБҰ Хабаршысы. 2024. № 2 (23). Б. 439–446 (орыс тілінде)
11. Бұрғылау шаю сұйықтығының сіңуін төмендетуге арналған құрамында полимер бар құрам / Бесбаева Н.А. [және т. б.] // Мұнай және газ. 2025. № 6 (150). Б. 26–38 (орыс тілінде)
12. Бұрғылау ерітіндісінің сіңуін төмендету үшін жеңілдетілген полимерлік құрам / Бимбетова Г.Ж. [және т. б.] // ҚазТБҰ хабаршысы. 2025. № 2 (27). Б. 481–492 (қазақ тілінде)

REFERENCES

1. Chudinova I.V. Obosnovanie i razrabotka sostavov polimernykh promyvochnykh zhidkostej dlya bureniya razvedochnykh skvazhin v neustojchivykh glinistykh porodah [Justification and development of polymer-based drilling fluid formulations for drilling exploratory wells in unstable clay formations], Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Extended abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. Saint Petersburg, 2019 (in Russian)
2. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas / Litvinenko V.S. [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. No. 32. 1–1 pp. (in English)

3. *Issledovanie reologii rastvorov na uglevodorodnoj osnove v zavisimosti ot ih komponentnogo sostava [A study of hydrocarbon-based solutions rheology depending on its component composition], Dvoynikov M.V. [et al.], Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more [Construction of oil and gas wells on land and sea]. 2020. No. 10. 25–28 pp. (in Russian)*
4. *Improvement of rheological and filtration characteristics of water-based drilling fluids using naturally derived henna leaf and hibiscus leaf extracts / Ismail A.R. [et al.] // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2020. V. 10. 3541–3556 pp. (in English)*
5. *Karpov E.O. Pogloshchenie burovogo rastvora: kompleksnyj analiz problemy i sovremennye resheniya [Drilling mud absorption: comprehensive analysis of problem and modern solutions], Vestnik nauki [Science Bulletin]. 2025. V. 1. No. 5 (86). 1212–1217 pp. (in Russian)*
6. *Besbaeva N.A. et al. Meropriyatya po predotvrashcheniyu pogloshcheniya burovyyh, promyvochnyyh zhidkostej pri burenii neftegazovyh skvazhin [Measures to prevent the loss of drilling and workover fluids during oil and gas well drilling], Respublikanskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya molodyh uchennyh i specialistov Azerbajdzhanskoj Respubliki [Republican scientific and practical conference of young scientists and specialists of the republic of Azerbaijan], 2023. 28–32 pp. (in Russian)*
7. *Vryzas Z., Kelessidis V.C. Nano-based drilling fluids: A Review // Energies. 2017. V. 10. 1–34 pp. (in English)*
8. *Mitigation of lost circulation in oil-based drilling fluids using oil absorbent polymer / Zhong H. [et al.] // Materials. 2018. V. 11 (10). 2020 p. (in English)*
9. *Modificirovannyj burovoy rastvorn a poleznuyu model' № 10053 [Modified drilling fluid № 10053 for utility model], Besbaeva N.A., Bimbetova G.Zh., Nadirov K.S., Nadirova Zh.K., Bondarenko V.P., Bатыр G.Zh.; заявитель i patentoobladatel' NAO «Yuzhno-Kazahstanskij universitet imeni M. Auezova (KZ.)», [Non-Profit limited Company «M. Auezov South Kazakhstan University» (KZ)], 10.01.2025 (in Russian)*
10. *Polimernyj reagent dlya snizheniya pogloshcheniya burovogo rastvora pri burenii neftegazovyh skvazhin [Polymer reagents to reduce the absorption of drilling mud during drilling of oil and gas wells], Bimbetova G.Zh. [et al.], Vestnik KazUTB [KazUTB Bulletin]. 2024. No. 2 (23). 439–446 pp. (in Russian)*
11. *Polimersoderzhashchij sostav dlya snizheniya pogloshcheniya burovoy promyvochnoj zhidkosti [Polymer-containing composition to reduce the absorption of drilling fluid] / Besbaeva N.A. [et al.] // Neft' i gaz [Oil and gas]. 2025. No. 6 (150). 26–38 pp. (in Russian)*
12. *Light weight polymer composition to reduce the absorption of drilling mud / Bimbetova G.J. [et al.] // Bulletin of KazUTB. 2025. No. 2 (27). 481–492 pp. (in Kazakh)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Чудинова И.В. Обоснование и разработка составов полимерных промывочных жидкостей для бурения разведочных скважин в неустойчивых глинистых породах: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: Санкт-Петербург, 2019 (на русском языке)*
2. *Разработка концептуального решения по освоению арктического шельфа с сезонно затопляемых прибрежных территорий / Литвиненко В.С. [и др.] // Международный научно-технический журнал горного дела. 2021. № 32. С. 1–1 (на английском языке)*
3. *Исследование реологии растворов на углеводородной основе в зависимости от их компонентного состава / Двоynиков М.В. [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 10. С. 25–28 (на русском языке)*
4. *Улучшение реологических и фильтрационных характеристик буровых растворов на водной основе с использованием натуральных экстрактов листьев хны и гибискуса / Исмаил А.Р. [и др.] // Нефть. Исследователь. Производитель. Технология. 2020. Т. 10. С. 3541–3556 (на английском языке)*
5. *Карпов Е.О. Поглощение бурового раствора: комплексный анализ проблемы и современные решения // Вестник науки. 2025. Т. 1. № 5 (86). С. 1212–1217 (на русском языке)*
6. *Бесбаева Н.А. и др. Мероприятия по предотвращению поглощения буровых, промывочных жидкостей при бурении нефтегазовых скважин // Республиканская научн.- практ. конф. молодых ученых и специалистов Азербайджанской Республики, 2023. С. 28–32 (на русском языке)*
7. *Врызас З., Келессидис В.С. Наночастичные буровые растворы: обзор // Энергия. 2017. Т. 10. С. 1–34 (на английском языке)*
8. *Снижение потерь циркуляции в буровых растворах на нефтяной основе с использованием нефтесорбирующих полимеров / Чжун Х. [и др.] // Материалы. 2018. Т. 11 (10). С. 2020 (на английском языке)*
9. *Пат. № 10053 на полезную модель. Модифицированный буровой раствор / Бесбаева Н.А., Бимбетова Г.Ж., Надиров К.С., Надирова Ж.К., Бондаренко В.П., Батыр Г.Ж.; заявитель и патентообладатель НАО «Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова (KZ.); опубл. 10.01.2025 (на русском языке)*
10. *Полимерный реагент для снижения поглощения бурового раствора при бурении нефтегазовых скважин / Бимбетова Г.Ж. [и др.] // Вестник КазУТБ. 2024. № 2 (23). С. 439–446 (на русском языке)*

11. Полимерсодержащий состав для снижения поглощения буровой промывочной жидкости / Бесбаева Н.А. [и др.] // Нефть и газ. 2025. № 6 (150). С. 26–38 (на русском языке)
12. Облегченный полимерный состав для снижения поглощения бурового раствора / Бимбетова Г.Ж. [и др.] // Вестник КазУТБ. 2025. № 2 (27). С. 481–492 (на казахском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Бесбаева Н.А., «Мұнайгаз ісі» кафедрасының Ph.D докторанты, М.О. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті КеАҚ (Шымкент қ., Қазақстан), besbaeva.nursulu@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-2130-1597>

Бимбетова Г.Ж., т. ғ. к., профессор, «Мұнайгаз ісі» кафедрасының профессоры, М.О. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті КеАҚ (Шымкент қ., Қазақстан), gulmirabimbetova@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1859-5551>

Эфендиев Г.М., т. ғ. д., профессор, Мұнай және газ институтының профессоры (Баку қ., Әзербайжан Республикасы), galib_2000@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0002-4875-5782>

Надиоров К.С., х. ғ. д., профессор, «Мұнайгаз ісі» кафедрасының профессоры, М.О. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті КеАҚ (Шымкент қ., Қазақстан); nadirovkazim@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3323-8245>

Information about the authors:

Besbaeva N.A., Ph.D student of the Department of «Oil and gas business», NAO South Kazakhstan University named after M.O. Auezov (Shymkent, Kazakhstan)

Bimbetova G.Zh., candidate of historical sciences, professor, Professor of the Department of «Oil and gas business», NAO South Kazakhstan University named after M.O. Auezov (Shymkent, Kazakhstan)

Efendiev G.M., doctor of technical sciences, professor, Professor of the Institute of oil and gas (Baku, Republic of Azerbaijan)

Nadirov K.S., doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of «Oil and gas business», NAO South Kazakhstan University named after M.O. Auezov (Shymkent, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Бесбаева Н.А., докторант Ph.D кафедры «Нефтегазовое дело», НАО Южно-Казахстанский университет им. М.О. Ауэзова (г. Шымкент, Казахстан)

Бимбетова Г.Ж., к. т. н., профессор, профессор кафедры «Нефтегазовое дело», НАО Южно-Казахстанский университет им. М.О. Ауэзова (г. Шымкент, Казахстан)

Эфендиев Г.М., д. т. н., профессор, профессор Института нефти и газа (г. Баку, Азербайджанская Республика)

Надиоров К.С., д. х. н., профессор, профессор кафедры «Нефтегазовое дело», НАО Южно-Казахстанский университет им. М.О. Ауэзова (г. Шымкент, Казахстан)

СПТО
КРАНЫ

WWW.CRANE-EXPO.RU

17-19 июня 2026

г. Москва, ВДНХ,
57 павильон



МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

СПТОКРАНЫ

СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ЭКСПО ДИЗАЙН
ВЫСТАВОЧНАЯ КОМПАНИЯ

Код МРНТИ 52.45.17

И.Ю. Мотовилов, *А.К. Абушахманов, Ш.А. Телков, М.Б. Барменшинова
 НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева»
 (г. Алматы, Казахстан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ОБОГАТИМОСТИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛТЫН-ШОКО

Аннотация. В статье исследован фракционный состав железной руды и дана оценка ее гравитационной обогатимости на начальной стадии технологических исследований. Анализ распределения железа по классам крупности и плотностным фракциям позволил предварительно определить степень раскрытия минералов и перспективность гравитационных методов. Рентгенофазовый анализ установил, что основной ценный компонент представлен слабомагнитным гематитом. Ситовый анализ показал равномерное распределение железа по крупности, при этом до 94% железа сосредоточено в классе -50+2,5 мм. Обработка кривых гравитационной обогатимости выявила легкое выделение тяжелых фракций с содержанием Fe свыше 55% при плотности разделения 3400–3500 кг/м³. Рекомендуется применение отсадки для промышленного обогащения. Работа имеет практическое значение при проектировании схем переработки железных руд Казахстана.

Ключевые слова: железо, минералогический анализ, гранулометрический состав, фракционный состав, кривые гравитационной обогатимости, индекс гравитационной обогатимости, отсадка.

Алтын-Шоко кен орнының құрамында темір бар кеннің гравитациялық байытылуын зерттеу

Аннотация. Мақалада темір кенінің фракциялық құрамы зерттеліп, технологиялық зерттеулердің бастапқы кезеңінде оның гравитациялық байытылуына баға берілді. Темірдің өлшемдік кластары мен тығыздық фракциялары бойынша таралуын талдау минералдардың ашылу дәрежесін және гравитациялық әдістердің перспективасын алдын ала анықтауға мүмкіндік берді. Рентгендік фазалық талдау негізгі құнды компонент әлсіз магнитті гематитпен ұсынылғанын анықтады. Елек талдауы темірдің мөлшері бойынша біркелкі таралуын көрсетті, темірдің 94%-ы -50+2,5 мм класында шоғырланған. Гравитациялық байыту кысықтарын өңдеу 3400–3500 кг/м³ бөлу тығыздығында Fe мөлшері 55%-дан асатын ауыр фракциялардың жеңіл окшаулануын анықтады. Өнеркәсіптік байыту үшін шөгінділерді қолдану ұсынылады. Қазақстанның темір кендерін қайта өңдеу схемаларын жобалау кезінде жұмыстың практикалық маңызы бар.

Түйінді сөздер: темір, минералогиялық талдау, гранулометриялық құрам, фракциялық құрам, гравитациялық байыту қисықтары, гравитациялық байыту индексі, тұндыру.

Study of gravitational concentration properties of iron-bearing ore at the Altyn-Shoko deposit

Abstract. The paper investigates the fractional composition of iron ore and evaluates its gravity concentrability during the initial phase of technological studies. Analyzing the distribution of iron across size and density fractions helped preliminarily determine the degree of mineral exposure and the potential of gravity methods. X-ray diffraction analysis revealed that the main valuable component is weakly magnetic hematite. The sieving analysis demonstrated a uniform distribution of iron by size, with up to 94% of iron concentrated in the -50+2.5 mm fraction. Processing the gravity concentrability curves showed easy separation of heavy fractions with a Fe content exceeding 55% at a separation density of 3400–3500 kg/m³. Jigging is recommended for industrial enrichment. The study holds practical significance for designing processing schemes for iron ores in Kazakhstan.

Key words: iron, mineralogical analysis, granulometric composition, fractional composition, gravity enrichment curves, gravity enrichment index, jigging.

Введение

Железные руды характеризуются сложным вещественным и фракционным составом, что в значительной степени определяет их технологическое поведение и выбор рациональных схем переработки [1]. На начальных стадиях технологических исследований особое значение приобретает анализ минералогического состава, распределения полезного компонента по классам крупности и фракциям плотности, позволяющий предварительно оценить степень раскрытия минералов и перспективность применения различных методов обогащения [2, 3].

Одним из ключевых инструментов такой оценки является изучение гравитационной обогатимости руд, основанное на фракционном анализе и построении кривых гравитационной обогатимости. Данные кривые позволяют прогнозировать возможные показатели извлечения и качества концентратов, а также обосновывать целесообразность применения гравитационных методов обогащения еще до проведения опытно-промышленных испытаний [4–6].

В ряде современных исследований показано, что гравитационные методы особенно эффективны при переработке окисленных, слабомагнитных и тонковкрапленных железных руд, а также в составе комбинированных технологических схем [7–9]. При этом именно результаты фракционного анализа и построения кривых гравитационной обогатимости служат основой для выбора типа гравитационного аппарата и параметров процесса [10, 11].

В связи с этим основной целью настоящей статьи является изучение фракционного состава железной руды и построение кривых гравитационной обогатимости для обоснования возможности и эффективности применения гравитационного обогащения на начальной стадии технологических исследований.

Материалы и методы

Объект исследования – технологическая проба железной руды месторождения Алтын-Шоко.

Текстурно-структурные особенности и минеральный состав пробы изучались на поляризационном микроскопе Leica DM2500 M и бинокулярной лупе МБС-1. Рентгенофазовые анализы проводили на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3.

Для определения химического состава исходной руды и продуктов обогащения использовали титриметрический, потенциометрический и атомно-абсорбционные методы анализов.

Гранулометрический состав изучался с использованием стандартного набора сит, мокрым рассевом.

Определение гравитационной обогатимости и технологических условий обогащения железной руды осуществлялось методом фракционного анализа. При изучении фракционного состава готовилась неорганическая тяжелая жидкость «М-45» плотностью 3000 кг/м³, которая растворялась водой для приготовления раствора необ-

ходимой плотности. Фракционный анализ выполнен на классах крупностью $-50+10$ мм, $-10+2,5$ мм и $-2,5+0,0$ мм путем расслоения проб на приготовленных растворах на фракции плотностью: более 4000 кг/м³, $4000-3500$ кг/м³, $3500-3000$ кг/м³, $3000-2900$ кг/м³, $2900-2800$ кг/м³, $2800-2700$ кг/м³ и менее 2700 кг/м³. Каждая навеска руды последовательно расслаивалась в каждой плотности тяжелой жидкости, начиная с самой высокой, с выделением всплывшей и потонувшей фракции. Полученные фракции промывают водой, высушивают, взвешивают, подвергают разделке, после чего направляют на химический анализ для определения содержания железа.

На основании данных о массе фракций и зольности рассчитывались фракционные составы, по которым строились кривые обогатимости Анри-Рейнгардта для каждого класса крупности. По кривым обогатимости каждого класса крупности находилась величина плотности разделения, соответствующая требуемому содержанию железа в тяжелой фракции и соответственно для суммарного класса крупности и рассчитывались ожидаемые показатели обогащения. По данным фракционного анализа и кривым обогатимости рассчитывался индекс гравитационной обогатимости для каждого класса крупности по формуле (1):

$$I = \frac{100 \cdot \gamma_L \cdot \gamma_T}{\rho_{50} \cdot (\gamma_L + \gamma_T) + 50(\gamma_L - \gamma_T)}, \quad (1)$$

где:

ρ_{50} – принятая плотность разделения, кг/м³;

γ_L и γ_m – выход в процентах смежных фракций с плотностью, меньшей и большей плотности разделения на 100 кг/м³.

Результаты и обсуждение

Исследуемая проба руды была подвергнута проборазделке, руда дробилась до крупности 50 мм, перемешивалась и отбирались представительные пробы на все виды проводимых исследований

Химический состав. Результаты химического и атомно-эмиссионного полуколичественного спектрального анализа свидетельствуют, что в руде основным промышленным металлом является железо – $35,08\%$. (табл. 1, 2). Содержание вредных примесей в виде серы и фосфора незначительны. Последнее относится и к цветным метал-

лам: меди, цинку, свинцу. Содержание легирующих металлов составляет: никеля $0,0025\%$, кобальта $0,001\%$, титана $0,01\%$ и ванадия $0,001\%$ (табл. 1, 2).

Минералогический состав. По составу и характеру распределения рудообразующих минералов железорудное месторождение можно отнести к окисной кремнисто-карбонатно-железородной формации.

Руда представлена тонкодисперсным гематитом в ассоциации с хлоритом, кварцем и кальцитом, с вкрапленностью метакристаллов магнетита, рис. 1.

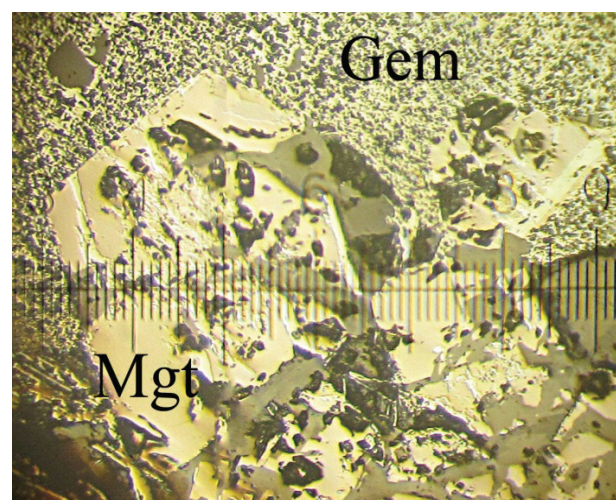


Рис. 1. Восстановление гематита, реликты которого наблюдаются в магнетите (белое), до магнетита, а затем частичное замещение маггемитом, ув. 160, 1 деление = 0,007 мм.

Сурет 1. Реликтері магнетитте (ақ) байқалатын гематиттің магнетитке дейін тотықсыздануы, содан кейін маггемитпен ішінара алмастыру, ұлғ. 160, 1 бөлім = 0,007 мм.

Figure 1. Reduction of hematite, relics of which are observed in magnetite (white), to magnetite, and then partial substitution with maghemite, sc. 160, 1 division = 0.007 mm.

Основные рудные минералы по данным рентгенофазового анализа представлены гематитом, магнетитом, сидеритом, маггемитом, нерудные – кварц, кальцит, хлорит.

Таблица 1

Кесте 1

Table 1

Химический состав исходной руды

Бастапқы кеннің химиялық құрамы

Chemical composition of the original ore

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Железо, <i>Fe</i>	35,08	Кальций, <i>Ca</i>	7,97
Марганец, <i>Mn</i>	1,41	Магний, <i>Mg</i>	0,3
Сера, <i>S_{общ}</i>	0,08	Свинец, <i>Pb</i>	0,016
Фосфор, <i>P</i>	0,015	Медь, <i>Cu</i>	0,008
Кремний, <i>SiO₂</i>	16,31	Цинк, <i>Zn</i>	0,022

Результаты спектрального анализа пробы исходной руды

Таблица 2

Бастапқы кен сынамаcының спектрлік талдауының нәтижелері

Кесте 2

Results of spectral analysis of the original ore sample

Table 2

Элемент	Концентрация, %	Элемент	Концентрация, %	Элемент	Концентрация, %	Элемент	Концентрация, %
<i>Li</i>	< 0,002	<i>Y</i>	< 0,001	<i>Pd</i>	< 0,0002	<i>Yb</i>	< 0,0001
<i>Os</i>	< 0,001	<i>Au</i>	< 0,0002	<i>Ir</i>	< 0,002	<i>Ge</i>	0,0002
<i>Ag</i>	0,00002	<i>Ba</i>	0,02	<i>V</i>	0,001	<i>Ti</i>	0,01
<i>Bi</i>	< 0,0002	<i>Be</i>	0,0001	<i>Rh</i>	< 0,0005	<i>Zr</i>	0,001
<i>Mn</i>	1	<i>Ga</i>	0,0005	<i>Ru</i>	< 0,001	<i>Sr</i>	< 0,01
<i>W</i>	< 0,002	<i>Al</i>	0,5	<i>Pt</i>	< 0,001	<i>Cd</i>	< 0,0005
<i>Cu</i>	0,003	<i>Si</i>	> 1,0	<i>As</i>	< 0,01	<i>In</i>	< 0,0005
<i>Zn</i>	0,01	<i>Fe</i>	>> 1,0	<i>Sn</i>	0,0002	<i>Ta</i>	< 0,0005
<i>Pb</i>	0,002	<i>K</i>	< 1,0	<i>Cr</i>	0,001	<i>Te</i>	< 0,003
<i>Co</i>	0,001	<i>Na</i>	0,1	<i>La</i>	0,002	<i>Hg</i>	< 0,003
<i>Ni</i>	0,0025	<i>Mg</i>	0,2	<i>Ce</i>	0,005	<i>Ta</i>	< 0,01
<i>Nb</i>	< 0,001	<i>Ca</i>	0,5	<i>Mo</i>	0,0007	<i>Re</i>	< 0,0003

Руда характеризуется чрезвычайно-мелкими, размером от 0,006 мм до тонкодисперсных зернами гематита, образующих сростания с кварцем и кальцитом. На фоне этой тонкодисперсной кремнисто-гематитовой массы наблюдается вкрапленность метакристаллов магнетита размером до 1,5 мм. Происходит восстановление гематита до магнетита, а затем частичное замещение магнетитом. В некоторых метазернах магнетита наблюдается переход магнетита в мартит, степень мартитизации неодинакова, нередко значительная часть магнетита полностью или частично замещена гематитом, либо тончайшие таблички гематита проникают в магнетит по трещинкам.

Из практики обогащения аналогичных железосодержащих руд, железосодержащие минералы извлекают гравитационными процессами.

Гранулометрический состав руды. Результаты ситового анализа с распределением железа по классам крупности приведены на рис. 2.

Руда характеризуется равномерным распределением классов крупности, что характерно рудам с категорией средней крепости.

Содержание железа в классах крупности от 50 до 0,63 мм примерно на одном уровне и варьируется от 34,5% до 40%. Извлечение железа пропорционально выходам.

Основное количество железа извлекается в суммарный класс крупностью -50+2,5 мм и составило 94%, что благоприятно для использования гравитационных процессов.

Технологические свойства руды. Определение гравитационной обогатимости и технологических условий обогащения осуществлялось фракционным анализом.

Фракционный анализ проводился на машинных классах крупности -50+10 мм и -0+2,5 мм предварительно отмытых от глинистых фракций. Выбор этих классов определяется тем, что в них сосредоточено ~ 94% железа.

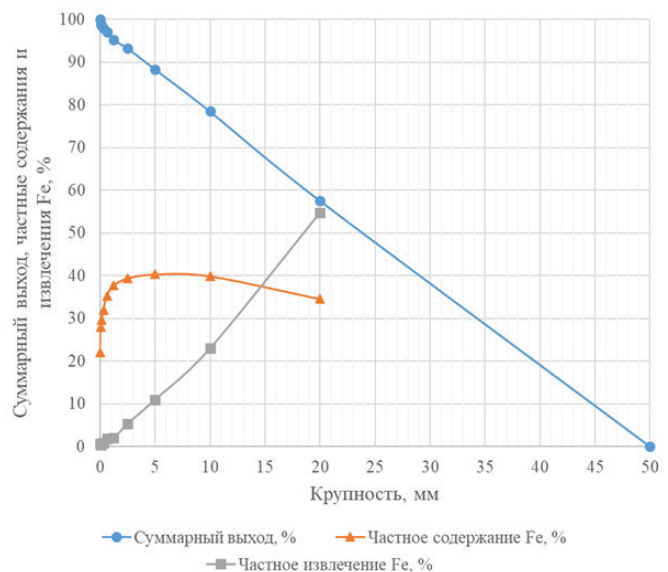


Рис. 2. Результаты ситовых анализов с распределением содержания и извлечения железа по классам крупности.

Сурет 2. Үлкендік кластары бойынша темірдің құрамы мен бөліп алынуының таралуымен елеуіштік талдауларының нәтижелері.

Figure 2. Results of sieve analyses with distribution of iron content and extraction by size classes.

На основании данных о массе фракций и содержании элементов составлялись таблицы фракционного состава, по которым строились кривые обогатимости для каждого класса крупности. По этим кривым находилась плотность разделения, соответствующая требуемому содержанию металлов в тяжелой фракции.

Кривые обогатимости, построенные для машинных классов, приведены на рис. 3.

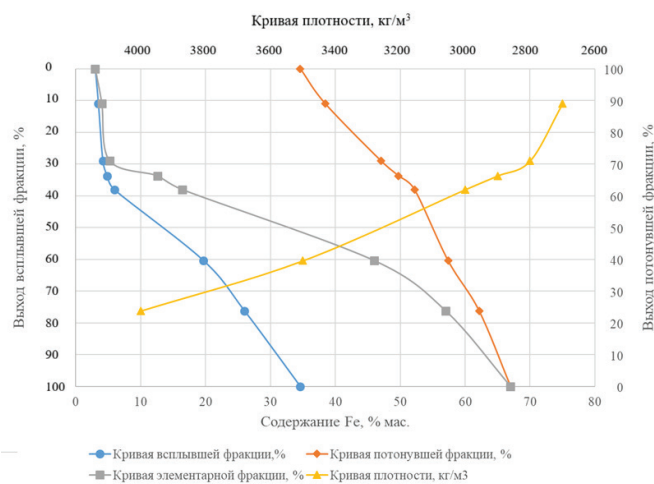


Рис. 3. Кривые гравитационной обогатимости машинного класса -50+10 мм.

Сурет 3. -50+10 мм машина класының гравитациялық байыту қисықтары.

Figure 3. Gravity enrichment curves for machine class -50+10 mm.

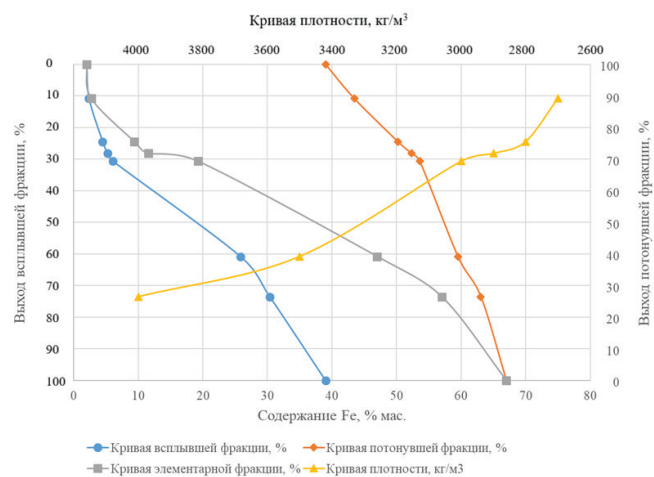


Рис. 4. Кривые гравитационной обогатимости машинного класса -10+2,5 мм.

Сурет 4. -10+2,5 мм машина класының гравитациялық байыту қисықтары.

Figure 4. Gravity enrichment curves for machine class -10+2,5 mm.

Вид кривой плотности разделения в интервале плотностей 3000–3400 кг/м³ имеет крутой угол наклона, что свидетельствует о наличии большого количества промежуточных фракций с содержанием железа от 45 до 50%. Вид кривой плот-

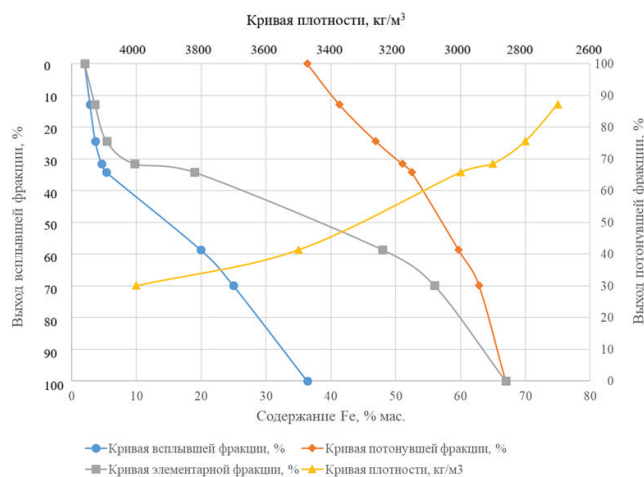


Рис. 5. Кривые гравитационной обогатимости машинного класса -2,5+0,0 мм.

Сурет 5. -2,5+0,0 мм машина класының гравитациялық байыту қисықтары.

Figure 5. Gravity enrichment curves for machine class -2,5+0,0 mm.

ности разделения в интервале плотностей 3400–4000 кг/м³ имеет относительно некрутой угол наклона, это говорит о наличии небольшого количества промежуточных фракций с содержанием железа от 52 до 55%, что свидетельствует о легкой гравитационной обогатимости руды по выделению тяжелой фракции с содержанием железа более 60%. Гравитационная обогатимость руды по выделению легкой фракции с содержанием железа не более 10%, легкая.

В таблице 3 приведен теоретический баланс металлов при разделении машинных классов крупности по плотности 4000 и 3500 кг/м³.

Результаты разделения машинных классов крупности в идеальных условиях показали возможность получения тяжелых концентратных фракций из всех суммарных классов крупности при суммировании машинных классов -50+0,5 мм, получаемые показатели составили:

- по плотности 4000 кг/м³ – общий выход тяжелой фракции 23,78% с содержанием железа 62,88% при извлечении железа 42,25%;

- по плотности 3500 кг/м³ – общий выход тяжелой фракции 38,54% с содержанием железа 57,78% при извлечении железа 63,47%.

В таблице 4 приведены результаты расчета индекса гравитационной обогатимости для плотностей разделения 3800, 3600 и 3400 кг/м³.

Абсолютные величины индексов гравитационной обогатимости для всех классов крупности показывают, что гравитационная обогатимость для всех исследованных классов крупности легкая, таблица 5.

Полученные показатели индексов гравитационной обогатимости позволяют отнести машинные классы крупностью -50+10 мм, -10+2,5 мм и -2,5+0,5 мм к категории легкообогатимых и для их обогащения рекомендуется использовать процесс отсадки, т. к. получение плотности разделения 3500 кг/м³ и более возможно достичь в промышленности только при обогащении в отсадочной машине [11, 12].

Таблица 3
Теоретический баланс металлов, полученный по результатам фракционного анализа
Кесте 3
Фракциялық талдау нәтижелері бойынша алынған металдардың теориялық балансы
Table 3
Theoretical metal balance obtained from fractional analysis results

Наименование продукта	Выход, %	Содержание Fe, %	Извлечение Fe, %	Выход, %	Содержание Fe, %	Извлечение Fe, %
	Плотность разделения 4000 кг/м ³			Плотность разделения 3500 кг/м ³		
Т. фр. -50+10	18,66	62,15	33,05	31,07	57,36	50,79
Т. фр. -10+2,5	3,91	63,05	7,03	5,80	59,50	9,84
Т. фр. -2,5+0,5	1,21	62,88	2,17	1,67	59,72	2,84
Суммарно т. фр. -50+2,5 мм	23,78	62,34	42,25	38,54	57,78	63,47
Л. фр. -50+10	59,83	26,01	44,35	47,42	19,69	26,61
Л. фр. 10+2,5	10,87	30,38	9,41	8,98	25,79	6,60
Л. фр. -2,5+0,5	2,82	25,00	2,01	2,36	19,85	1,34
Суммарно л. фр. -50+2,5 мм	73,52	26,62	55,77	58,76	20,63	34,55
Отсев -0,5+0	2,70	25,79	1,98	2,70	25,79	1,98
Руда	100,00	35,09	100,00	100	35,09	100,00

*примечание: т. фр. – тяжелая фракция плотностью более плотности разделения; л. фр. – легкая фракция плотностью менее плотности разделения

Таблица 4
Индексы гравитационной обогатимости для всех исследованных классов крупности
Кесте 4
Барлық зерттелетін өлішем кластары үшін ауырлық гравитациялық байыту индекстері
Table 4
Gravity enrichment indices for all studied size classes

Плотность разделения, кг/м ³	Индекс гравитационной обогатимости		
	Классы крупности, мм		
	-50+10	-10+2,5	-2,5+0,5
3800	0,066	0,053	0,027
3600	0,084	0,084	0,083
3400	0,089	0,119	0,118

Таблица 5
Шкала для оценки обогатимости полезных ископаемых гравитационными методами
Кесте 5
Гравитациялық әдістермен пайдалы қазбалардың байытылуын бағалау шкаласы
Table 5
Scale for assessing the enrichability of minerals by gravity methods

Индекс обогатимости	Обогатимость	Рекомендуемые гравитационные процессы
менее 0,10	легкая	Отсадка, тяжелые суспензии
0,10–0,20	средняя	Отсадка, тяжелые суспензии
0,20–0,30	трудная	Тяжелые суспензии
Более 0,30	очень трудная	Тяжелые суспензии

Заключение

На основании результатов исследований гравитационной обогатимости железосодержащей руды месторождения Алтын-Шоко установлено следующее.

1. Установлено, что основным полезным компонентом исследуемой руды является железо, что определяет технологическую направленность процессов ее переработки.

2. По данным рентгенофазового анализа выявлено, что железо в руде представлено преимущественно гематитом, относящимся к слабомагнитным минералам, а также в подчиненных количествах магнетитом, сидеритом и маггемитом. Породообразующие минералы представлены кварцем, кальцитом и хлоритом. Указанный минералогический состав обуславливает целесообразность применения гравитационных методов обогащения при переработке данной руды.

3. Результаты ситового анализа показали равномерное распределение железа по классам крупности. Основная доля железа (94%) сосредоточена в суммарном классе крупности $-50+2,5$ мм, что соответствует оптимально-

му диапазону крупности для реализации гравитационных процессов обогащения.

4. На основании анализа кривых гравитационной обогатимости машинных классов установлено, что обогатимость исследуемой руды по признаку выделения тяжелых фракций с массовой долей железа более 55% относится к категории легкой. Требуемая плотность разделения при этом составляет 3400–3500 кг/м³.

5. Показано, что достижение плотности разделения 3400–3500 кг/м³ и выше в промышленных условиях возможно преимущественно при применении процесса отсадки. В связи с этим отсадка может быть рекомендована в качестве базового гравитационного метода обогащения исследуемой железосодержащей руды.

Благодарность

Авторы выражают признательность за помощь коллегам и людям, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование обогащения низкосортной железной руды методами гравитационной и магнитной сепарации / Акбари Х. [и др.] // Российский журнал цветных металлов. 2018. Т. 59. С. 353–363 (на английском языке)
2. Выбор гравитационных сепараторов для обогащения оловянной руды месторождения Ульджин / Ангади С.И. [и др.] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. Т. 38. С. 54–61 (на английском языке)
3. Дас А., Саркар Б. Современные методы гравитационного обогащения мелких частиц: обзор // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2018. Т. 39. С. 1–36 (на английском языке)
4. Агломанди А., Эргун Л., Гюльчан Э. Обогащение окисленных руд с использованием тяжелосредних циклонов: имитационное исследование // Physicochemical Problems in Mineral Processing. 2017. Т. 53 (1). С. 379–393 (на английском языке)
5. Извлечение ценных видов сырья с использованием отсадочных машин KOMAG: лабораторные исследования и промышленное внедрение / Коволь Д. [и др.] // Minerals. 2025. Т. 15 (9). С. 943 (на английском языке)
6. Рат Р.К., Сингх Р. Гравитационное обогащение железных руд: Джамшедпур: Издательство NML, 2007. С. 74–88 (на английском языке)
7. Сингх Р., Мехротра С.П. Обогащение железных руд для черной металлургии // Steel Tech. 2007. № 1. С. 17–32 (на английском языке)
8. Амброс В.М. Гравитационное обогащение в области городского рециклинга: обзор // Recycling. 2023. Т. 8. С. 85 (на английском языке)
9. Производство высококачественных крупных вторичных заполнителей с использованием двухстадийного отсадочного процесса / Гивентер В.Л. [и др.] // Minerals. 2022. Т. 12. С. 532 (на английском языке)
10. Изучение гравитационно-флотационного обогащения свинцово-цинковой руды месторождения Шалкия / Телков Ш.А. [и др.] // Обогащение руд. 2021. № 6. С. 9–15 (на русском языке)
11. Оптимизация параметров отсадочного процесса для обогащения мелких классов железной руды (на примере Tata Steel) / Шукла В. [и др.] // Минеральная инженерия. 2019. Т. 2. С. 165–170 (на английском языке)
12. Майбург Х.А., Нортъе А. Эксплуатация и производительность отсадочной фабрики Сишен // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Т. 114. С. 569–574 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Төмен сапалы темір кенін гравитациялық және магниттік бөлу әдістерімен байыту зерттеуі / Акбари Х. [және т. б.] // Түсті металдар жөніндегі Ресей журналы. 2018. Т. 59. Б. 353–363 (ағылшын тілінде)

2. Ульджин кен орнындағы қалайы кенін байыту үшін гравитациялық сепараторларды таңдау / Ангади С.И. [және т. б.] // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2017. Т. 38. Б. 54–61 (ағылшын тілінде)
3. Das A., Sarkar B. Ұсақ бөлшектерді гравитациялық байытудың заманауи әдістері: шолу // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Т. 39. Б. 1–36 (ағылшын тілінде)
4. Ағлманди А., Эргун Л., Гюльчан Э. Ауыр орталы циклондарды қолдана отырып тотыққан кендерді байыту: модельдеу зерттеуі // *Physicochemical Problems in Mineral Processing*. 2017. Т. 53 (1). Б. 379–393 (ағылшын тілінде)
5. KOMAG отсадкалық байыту машиналарын қолдану арқылы бағалы шикізатты алу: зертханалық зерттеулер және өнеркәсіптік енгізу / Коволь Д. [және т. б.] // *Minerals*. 2025. Т. 15 (9). Б. 943 (ағылшын тілінде)
6. Rath P.K., Singh R. Темір кендерін гравитациялық байыту: Джамшедпур: NML баспасы, 2007. Б. 74–88 (ағылшын тілінде)
7. Сингх Р., Мехротра С.П. Қара металлургия үшін темір кендерін байыту // *Steel Tech*. 2007. № 1. Б. 17–32 (ағылшын тілінде)
8. Амброс В.М. Қалалық кен өндіру саласындағы гравитациялық байыту: шолу // *Recycling*. 2023. Т. 8. Б. 85 (ағылшын тілінде)
9. Екі сатылы отсадкалық процесс арқылы жоғары сапалы ірі қайта өңделген толтырғыштарды өндіру / Гшвенгер В.Л. [және т. б.] // *Minerals*. 2022. Т. 12. Б. 532 (ағылшын тілінде)
10. Шалқия кен орнының қорғасын-мырыш кендерін гравитациялық-флотациялық байытуды зерттеу / Телков Ш.А. [және т. б.] // *Кендерді байыту*. 2021. № 6. Б. 9–15 (орыс тілінде)
11. Темір кенінің ұсақ фракцияларын байыту үшін отсадкалық процестің параметрлерін оңтайландыру (Tata Steel мысалында) / Шукла В. [және т. б.] // *Минералды инженерия*. 2019. Т. 2. Б. 165–170 (ағылшын тілінде)
12. Майбург Х. А., Нортъе А. Сишен отсадкалық фабрикасының жұмысы мен өнімділігі // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. Т. 114. Б. 569–574 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. A Beneficiation Study on a Low Grade Iron Ore by Gravity and Magnetic Separation / Akbari H. [et al.] // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2018. V. 59. 353–363 pp. (in English)
2. Selection of Gravity Separators for the Beneficiation of the Uljin Tin Ore / Angadi S.I. [et al.] // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2017. V. 38. 54–61 pp. (in English)
3. Das A., Sarkar B. Advanced Gravity Concentration of Fine Particles: A Review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. V. 39. 1–36 pp. (in English)
4. Aghlmandi A., Ergun L., Gulcan E. Beneficiation of oxide ores using dense medium cyclones: A simulation study // *Physicochemical Problems in Mineral Processing*. 2017. V. 53. No. 1. 379–393 pp. (in English)
5. Recovery of Valuable Raw Materials Using KOMAG Jig Beneficiation: Laboratory Studies and Industrial Implementations / Kowol D. [et al.] // *Minerals*. 2025. V. 15. No. 9. 943 p. (in English)
6. Rath R.K., Singh R. Gravity concentration of iron ores. *Advanced Gravity Separation: Jamshedpur: NML Publication*, 2007. 74–88 pp. (in English)
7. Singh R., Mehrotra S.P. (2007). Beneficiation of iron ores for iron and steelmaking. *Steel Tech*. V. 1. 17–32 pp. (in English)
8. Ambros W.M. Gravity Concentration in Urban Mining Applications – A Review // *Recycling*. 2023. V. 8. 85 p. (in English)
9. Production of high-quality coarse recycled aggregates through a two-stage jigging process / Gschwenter V.L. [et al.] // *Minerals*. 2022. V. 12. 532 p. (in English)
10. Izuchenie gravitatsionno-flotatsionnogo obogashcheniya svintsovo-tsinkovoy rudy mestorozhdeniya Shalkiya [Study of gravity-flotation enrichment of lead-zinc ore from the Shalkiya deposit], Telkov Sh.A. [et al.], *Obogashchenie Rud [Ore Dressing]*. 2021. No. 6. 9–15 pp. (in Russian)
11. Optimization of Jigging Process Parameters to Beneficiate Iron Ore Fines – A Case Study of Tatasteel / Shukla V. [et al.] // *Mineral Engineering*. 2019. V. 2. 165–170 pp. (in English)
12. Myburgh H.A., Nortje A. Operation and performance of the Sishen jig plant // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. V. 114. 569–574 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Мотовилов И.Ю., доктор Ph.D, ассоциированный профессор, профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), i.motovilov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-0716-402X>

Абушахманов А.К., магистрант 2-го курса кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), a.abushakhmanov@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0007-3912-9732>

Телков Ш.А., к. т. н., доцент, профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), s.telkov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6641-4802>

Барменишинова М.Б., к. т. н., ассоциированный профессор, заведующая кафедрой «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), m.barmenshinova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-0534-2387>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мотовилов И.Ю., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының профессоры, қауымдастырылған профессор, Ph.D докторы (Алматы қ., Қазақстан)

Абушахманов А.К., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының 2-ші курс магистранты (Алматы қ., Қазақстан)

Телков Ш.А., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының профессоры, т. ғ. к. (Алматы қ., Қазақстан)

Барменишинова М.Б., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының меңгерушісі, т. ғ. к., қауымдастырылған профессор (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Motovilov I.Yu., Ph.D, Associate Professor, Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev» (Almaty, Kazakhstan)

Abushakhmanov A.K., 2nd year Master's student of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev» (Almaty, Kazakhstan)

Telkov Sh.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev» (Almaty, Kazakhstan)

Barmenshinova M.B., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Metallurgy and mineral processing», NJSC «K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University» (Almaty, Kazakhstan)

Организатор:

Техническая поддержка:

о́кружной выставочный центр

* ЮГОРСКИЕ КОНТРАКТЫ *

EXPOTECHMEMBER
OF THE RUSSIAN
UNION OF EXHIBITIONS
AND FAIRSЧЛЕН
РОССИЙСКОГО
СОЮЗА ВЫСТАВОК
И ЯРМАРОК31 МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА**СУРГУТ.
НЕФТЬ И ГАЗ
2026**31th INTERNATIONAL
SPECIALIZED
TECHNOLOGICAL EXHIBITION**SURGUT.
OIL & GAS
2026****23.09 - 25.09**+7 (3462) 94-34-54
sales@yugcont.ru
sngexpo.ruг. Сургут,
СОК «Энергетик»
ул. Энергетиков, 47

Код МРНТИ 52.01.83:52.45.32

*А. Доберсек, А. Кирнарский

«ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, Германия)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОДНОФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Аннотация. Цель исследования – теоретическое обоснование принципа однофункциональности на примере гравитационного разделения минерального сырья по двум разделительным признакам и промышленное подтверждение его состоятельности при обогащении руд цветных и черных металлов, золота, угля, нерудного минерального сырья с рекомендациями по улучшению технологического режима. Результатом исследований явилось разработка технологических решений, где созданы условия для максимального проявления каждого сепарационного процесса в отдельности. Наиболее эффективный технологический процесс – тяжелосреднее обогащение, который работает по одному разделительному признаку – плотности частиц. При обогащении каменного угля средневероятное отклонение E_{pm} достигает 24–30 кг/м³, а при обогащении оловянной руды $E_{pm} = 30–60$ кг/м³, что на порядок выше по сравнению с гидравлической отсадкой, концентрацией на столах и винтовых сепараторах.

Ключевые слова: минеральное сырьё, обогащение, эффективность, селективность, однофункциональность, тяжелосреднее обогащение.

Минералдық ресурстарды байыту процестеріндегі технологиялық бір функциялықтың теориясы мен практикасы

Аңдатпа. Зерттеудің максаты-минералды шикізатты екі бөлу белгісі бойынша гравитациялық бөлу мысалында бір функционалдылық принципін теориялық негіздеу және технологиялық режимді жақсарту бойынша ұсыныстармен түсті және Қара металдар, алтын, көмір, кенді емес минералды шикізат кендерін байыту кезінде оның өміршеңдігін өнеркәсіптік растау. Зерттеудің нәтижесі технологиялық шешімдерді әзірлеу болды, онда әрбір бөлу процесінің жеке көрінісін барынша арттыру үшін жағдайлар жасалған. Ең тиімді технологиялық процесс – бір бөлу белгісі – бөлшектердің тығыздығы бойынша жұмыс істейтін ауыр байыту. Көмірді байыту кезінде E_{pm} орташа ықтимал ауытқуы 24–30 кг/м³ жетеді, ал қалайы рудасын байыту кезінде $E_{pm} = 30–60$ кг/м³ жетеді, бұл гидравликалық шөгінділермен, үстелдер мен бұрандалы сепараторлардағы концентрациямен салыстырғанда әлдеқайда жоғары.

Түйінді сөздер: минералды шикізат, байыту, тиімділік, селективтілік, бір функционалдылық, ауыр байыту.

Theory and practice of technological single-functionality in the processes of mineral enrichment

Abstract. The aim of the study is to provide a theoretical justification for the principle of single-functionality using the example of gravitational separation of mineral raw materials according to two separation criteria and to confirm its industrial viability in the enrichment of non-ferrous and ferrous metals, gold, coal, and non-metallic mineral raw materials, with recommendations for improving the technological regime. The result of the research was the development of technological solutions that create conditions for the maximum manifestation of each separation process separately. The most effective technological process is heavy-medium enrichment, which works on one separation criterion: particle density. When enriching hard coal, the average deviation E_{pm} reaches 24–30 kg/m³, and when enriching tin ore, $E_{pm} = 30–60$ kg/m³, which is an order of magnitude higher than hydraulic separation, concentration on tables and screw separators.

Key words: mineral raw materials, enrichment, efficiency, selectivity, single-functionality, heavy-medium enrichment.

Введение

При обогащении полезных ископаемых некоторые аппараты и процессы позволяют осуществлять разделение компонентов по двум-трем признакам или совмещать несколько технологических операций. Например, в условиях гравитационного обогащения имеет место разделение зерен по крупности и плотности. Многофункциональность обеспечивает определенную чистоту продуктов, но затрудняет достижение максимальной эффективности данного технологического передела. При совмещении нескольких операций в одном аппарате, например, дезинтеграции и оттирки, ухудшается технологический режим, потому что невозможно добиться высоких показателей при совмещении несовместимого.

Согласно принципу однофункциональности каждый процесс или аппарат, реагент или разделительная среда имеет только одно технологическое назначение и максимальная эффективность достигается при его однопараметричном исполнении при исключении влияния других разделительных признаков, факторов и процессов [1, 2, 9, 10]. Отклонение от заданных значений по причине совмещения разделительных функций сопряжено с ухудшением общих показателей обогащения минерального сырья. Для повышения селективности сепарационных процессов и улучшения чувствительности разделительных аппаратов необходимо разделение по крупности и плотности зерен осуществлять последовательно в несколько стадий, при использовании узких машинных классов. В условиях гравитационных схем

обогащения, например с применением гидроциклонов, в первой стадии производится разделение по крупности, во второй пески должны обогащаться по плотности с использованием винтовых сепараторов, концентрационных столов, отсадочных машин, тяжелосредних гидроциклонов, гравитационных концентраторов. Предпочтительнее работать на классифицированном питании основных сепарационных процессов, что позволяет улучшить селективность разделения и, как следствие, повысить качество концентрата и извлечение ценных компонентов в концентрат.

Методы исследований

При исследовании данной проблемы применяли следующие методы: теоретическое обоснование принципа однофункциональности и его практическое подтверждение как технологического инструмента повышения эффективности сепарационных процессов при обогащении руд, каменного угля и нерудного минерального сырья.

1. Теоретическое обоснование принципа однофункциональности

Приняв классическое допущение, что при обогащении минерального сырья случайные физические величины подчиняются стандартному непрерывному и равномерному распределению на некотором вероятностном поле, запишем выражение плотности вероятности нормального распределения для одного разделительного признака в виде

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right), \quad (1)$$

где x – параметр разделения;

σ – среднеквадратичное отклонение разделительного параметра;

μ – математическое ожидание.

В практике обогащения полезных ископаемых, полагая, что ошибки при сепарации подчиняются нормальному закону распределения случайной величины, широко используется описание сепарационных характеристик с помощью интеграла вероятности Гаусса:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (2)$$

Значение параметра x представляет собой отклонение средней плотности фракции $\bar{\rho}$ от плотности разделения ρ_p в долях среднеквадратичного отклонения.

С точностью 10^{-3} интеграл Гаусса предпочтительнее вычислять по более простым формулам:

$$\checkmark \text{ при } x > 0 \quad F(x) = 1 - \frac{1}{2} \exp(-2^{1/4} x^{4/3});$$

$$\checkmark \text{ при } x < 0 \quad F(x) = \frac{1}{2} \exp(-2^{1/4} |x|^{4/3}).$$

Используемый нормальный закон распределения случайной величины – двухпараметрический. Параметры этого распределения: математическое ожидание (здесь граничное значение разделительного признака) и среднее квадратичное отклонение или среднее вероятное отклонение. Если эти параметры известны, то и описание сепарационной характеристики будет вполне определенным.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований процессов гравитационного обогащения минерального сырья свидетельствуют о связи точности сепарации с крупностью обогащаемого материала. Учет этой зависимости позволяет обоснованно выбирать технологические схемы обогащения, в частности, пределы крупности машинных классов и их количество.

Мерой точности сепарации при описании сепарационных характеристик гравитационных процессов интегралом вероятности Гаусса является среднее вероятное отклонение разделительного признака E_{pm} , пропорциональное среднему квадратичному. Рассмотрим опорный гравитационный процесс – гидроклассификация.

В процессе гидроклассификации имеет место разделение зерен минерального сырья по двум основным разделительным признакам: крупности и плотности. Показателем равновесного состояния системы, например, при гравитационном обогащении по крупности (плотности) минеральных частиц есть граничная крупность (плотность) разделения, т. е. крупность (плотность) бесконечно узкого класса (фракции), равномерно распределенного в продуктах разделения. Следовательно, асимметрия функции нормального распределения при наличии двух разделительных признаков указывает на снижение точности сепарации и переход системы в новое равновесное состояние при большей погрешности,

т. е. при большем засорении продуктов посторонними фракциями.

При разделении по одному признаку избирательность процесса, как и чувствительность разделительного устройства повышаются, так как в этих условиях упрощается удаление бесполезного компонента и удержание полезного в составе концентрата, что графически показано на рис. 1 в виде двух графиков сепарационной характеристики соответственно при работе сепаратора одним и двумя разделительными параметрами (рис. 1, а и б). В первом случае (рис. 1а) меньше взаимного засорения продуктов разделения и, как следствие, выше как селективность сепарации, так и чувствительность сепаратора.

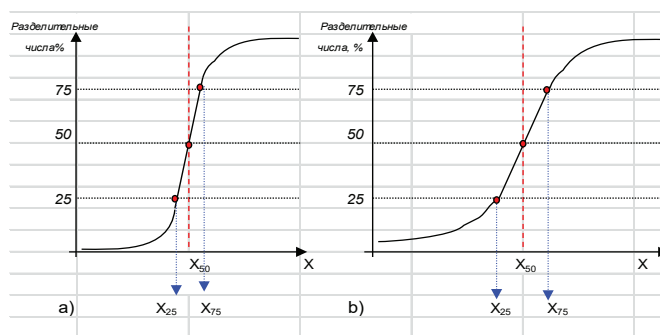


Рис. 1. Сепарационная характеристика при действии одного (1 а) и двух (1 б) разделительных признаков.

Сурет 1. Бір (1 а) және екі (1 б) бөлу белгілерінің әрекетіндегі бөлу сипаттамасы.

Figure 1. Separation characteristics under the action of one (1 а) and two (1 б) separating features.

Такое утверждение согласуется с законами термодинамики, согласно которым всякая система стремится к равновесию, при этом по одному параметру систему легче привести в равновесие, нежели по нескольким параметрам одновременно. Привести систему в равновесие одновременно по всем разделительным признакам затруднительно, точно так же как невозможно осуществить цикл теплового двигателя, одновременно изменяя давление, температуру и объем рабочего тела. Из рис. 1 видно, что средневероятное отклонение, принятое в обогащении полезных ископаемых в качестве критерия эффективности разделения и определяемое по формуле вида

$$E_{pm} = \frac{X_{75} - X_{25}}{2}, \text{ мм} \quad (3)$$

во втором случае, при действии двух разделительных признаков, выше, чем в первом, когда имеет место разделение строго по одному параметру – плотности частиц. Стремление совместить эти процессы сопряжены с нарушением необходимого режима разделения и, как следствие, повышением взаимного засорения продуктов разделения, что выражается в увеличении средневероятного отклонения (E_{pm}), а графически имеет место снижение крутизны сепарационной характеристики.

Физический смысл такого явления состоит в том, что легче привести в равновесие систему с одним, нежели с двумя и более разделительными признаками, а технологи-

ческий смысл сводится к тому, что однопараметричность системы повышает селективность сепарационного процесса [2].

2. Практическая оценка теоретического обоснования

2.1. Обогащение рудного минерального сырья

Для объективной оценки изложенных теоретических положений, касающихся гравитационного разделения, обратимся к работе гидроциклонов и опытным данным распределения железа и кремнезема по классам крупности на второй стадии гидроклассификации в замкнутом цикле с шаровой мельницей. Опробование продуктов гидроциклонирования осуществлялось в условиях действующего производства Ингулецкого ГОКа (таблицы 1 и 2). Как видим, селективность работы гидроциклона по плотности выше, чем его селективность по крупности зерен, технологическим следствием чего есть попадание в пески значительного количества раскрытых зерен магнетита, которые в мельнице переизмельчаются, при этом уменьшается их магнитная восприимчивость и повышается коэрцитивная сила и, как следствие, возрастают потери железа с хвостами и ухудшается качество концентрата. Из таблицы 1 видно, что в песках гидроциклона в классах 0,044–0,071 мм и 0,0–0,044 мм содержание железа общего составляет соответственно 64,8 и 66,6%. При выходе указанных продуктивных классов 8,24 и 17,58% (всего 25,82%) получается, что в условиях второй стадии шарового измельчения и гидроклассификации циркулирует 80 т/час кондиционного магнетитового концентрата. В то же время, в составе слива в расчетном классе -0,044 мм содержание кремнезема достигает 30,18% против 5,45% в песках гидроциклона при содержании железа в продуктивной фракции на уровне 58,7%.

Данные таблиц 1 и 2 свидетельствуют о том, что в гидроциклоне частицы разделяются по крупности и плотно-

сти. Эффективность гидроклассификации по граничной крупности – 0,044 мм составляет 48,0%, что свидетельствует в пользу технологической состоятельности ГЦУ как классификатора, но здесь не принимается во внимание действие второго разделительного признака – плотности зерен. Проявление этого разделительного признака очевидно по извлечению железа и кремнезема в слив гидроциклона, который является выходным продуктом на этом переделе.

При обогащении золота, например, на Кировоградской, Бурибаевской, Сибайской, Жолымбетской обогатительных фабриках, степень концентрации золота в циркулирующем продукте замкнутого цикла измельчения составляет 2–8. Превышение степени концентрации по сравнению с железорудными предприятиями обусловлено более высокой плотностью извлекаемого металла.

Опробование схем измельчения показало, что степень концентрации в песках гидроциклонов по отношению к исходному продукту для различных медных и медно-цинковых руд находится в широких пределах и зависит преимущественно от количества и крупности раскрытых частиц ценного компонента [3, 4]. Результаты гравитационного обогащения (грохочение + тяжелосредняя сепарация) руды Варваринского месторождения свидетельствуют о том, что из песков гидроциклонов замкнутого цикла измельчения есть возможность выделения гравитационного концентрата с массовой долей золота более 140 г/т.

Другая технологическая возможность реализована на турецкой ЗИФ «MASTRA». Исследования продуктов разделения в гидроциклонах, работающих в замкнутом цикле с шаровой мельницей (циркулирующая нагрузка – 400%), показали, что тонкие частицы золота преимущественно концентрируются в песках гидроциклонов, при этом степень концентрации по золоту в песках гидроциклонов составляет 8,74 (таблица 3).

Таблица 1

Результаты гидроциклонирования руды (по железу)

Кесте 1

Кенді гидроциклондау нәтижелері (темір бойынша)

Table 1

Results of ore hydrocycloning (by iron)

Класс крупности, мм	Питание ГЦУ			Пески ГЦУ				Слив ГЦУ			
	$Y_{исх}$	$Fe_{общ}$, %	\mathcal{E} , %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	$Fe_{общ}$, %	\mathcal{E} , %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	$Fe_{общ}$, %	\mathcal{E} , %
1,00–2,00	0,07	31,0	0,04	0,07	0,1	31,0	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
0,560–1,00	1,17	30,60	0,68	1,17	1,6	30,6	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00
0,280–0,560	7,98	32,13	4,87	7,95	10,90	32,1	6,72	0,03	0,10	40,00	0,07
0,140–0,280	9,34	36,65	6,50	9,26	12,70	36,7	8,95	0,08	0,30	30,60	0,17
0,071–0,140	30,85	49,33	28,90	28,66	39,30	50,9	38,43	2,19	8,10	28,80	4,29
0,044–0,071	10,68	58,71	11,90	8,24	11,30	64,8	14,07	2,44	9,00	38,10	6,31
0,000–0,044	39,91	62,18	47,11	17,58	24,10	66,6	30,83	22,33	82,50	58,70	89,15
Итого	100,00	52,67	100,0	72,93	100,0	52,1	100,0	27,07	100,0	54,32	100,0

Примечание: $Y_{исх}$, $Y_{пр}$ – выход классов к исходному и к продуктам разделения, %;

Fe – содержание железа общего, %; \mathcal{E} – извлечение железа в продукты разделения, %

Таблица 2

Результаты гидроциклонирования руды (по кремнезему)

Кесте 2

Кенді гидроциклондау нәтижелері (кремнезем бойынша)

Table 2

Results of ore hydrocycloning (based on silica)

Класс крупности, мм	Питание ГЦУ			Пески ГЦУ				Слив ГЦУ			
	$Y_{исх}$	SiO_2 , %	\mathcal{E} , %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	SiO_2 , %	\mathcal{E} , %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	SiO_2 , %	\mathcal{E} , %
1,00–2,00	0,07	50,0	0,24	0,07	0,1	50,0	0,348	0,00	0,00	0,00	0,00
0,560–1,00	1,17	45,30	3,41	1,17	1,6	45,3	5,05	0,00	0,00	0,00	0,00
0,280–0,560	7,98	45,31	23,32	7,95	10,90	45,3	34,38	0,03	0,10	47,57	0,26
0,140–0,280	9,34	38,78	23,38	9,26	12,70	38,7	34,22	0,08	0,30	47,78	0,77
0,071–0,140	30,85	7,28	14,51	28,66	39,30	4,03	11,03	2,19	8,10	49,83	21,76
0,044–0,071	10,68	14,20	9,79	8,24	11,30	7,40	5,82	2,44	9,00	37,21	18,05
0,000–0,044	39,91	9,84	25,35	17,58	24,10	5,45	9,15	22,33	82,50	13,30	59,16
Итого	100,00	15,49	100,0	72,93	100,0	52,1	48,31	27,07	100,0	18,55	100,00

Таблица 3

Результаты ситового анализа песков гидроциклонов

Кесте 3

Гидроциклон құмдарын електен талдау нәтижелері

Table 3

Results of sieve analysis of hydrocyclone sands

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание золота, г/т	Содержание серебра, г/т
0,3–0,71	12,70	9,27	3,40
0,71–0,18	35,41	12,08	3,70
0,18–0,106	25,40	16,47	4,80
0,106–0,075	10,86	82,34	19,50
0,075–0,38	7,22	247,60	13,60
0,00–0,038	8,41	247,80	48,50
Итого	100,00	56,79	10,14

Гравитационное дообогащение 1/3 части песков гидроциклонов по плотности в центробежном концентраторе «Кнелсон» позволило выделить гравикоцентрат (таблица 2), сократить циркуляционную нагрузку и сократить расход цианида на стадии выщелачивания руды (таблица 4).

Эффективность гравитационного обогащения полиметаллической оловянной руды различными методами приведена в таблице 5 [5].

Из таблицы 6 видно, что эффективность тяжелосреднего обогащения как в барабанных сепараторах, так и в тяжелосредних циклонах, на порядок выше разделения полиметаллической руды на винтовых сепараторах, концентрационных столах, в отсадочных машинах и центробежных концентраторах Кнелсон, что объясняется действием одного разделительного признака – плотности зерен – в условиях тяжелосредней сепарации.

Применение принципа однофункциональности при гравитационном обогащении минералов россыпных место-

рождений позволяет улучшить качественно-количественные показатели разделения и повысить рентабельность переработки руды. Так, при разделении ильменита и сидерита на одном их месторождений Иршанского рудного поля предварительная классификация черного концентрата на узкие классы с последующим их обогащением на концентрационном столе позволило получить ильменитовый концентрат с содержанием ильменита 89,4% при сквозном извлечении 79,11%, в то время как при работе на неклассифицированном питании получен концентрат с содержанием ильменита 77,6% при сквозном его извлечении 31,25%. Если из общего объема материала выделить класс крупности -1+0,14 мм, то ильменита в этом классе будет содержаться 85,06%, а сидерита – 52,6%. Если в дальнейшем произвести разделение по плотности, то в тяжелый продукт будут попадать зерна ильменита всех классов крупности, а также зерна сидерита определенного класса крупности. Этот класс крупности будет определяться в со-

Таблица 4

Результаты обогащения песков гидроциклонов в концентраторе «Кнелсон»

Кесте 4

«Кнелсон» концентраторындағы гидроциклондардың құмдарын байыту нәтижелері

Table 4

Results of hydrocyclone sand enrichment in the Knelson concentrator

Давление воды, бар	Продукты	Выход, %	Содержание металлов, г/т		Извлечение металлов, %	
			<i>Au</i>	<i>Ag</i>	<i>Au</i>	<i>Ag</i>
0,55*	Концентрат	0,99	4339,0	701,0	75,88	59,10
	Хвосты	99,01	13,79	4,85	24,12	40,90
	Исходный	100,00	56,80	11,77	100,00	100,00
0,69	Концентрат	0,96	4304,0	711,0	72,83	58,74
	Хвосты	99,04	15,56	4,84	27,17	41,26
	Исходный	100,00	56,80	11,63	100,00	100,00
0,83	Концентрат	1,00	3705,0	704,0	65,24	56,16
	Хвосты	99,00	19,94	5,55	34,76	43,84
	Исходный	100,00	56,80	12,54	100,00	100,00

Примечание: здесь приведено давление воды, подаваемой в зону разделения через боковые щелевые отверстия концентратора

Таблица 5

Эффективность гравитационного обогащения полиметаллической оловянной руды

Кесте 5

Полиметалл қалайы кенін гравитациялық байытудың тиімділігі

Table 5

Effectiveness of gravity concentration of polymetallic tin ore

Обогатительный аппарат	Средневероятное отклонение, E_{pm} , кг/м ³
Мокрая винтовая сепарация	390
Гидравлическая отсадка	375
Концентрация на столах	495
Цетробежная концентрация в сепараторе Кнелсон	985
Тяжелосредная сепарация в барабане	60
Тяжелосредный циклон	30

ответствии закону равнопадаемости частиц. Так как рудные пески представлены узким гидравлическим классом, то отношение диаметров зерен разных минералов можно считать соответствующим коэффициенту равнопадаемости. Исходя из значений коэффициентов равнопадаемости, следует, что зерна сидерита крупностью от 1,39×0,14 до 1 мм имеют большую вероятность извлечения в тяжелый продукт вместе с ильменитом. Зерна сидерита меньшей крупности имеют больше шансов остаться в легком продукте. Учитывая изложенное, можно утверждать, что использование последовательного чередования сепарации по геометрическим размерам (грохочение) и по плотности (гравитационная сепарация) приведет к повышению селективности сепарации в целом и к повышению чистоты

продуктов, получаемых при обогащении руд россыпных месторождений).

2.2. Обогащение каменного угля

Наиболее высокие качественно-количественные показатели достигаются при обогащении узких классов крупности рядового угля. С увеличением количества машинных классов повышается эффективность обогащения гравитационными и флотационными методами, что подтверждает принцип однофункциональности разделительных процессов. Сейчас для обогащения углей различной крупности применяются следующие технологические процессы: машинный класс +13 мм – тяжелосредная сепарация; класс 3-13 мм – гидравлическая отсадка; машинные классы 1-3

мм и 0,5-1 мм – мокрая винтовая сепарация; и тонкий шлам 0-0,5 мм – флотация. Схемы обогащения угля пятью машинными классами оправдали себя как технологически, так и экономически. На ЦОФ «Октябрьская», «Добропольская» и «Краснолиманская» расчетный годовой экономический эффект в зависимости от производственной мощности ОФ составляет от 100 до 300 тыс. долл. США [6].

Из всех вышеперечисленных операций уникальной является тяжелосредняя сепарация [7, 8], так как в этом процессе наиболее полно реализована однопараметричность технологической системы. Разделение полезных ископаемых в тяжелых жидкостях служит разительным примером однофункционального процесса, в котором сепарация осуществляется по контрастности плотности полезного и бесполезного компонентов. Наличие тонкодисперсных шламов ухудшает сепарационные характеристики тяжелосредних сепараторов, но это вовсе не означает, что крупность перерабатываемого материала является разделительным

признаком. Высокодисперсные шламы приводят к изменению свойств разделительной среды: повышают ее вязкость и плотность. Таким образом, обогащение по одному разделительному признаку – плотности разделяемых частиц – позволяет добиться максимальной эффективности гравитационного обогащения. Приводим данные тяжелосреднего обогащения на примере каменного угля, где эта технология играет определяющую роль (см. таблицу 6).

Из этого вытекает вывод, что взаимозасорение продуктов разделения достигает минимального уровня при разделении по одному признаку. В подтверждение сказанному приведем данные сравнительных промышленных испытаний различных аппаратов в условиях углеобогащительных фабрик (таблица 7).

Ни один процесс гравитационного обогащения типа отсадки или гидроциклонирования, где разделение имеет место по двум признакам (плотности и крупности), не может обеспечить более высоких технологических пока-

Таблица 6

Результаты обогащения угля в тяжелосреднем сепараторе при плотности суспензии 1600 кг/м³ и подаче 60 т/ч суспензии на 1 м ширины ванны

Кесте 6

Суспензия тығыздығы 1600 кг/м³ және ваннаның ені 1 м-ге 60 т/сағ суспензия беру жылдамдығы кезінде ауыр-орташа сепаратордағы көмірді байыту нәтижелері

Table 6

Results of coal enrichment in a heavy-medium separator at a suspension density of 1600 kg/m³ and a suspension feed rate of 60 t/h per 1 m of bath width

Крупность угля, мм	Выход класса, %	Плотность разделения, кг/м ³	Средневероятное отклонение, E_{pm} , кг/м ³
50-200	35,43	1650	24
25-50	21,88	1620	27
13-25	17,36	1660	30
6-13	21,63	1680	40
3-6	2,41	1800	110
1-3	0,66	1980	235

Таблица 7

Сравнительные показатели гравитационного обогащения каменного угля в различных технологических аппаратах

Кесте 7

Әр түрлі технологиялық аппараттардағы көмірді гравитациялық байытудың салыстырмалы көрсеткіштері

Table 7

Comparative indicators of gravitational enrichment of coal in various technological devices

Крупность, мм	Тяжелосредний ГЦ		Отсадочная машина		Гидроциклон (ГЦ)	
	δ_p кг/м ³	E_{pm} кг/м ³	δ_p кг/м ³	E_{pm} кг/м ³	δ_p кг/м ³	E_{pm} кг/м ³
13-25	1485	40	1540	65		
6-13	1480	40	1540	65		
3-6	1490	40	1590	80		
1-3	1520	60	1660	90	1420	130
0,5-1	1600	90	1930	215	1600	225
0,25-0,5	1660	160	2140	375	1940	390
0,125-0,25	1590	185				
0,0-0,125	1420	220	2330	440	2350	510

зателей, чем при тяжелосреднем обогащении, что свидетельствует в пользу принципа однофункциональности. В этом случае уместно обогащать каменный уголь трудной и очень трудной категории обогатимости с высоким содержанием породы при минимальном взаимозасорении продуктов разделения в широком диапазоне крупности от 60 мм до 0,2 мм в условиях автоматического гибкого регулирования плотности разделения от 1300 до 2200 кг/м³.

Анализ технологических схем вновь строящихся углеобогатительных фабрик, а также материалы XVI и XVII конгрессов по углеобогащению [8] свидетельствуют, что для обогащения мелкого машинного класса угля повсеместно используются только тяжелосредние гидроциклоны с магнетитовой суспензией. Целесообразность их применения вместо гидравлических отсадочных машин подтверждается значениями E_{pm} для этого оборудования: при низкой плотности разделения (1600 кг/м³) разность в значениях E_{pm} для отсадочной машины Батак и тяжелосреднего гидроциклона для крупности 35–100 мм составляет 54–16 = 38 кг/м³, для крупности 18–5 мм – 60–22 = 38 кг/м³, для крупности 5–18 мм – 66–22 = 44 кг/м³, для крупности 0,5–5 мм – 96–40 = 56 кг/м³ [8].

2.3. Обогащение нерудного минерального сырья

При обогащении кварцевых песков в скруббер – бутаре технологически несовместимы процессы дезинтеграции и оттирки. При подаче кварцевого песка при влажности 6% и последующим добавлении оборотной воды содержание твердого в рабочей зоне колеблется от 24,6 до 32,7%, что обеспечивает эффективное разрыхление, распускание и, как следствие, дезинтегрирование в воде глины, цементирующей и обволакивающей кварцевые зерна. Частоту вращения барабана рекомендуется принимать равной 30–40% критической. Если на этом технологическом переделе преследуется цель дополнительно произвести оттирку

песка, то рассмотренный технологический режим требуют существенных изменений. Эффективная оттирка материала протекает при содержании твердого более 70%, что требует сокращения расхода оборотной воды до 0,4 м³/т. Допуская содержание твердого на уровне 50%, мы вынуждены снизить расход воды до 1,0 м³/т, что отрицательно влияет на процесс дезинтеграции. Что касается конструктивных параметров, то оттирка требует увеличения частоты вращения барабана, итогом чего есть уменьшение времени пребывания материала в рабочей зоне аппарата, что неблагоприятно как для оттирки, так и для процесса дезинтеграции. Таким образом, при подготовке нерудного минерального сырья к обогащению каждому процессу соответствует свой аппарат: дезинтеграции – высокочастотный скруббер при разбавленном питании, оттирке – оттирочная машина при содержании твердого более 70%, грохочению – грохот при содержании твердого в питании менее 40%.

Выводы

1. Совмещение нескольких разделительных признаков в одном технологическом процессе приводит к снижению эффективности обогащения в целом ввиду того, что сложно привести в равновесие систему одновременно по нескольким параметрам.

2. Разработка высокоэффективной технологии и/или аппарата для обогащения минерального сырья сводится к нахождению оптимального сочетания разделительных процессов, учитывая то, что каждому из них соответствует определенное место в иерархической структуре обогатительных переделов в рамках причинно-следственных сепарационных закономерностей.

3. Технологическое совершенство сепарационного процесса проявляется не в совмещении с другими процессами, а в максимальном исключении их взаимовлияния.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доберсек А., Кирнарский А.С. Технологическое совершенство процессов обогащения железной руды // Горный журнал Казахстана. 2025. № 3. С. 41–49 (на русском языке)
2. Пилов П.И., Кирнарский А.С. Технологическая однопараметричность как инструмент повышения селективности сепарационных процессов // Обогащение руд. 2020. № 2. С. 21–28 (на русском языке)
3. Технология извлечения золота из замкнутого цикла измельчения // Материалы Межд. научн.-практ. конф. «Современные проблемы и инновационные технологии решения вопросов переработки техногенных месторождений Алмалыкского горно-металлургического комбината», Ташкент. 2019. С. 65–67 (на русском языке)
4. Кирнарский А.С. Опыт эксплуатации гидроциклонных установок в замкнутых циклах измельчения медно-цинковых руд: сб. «Збагачення корисних копалин». 2016. № 62 (103). С. 31–38 (на русском языке)
5. Выбор гравитационных сепараторов для обогащения оловянной руды в Ульдджине / Angadi S. [и др.] // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2017. № 38 (1). С. 54–61 (на английском языке)
6. Полулях А.Д. Особенности современных технологий углеобогащения: сб. «Збагачення корисних копалин». 2017. № 65 (106). С. 38–44 (на русском языке)
7. Сравнение технологий обогащения. Методы оценки эффективности разделения углей в гравитационных аппаратах с тяжелой средой / Удовицкий В.И. [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 4. С. 49–65 (на русском языке)
8. Обогащение угля в магнетитовой суспензии / А.Д. Полулях, А.С. Бучатский, С.А. Выродов, Д.А. Полулях. Днепропетровск: НГУ. 2016. 512 с. (на русском языке)
9. Доберсек А., Кирнарский А.С. Перспективы снижения энергоемкости обогащения железной руды // Горный журнал Казахстана. 2024. № 6. С. 44–48 (на русском языке)

10. Блехман Л.И. Закономерности осреднения нелинейных зависимостей от колеблющихся параметров – приложение к задачам обогащения руд // Обогащение руд. 2023. № 5. С. 22–27 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Доберсек А., Кирнарский А.С. Темір рудасын байыту процестерінің технологиялық жетілдірілуі // Қазақстанның тау-кен журналы. 2025. № 3. Б. 41–49 (орыс тілінде)
2. Пилов П.И., Кирнарский А.С. Технологиялық бір параметрлік бөлу процестерінің селективтілігін арттыру құралы ретінде // Кендерді байыту. 2020. № 2. Б. 21–28 (орыс тілінде)
3. Айналмалы ұсақтау циклінен алтын алу технологиясы // «Алмалық тау-кен металлургия комбинатының техногендік кен орындарын қайта өңдеу мәселелерін шешудің заманауи мәселелері мен инновациялық технологиялары» Халықаралық ғылым.-практ. конф. материалдары, Ташкент. 2019. Б. 65–67 (орыс тілінде)
4. Кирнарский А.С. Мыс-мырыш кендерін ұнтақтаудың тұйық циклдарындағы гидроциклонды қондырғыларды пайдалану тәжірибесі: «Збагачення корисных копалин» жинағы. 2016. № 62 (103). Б. 31–38 (орыс тілінде)
5. Кенді байыту үшін гравитациялық сепараторларды таңдау / Angadi S. [және т. б.] // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2017. № 38 (1). Б. 54–61 (ағылшын тілінде)
6. Полулах А.Д. Көмірді байытудың заманауи технологияларының ерекшеліктері: «Збагачення корисних копалин» жинағы. 2017. № 65 (106). Б. 38–44 (орыс тілінде)
7. Байыту технологияларын салыстыру. Ауыр ортасы бар гравитациялық аппараттардағы көмірді бөлудің тиімділігін бағалау әдістері / Удицкий В.И. [және т. б.] // Кузбасс мемлекеттік техникалық университетінің хабаршысы. 2021. № 4. Б. 49–65 (орыс тілінде)
8. Магнетит суспензиясындағы көмірді байыту / А.Д. Полулах, А.С. Бучатский, С.А. Вродов, Д.А. Полулах. Днепрпетровск: НМУ. 2016. 512 б. (орыс тілінде)
9. Доберсек А., Кирнарский А.С. Темір рудасын байытудың энергия сыйымдылығын төмендету перспективалары // Қазақстанның тау-кен журналы. 2024. № 6. Б. 44–48 (орыс тілінде)
10. Блехман Л.И. Тербелмелі параметрлерге сызықтық емес тәуелділіктерді орташалау заңдылықтары – кендерді байыту міндеттеріне қосымша // Кендерді байыту. 2023. № 5. Б. 22–27 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Dobersek A., Kirnarsky A.S. Tekhnologicheskoe sovershenstvo protsessov obogashcheniya zheleznoi rudy [Technological perfection of iron ore enrichment processes], Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. 2025. No. 3. 41–49 pp. (in Russian)
2. Pilov P.I., Kirnarsky A.S. Tekhnologicheskaya odnoparametrichnost' kak instrument povysheniya selektivnosti separatsionnykh protsessov [Technological single-parameterity as a tool for increasing the selectivity of separation processes], Obogashchenie rud [Ore Enrichment]. 2020. No. 2. 21–28 pp. (in Russian)
3. Tekhnologiya izvlecheniya zolota iz zamknutogo tsikla izmel'cheniya [Technology for extracting gold from a closed grinding cycle], Materialy Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Sovremennye problemy i innovatsionnye tekhnologii resheniya voprosov pererabotki tekhnogennykh mestorozhdenii Almalyskogo gorno-metallurgicheskogo kombinata» [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Current Problems and Innovative Technologies for Solving Issues of Processing Technogenic Deposits at the Almalysk Mining and Metallurgical Combine»]. Tashkent. 2019. 65–67 pp. (in Russian)
4. Kirnarsky A.S. Opyt ekspluatatsii gidrotsiklonnykh ustanovok v zamknutykh tsiklakh izmel'cheniya medno-tsinkovykh rud: sb. «Zbagachennya korisnykh kopalin» [Experience in operating hydrocyclone units in closed-cycle grinding of copper-zinc ores: Collection «Enrichment of mineral resources»]. 2016. No. 62 (103). 31–38 pp. (in Russian)
5. Selection of gravity separators for beneficiation of the Uljin tin ore / Angadi S. [et al.] // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2017. No. 38 (1). 54–61 pp. (in English)
6. Polulyakh A.D. Osobennosti sovremennykh tekhnologii ugleobogashcheniya: sb. «Zbagachennya korisnykh kopalin» [Features of modern coal beneficiation technologies: Collection «Zbagachenie korysnykh kopalin»]. 2017. No. 65 (106). 38–44 pp. (in Russian)
7. Sravnenie tekhnologii obogashcheniya. Metody otsenki effektivnosti razdeleniya uglei v gravitatsionnykh apparatakh s tyazheloi sredoi [Comparison of enrichment technologies. Methods for evaluating the efficiency of coal separation in gravity devices with a heavy medium], Udovitsky V.I. [et al.], Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitet [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. 2021. No. 4. 49–65 pp. (in Russian)
8. Obogashchenie uglya v magnetitovoi suspenzii [Coal enrichment in magnetite suspension], A.D. Polulyakh, A.S. Buchatsky, S.A. Vyrodov, D.A. Polulyakh. Dnipropetrovsk: NGU. 2016. 512 p. (in Russian)

9. *Dobersek A., Kirnarsky A.S. Perspektivy snizheniya energoemkosti obogashcheniya zheleznoi rud [Prospects for reducing the energy intensity of iron ore enrichment], Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. 2024. No. 6. 44–48 pp. (in Russian)*
10. *Blekhman L.I. Zakonomernosti osredneniya nelineinykh zavisimostei ot koleblyushchikhsya parametrov – prilozhenie k zadacham obogashcheniya rud [Patterns of averaging nonlinear dependencies on fluctuating parameters – application to ore enrichment problems], Obogashchenie rud [Ore Enrichment]. 2023. No. 5. 22–27 pp. (in Russian)*

Сведения об авторах:

Доберсек А., канд. техн. наук, Президент компании «ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, Германия), albin.dobersek@ed-mg.de; <https://orcid.org/0009-0008-7386-0796>

Кирнарский А.С., доктор техн. наук, научный руководитель проектов по обогащению полезных ископаемых, компания «ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, Германия), anatoliy.kirnarsky@ed-mg.de; <https://orcid.org/0009-0003-5703-4383>

Авторлар туралы мәліметтер:

Доберсек А., Ph.D, ENGINEERING DOBERSEK GmbH, ENGINEERING DOBERSEK GmbH президенті (Менхенгладбах қ., Германия)

Кирнарский А.С., техн. ғылымдарының докторы, ENGINEERING DOBERSEK GmbH, Минералды қайта өңдеу жобаларының ғылыми жетекшісі (Менхенгладбах қ., Германия)

Information about the authors:

Dobersek A., Ph.D, President of ENGINEERING DOBERSEK GmbH, ENGINEERING DOBERSEK GmbH (Monchengladbach, Germany)

Kirnarsky A.S., Doctor of Technical Sciences, Scientific Director of Mineral Processing Projects, ENGINEERING DOBERSEK GmbH (Monchengladbach, Germany)



Machine
Building
and Metal Working

Организатор:

МВК «Атакент-Экспо»
Республика Казахстан, 050057, г. Алматы,
ул. Тимирязева, 42
Тел.: +7 (727) 275 09 11, Моб.: +7 701 477 84 18
E-mail: venera@atakentexpo.kz
www.machinery-expo.kz

Официальная поддержка:

Министерство индустрии и
инфраструктурного
развития Республики Казахстан

XVII

МЕЖДУНАРОДНАЯ
ПРОМЫШЛЕННАЯ
ВЫСТАВКА

2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

machinery-expo.kz



Казахстан, Алматы
ВЦ «Атакент»

12 - 14 МАЯ

Код МРНТИ 52.13.33

Н.Д. Спатаев, *Г.С. Саттарова, С.С. Кудрявцев, Н.А. Медеубаев

НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

ОЦЕНКА СЕЗОННОГО ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГИ НА ВЕНТИЛЯЦИЮ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК РУДНИКОВ

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по оценке влияния естественной тяги на проветривание подземных горных выработок рудника Ушкатын-3. На основе анализа сезонных температурных изменений и аэродинамического моделирования вентиляционной сети разработаны рекомендации по оптимизации режимов проветривания. Установлено, что зимой естественная тяга может вызывать рециркуляцию струи и обледенение выработок, а летом – снижать производительность вентиляторов главного проветривания. Предложены методы снижения ее негативного влияния за счет применения вентиляторов местного проветривания и рациональных схем вентиляции. Результаты могут быть использованы на горнодобывающих предприятиях с комбинированной открыто-подземной разработкой для повышения безопасности и устойчивости проветривания.

Ключевые слова: естественная тяга, проветривание подземных горных выработок, аэродинамическое сопротивление, вентиляционная сеть, сезонные режимы, рудник Ушкатын-3.

Тау-кен шахталарындағы жер асты кен жұмыстарын желдетуге табиғи тартылыстың маусымдық әсерін бағалау

Андатпа. Мақалада Ушкатын-3 кенішінің жерасты тау-кен қазбаларын желдетуге табиғи тартылыс күшінің әсерін бағалау нәтижелері ұсынылған. Маусымдық температуралық өзгерістерді талдау және желдету желісін аэродинамикалық модельдеу негізінде желдету режимдерін оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірленді. Қыс мезгілінде табиғи тартылыс ауа ағынының рециркуляциясын және қазбалар қабырғаларының мұздануын туындататыны, ал жазда – бас желдеткіштердің өнімділігін төмендететіні анықталды. Оның теріс әсерін азайту үшін жергілікті желдеткіштерді қолдану және тиімді желдету сұлбаларын таңдау ұсынылды. Зерттеу нәтижелері кен орнын ашық-жерасты аралас әдіспен игеретін тау-кен кәсіпорындарында жұмыстардың қауіпсіздігін және желдетудің тұрақтылығын арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: табиғи тартылыс, жер асты кен жұмыстарының желдетілуі, аэродинамикалық кедергі, желдету жүйесі, маусымдық режимдер, Ушкатын-3 шахтасы.

Assessment of seasonal influence of natural draft on ventilation of underground mine workings

Abstract. The article presents the results of a study on the impact of natural draft on the ventilation of underground workings at the Ushkatyn-3 mine. Based on an analysis of seasonal temperature variations and aerodynamic modeling of the mine's ventilation network, recommendations were developed to optimize ventilation regimes. It was found that in winter, natural draft can cause airflow recirculation and ice formation on the walls of the workings, while in summer, it can reduce the performance of main ventilation fans. Methods to mitigate the negative effects of natural draft, such as the use of local ventilation fans and the selection of efficient ventilation schemes, are proposed. The results can be applied at mining enterprises using a combined open-pit and underground mining system to improve work safety and the stability of ventilation.

Key words: natural draught, ventilation of underground mine workings, aerodynamic resistance, ventilation network, seasonal operating modes, Ushkatyn-3 mine.

Введение

Рудники, функционирующие на территории Карагандинской области, характеризуются совокупностью сложных технологических и природно-геологических факторов, определяющих повышенный уровень промышленной опасности и обуславливающих их отнесение к категории опасных производственных объектов. В данном контексте особый интерес представляет рудник Ушкатын-3, расположенный в Жана-Аркинском районе, где разработка месторождения осуществляется с применением комбинированной открыто-подземной системы добычи железомарганцевых и барит-свинцовых руд. Климат района резко континентальный с экстремальными сезонными колебаниями температур (от $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой до $+43\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом), что создает специфические условия для организации проветривания подземных выработок. Выход ряда горных выработок непосредственно на борта карьера усложняет вентиляцию рудника из-за влияния естественной тяги воздуха, которая в реальных условиях не всегда учитывается при проектировании вентиляционных систем.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасных условий труда работников в подземных выработках, где количественные показатели воздушной среды напрямую зависят от эффективности проветривания рудника. Естественная тяга, возникающая из-за разности плотностей воздушных масс различной температуры, может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на работу вентиляционных систем

рудника в зависимости от сезона и способа проветривания.

Вопрос устойчивости проветривания шахт и рудников в условиях воздействия естественной тяги воздуха является ключевым для обеспечения промышленной безопасности подземных работ. Современные исследования подтверждают, что естественная тяга формируется вследствие разности плотности воздуха внутри выработок и атмосферы и способна как усиливать работу вентиляторных установок, так и создавать дестабилизирующие рециркуляционные потоки. В работе [1] показано, что в условиях Крайнего Севера зимой естественная тяга повышает эффективность главной вентиляции, тогда как летом может способствовать формированию обратных потоков и накоплению вредных газов. Аналогичные сезонные закономерности отмечены на руднике Гадир (Азербайджан), где зимой тяга способствует усилению вентиляции и снижению энергопотребления [2]. На примере канадских рудников установлено, что естественная тяга может формировать управляемые тепловые потоки для энергоэффективной подготовки воздуха [3]. Исследования угольных шахт Чехии и Украины подтверждают критическую важность учета естественной тяги для устойчивости главной вентиляции в схожих климатических условиях [4].

Современные исследования показывают, что на величину естественной тяги существенно влияют метеорологические и геофизические факторы, включая скорость ветра и барометрическое давление. Предложенные корректиру-

ющие коэффициенты повышают точность аэродинамических расчетов [5]. Метод регрессионного анализа зависимости давления вентилятора от производительности позволяет определять доверительные интервалы значений тяги, однако не учитывает влияние локальных перемычек и сезонных температурных колебаний [6].

Численные исследования показывают, что нарушение устойчивости проветривания может быть связано с образованием вихревых структур и переходом конвективных потоков в неустойчивое состояние [7]. Оптимизация работы нескольких вентиляторов и разграничение зон их влияния повышают устойчивость вентиляции [8]. Математические модели естественной вентиляции подтверждают наличие различных режимов воздухообмена, зависящих от температуры наружного воздуха, при этом устойчивое проветривание наблюдается только в ограниченном температурном диапазоне [9]. Возникновение обратной тяги может вызывать дополнительную нагрузку на вентилятор и повышать риск аварийных ситуаций [10].

Несмотря на значительный объем исследований, остается недостаточно изученным влияние сезонных и климатических факторов на устойчивость аэродинамических параметров проветривания при комбинированной системе разработки. Существующие методические подходы ограничены при анализе вентиляционных сетей сложной пространственной конфигурации с локальными перемычками, распределенными сопротивлениями и взаимодействием естественной и искусственной тяги. В связи с этим актуальна разработка интегрированных методов прогнозирования и управления естественной тягой, направленных на повышение промышленной безопасности и энергоэффективности проветривания рудников с учетом сезонной изменчивости климатических и технологических условий.

Обобщение результатов научных исследований показывает, что естественная тяга должна рассматриваться не как фоновый параметр вентиляционного процесса, а как динамический аэродинамический фактор, способный существенно трансформировать структуру и распределение воздушных потоков в шахтных вентиляционных системах. Современные научные исследования направлены на разработку высокоточных методов прогнозирования ее поведения, прежде всего в нестационарных режимах функционирования вентиляционных систем (пусковые режимы, остановка, реверсирование вентиляторных установок), а также при эксплуатации месторождений в условиях выраженной климатической контрастности. Учет естественной тяги является необходимым условием обеспечения промышленной безопасности персонала и повышения энергоэффективности функционирования горнодобывающих предприятий.

Цель исследования – повышение безопасности ведения горных работ и эффективности проветривания подземных выработок рудника Ушкатын-3 за счет учета влияния естественной тяги и разработки адаптивных вентиляционных режимов, учитывающих сезонные изменения климатических условий.

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей влияния естественной тяги воздуха с учетом сезонных колебаний на устойчивость проветривания подземных выработок рудника, а также в разработке

практических мер по снижению ее негативного воздействия с помощью вентиляторов местного проветривания и оптимизации расположения вентиляционных перемычек.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных рекомендаций на действующих горнодобывающих предприятиях, имеющих аналогичные горно-геологические и климатические условия, что позволит обеспечить безопасность ведения горных работ за счет повышения устойчивости проветривания рудника, предотвращения рециркуляции воздушных потоков и поддержания оптимальных параметров воздушной среды в руднике.

Методы исследований

Методы исследования включали проведение натурных депрессионных съемок с целью получения исходных данных о состоянии вентиляционной сети действующего рудника в различные сезоны года. На их основе анализа распределения воздуха была построена и верифицирована детальная аэродинамическая модель сети, представленная в виде графа. Согласно планам горных работ построена расчетная схема, включающая 156 ветвей и 120 узлов.

Воздушно-депрессионная съемка проводилась с использованием комплекса контрольно-измерительного оборудования: крыльчатого анемометра Testo 417 и чашечного анемометра МС-13 для определения скорости движения воздушного потока, дифференциального микроанометра ММН-240 для измерения депрессии (перепада давления) между пунктами вентиляционной сети, а также термогигрометра Testo 610 для регистрации температуры и относительной влажности рудничного воздуха. В каждой точке проводилась серия повторных измерений с последующим усреднением результатов. Погрешность измерения скорости воздушного потока не превышала $\pm 0,1-0,2$ м/с, перепада давления – $\pm 1-2$ Па, температуры – $\pm 0,5$ °С, относительной влажности – $\pm 2,5\%$. Полученные данные использовались для определения аэродинамических параметров вентиляционных выработок.

По результатам депрессионных съемок для каждой ветви сети было рассчитано аэродинамическое сопротивление и сформирован массив данных аэродинамических сопротивлений, значения которых варьируются от 0,0001 до $10 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$ в зависимости от типа крепи, размеров и состояния горных выработок. Подготовка данных об источниках тяги включала анализ аэродинамических характеристик вентиляторов главного проветривания (AL-17-2500), которые были аппроксимированы аналитическими зависимостями для различных режимов работы. Расчет депрессии естественной тяги проводился с использованием изотермического метода с учетом сезонных температурных градиентов. Выполнено моделирование режимов проветривания рудника в межсезонный период, зимний период при температуре наружного воздуха до -15 °С и экстремальный период при температуре наружного воздуха до -40 °С. Достоверность результатов обеспечена сопоставлением расчетных данных с результатами натурных депрессионных съемок, выполненных в различные сезоны года с соблюдением действующих методик и нормативных требований к расчетам вентиляционных параметров.

Результаты исследований

Выполненные замеры и анализ данных показал, что скорость воздуха в горных выработках изменяется в пределах от 0,01 м/с до 1,2 м/с и в большинстве случаев соответствует турбулентному режиму движения воздушных потоков, обеспечивающему эффективное перемешивание воздушных масс.

На рис. 1 представлена графическая зависимость изменения количества воздуха, поступающего в подземную систему выработок рудника при изменении температурных параметров внешней воздушной среды.

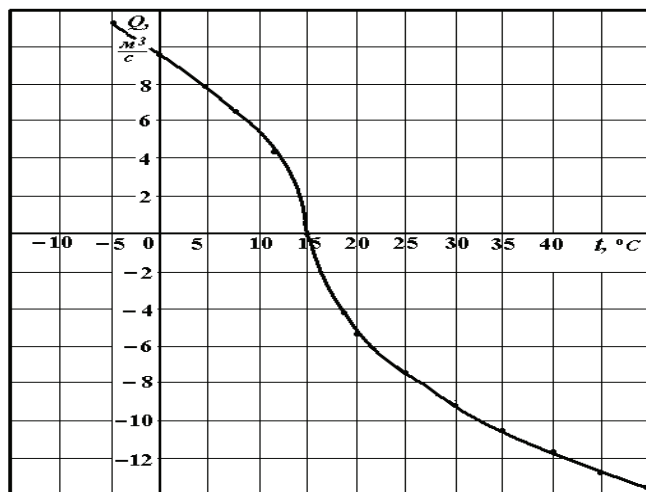


Рис. 1. Изменение расхода воздуха в зависимости от температуры внешней среды.

Сурет 1. Сыртқы орта температурасына байланысты ауа шығынының өзгеруі.

Figure 1. Change in air flow rate depending on ambient air temperature.

На рис. 1 показана динамика изменения количества воздуха, поступающего в вентиляционную систему рудника под влиянием депрессии естественной тяги. Если $t_{\text{nocm}} = t_{\text{ucx}}$, то эффект действия естественной тяги будет нулевым. В случае, если $t_{\text{nocm}} < t_{\text{ucx}}$, депрессия естественной тяги действует положительно и способствует увеличению объема воздуха, поступающего в подземные выработки. При $t_{\text{nocm}} > t_{\text{ucx}}$ естественная тяга действует отрицательно по отношению к работе вентилятора главного проветривания, создавая дополнительное сопротивление и способствуя уменьшению общего объема подаваемого воздуха.

При температуре наружного воздуха от +30 °С до +50 °С и температуре исходящей струи +15 °С естественная тяга противодействует работе вентиляторов главного проветривания, создавая дополнительное сопротивление от 27 до 61 Па. Это приводит к снижению подачи количества воздуха в вентиляционную систему на 9–14 м³/с, что составляет до 13% от номинальной производительности вентиляторов. В ночное время при понижении температуры наружного воздуха до +8...+15 °С наблюдается кратковременное положительное влияние естественной тяги, увеличивающей подачу воздуха на 4–7 м³/с.

При температуре наружного воздуха -15...-40 °С и температуре исходящей струи +3...+10 °С естественная тяга усиливает приток холодного воздуха в вентиляционную систему на 12–20 м³/с, создавая депрессию от 55 до 127 Па. Это приводит к следующим негативным последствиям: рециркуляции воздушных потоков в объеме до 137 м³/с; переохлаждению воздушных потоков выработок и обледенению их стенок; возможному опрокидыванию вентиляционных потоков на отдельных направлениях вентиляционной сети; снижению эффективности работы вентиляторов главного проветривания.

Результаты расчетов депрессии естественной тяги для различных температурных условий представлены в таблице 1.

Таблица 1

Депрессия естественной тяги при различных температурных условиях

Кесте 1

Әртүрлі температуралық жағдайлардағы табиғи тарту депрессиясы

Table 1

Natural draft pressure under different temperature conditions

$t_{\text{nocm}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ucx}} = 10 ^\circ\text{C}$, Па	$t_{\text{ucx}} = 7 ^\circ\text{C}$, Па	$t_{\text{ucx}} = 3 ^\circ\text{C}$, Па
-10	44–45	38–39	29–30
-20	68–70	63–64	54–55
-30	95–97	89–91	80–82
-40	124–127	118–121	110–112

Представленная таблица демонстрирует количественную оценку депрессии естественной тяги (h_e), Па, возникающей в вентиляционной сети рудника под влиянием разности температур между поступающим с поверхности воздухом (t_{nocm}) и исходящим из выработок потоком (t_{ucx}). Данные наглядно показывают, что депрессия естественной тяги является функцией двух ключевых параметров: абсолютного значения температуры наружного воздуха и температурного градиента.

С понижением температуры наружного воздуха, при постоянной температуре исходящей струи, величина естественной тяги существенно возрастает. Так, при температуре исходящей струи 7 °С поступление охлажденного воздуха от -10 °С до -40 °С увеличивает депрессию с ~38 Па до ~120 Па, то есть более чем в 3 раза.

При одинаковой температуре наружного воздуха более высокая температура в исходящей струе усиливает естественную тягу. При температуре поступающего воздуха -30 °С повышение температуры исходящей струи от 3 °С до 10 °С увеличивает h_e примерно с 81 Па до 97 Па.

Результаты анализа состояния проветривания рудника и выполненные расчеты показали, что принятый всасывающий способ проветривания рудника в летний период обеспечивает подачу требуемого количества воздуха на рабочие горизонты и рециркуляция воздушных масс в системе горных выработок отсутствует. В весенне-летний

и летне-осенний периоды естественная тяга оказывает отрицательное влияние на организацию проветривания подземных выработок. В зимних условиях величина депрессии естественной тяги зависит от разницы температур поступающего и исходящего из рудника воздуха. В условиях экстремально низких температур количество воздуха, поступающее в рудник под действием естественной тяги, достигает величины 20 м³/с, приводит к переохлаждению и обмерзанию основных выработок, что негативно отражается на обеспечении безопасности при ведении горных работ. Для уменьшения негативного влияния естественной тяги в экстремальных условиях зимнего периода предлагается использовать вентиляторы местного проветривания (ВМП), устанавливаемые в местах поступления холодных воздушных масс и работающие по схеме встречного взаимодействия струй. При этом выбор вентиляторной установки производится таким образом, чтобы при его работе не уменьшался общий расход воздуха и в то же время блокировались негативные последствия влияния естественной тяги.

Переход на нагнетательный способ проветривания рудника в условиях низких отрицательных температур атмосферного воздуха и установка вентиляторов главного проветривания в подземных выработках способствует поступлению холодных масс воздуха на нижележащие горизонты с изменением направления движения воздушных потоков на выходе из порталов или с опрокидыванием воздушных струй на отдельных направлениях. Негативное влияние естественной тяги способствует образованию мощных рециркуляционных процессов в вентиляционной сети, что приводит к ухудшению состояния воздушной среды в подземных выработках.

Обсуждение результатов

Проведенное исследование демонстрирует, что сезонное влияние естественной тяги является ключевым фактором, определяющим эффективность проветривания рудника Ушкатын-3.

Установленные закономерности влияния естественной тяги воздуха с учетом сезонных колебаний на устойчивость проветривания подземных выработок рудника позволили разработать меры по снижению ее негативного воздействия с помощью вентиляторов местного проветривания и оптимизации расположения вентиляционных перемычек. Практическая ценность результатов заключается в конкретных рекомендациях: оптимизации сезонных схем проветривания, определении мест установки и параметров ВМП для блокирования холодного притока зимой, а также минимизации рециркуляции. Это способствует повышению безопасности труда на руднике и снижению рисков для здоровья работников.

Основное ограничение модели связано с ее привязкой к конкретным условиям рудника Ушкатын-3, однако представленный алгоритм расчета применим для других предприятий в регионах с резко континентальным климатом. Полученные результаты создают основу для разработки автоматизированных систем адаптивного управления шахтной вентиляцией.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что естественная тяга оказывает существенное влияние на состояние проветривания подземных горных выработок рудника Ушкатын-3, особенно в зимний период, вызывая рециркуляцию воздушных потоков (до 137 м³/с) и обледенение стенок выработок при отрицательных температурах наружного воздуха. Показано, что переход на нагнетательный способ проветривания рудника в зимнее время без учета естественной тяги воздуха приводит к ухудшению вентиляционных режимов и блокировке выдачи воздуха по основным направлениям вентиляционной сети, что противоречит требованиям безопасности ведения горных работ. Разработаны меры по снижению негативного влияния естественной тяги воздуха путем установки вентиляторов местного проветривания, работающих на встречном потоку направлению. Предложены практические рекомендации по организации проветривания рудника Ушкатын-3, включающие:

- использование всасывающего способа проветривания рудника в летний период;
- применение нагнетательного способа проветривания рудника с установкой вентиляторов местного проветривания для блокировки естественной тяги в зимний период;
- оптимизацию расположения вентиляционных перемычек для минимизации рециркуляции воздуха в вентиляционной сети;
- внедрение сезонных графиков проветривания рудника с учетом прогнозируемых температурных условий.

Разработанные рекомендации позволяют повысить безопасность ведения горных работ и эффективность проветривания, адаптировать вентиляционную систему к сезонным изменениям климатических условий, предотвратить аварийные ситуации, связанные с ухудшением состояния воздушной среды в подземных выработках.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой автоматизированной системы управления вентиляцией, позволяющей в реальном времени корректировать режимы проветривания в зависимости от изменяющихся температурных условий, а также с оценкой экономической эффективности предлагаемых мероприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хубиева В.М. Влияние естественной тяги на аэрологическую безопасность алмазодобывающих рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 6–1. С. 186–193 (на русском языке)
2. Исмайлов Р.Т., Гамзаев В.Х. Повышение эффективности проветривания рудника Гадир // Азербайджанский журнал нефтяной промышленности. 2024. № 3. С. 4–7 (на русском языке)
3. Эффект естественной конвекции, обусловленной плавучестью, в системе предварительного кондиционирования воздуха в горных выработках, действующей как крупномасштабный накопитель

тепловой энергии / Горейши-Мадисе С.А. [и др.] // Прикладная энергетика. 2018. № 221. С. 268–279 (на английском языке)

4. Заплетал П., Худечек В., Трофимов В. Влияние естественного перепада давления в шахтной вентиляционной системе // Архив горных наук. 2014. № 59 (2). С. 501–508 (на английском языке)
5. Алборов И.Д., Заалишвили В.Б. Влияние ветрового режима и давления атмосферного воздуха на надежность вентиляции рудников и организм человека // Геология и геофизика Юга России. 2021. № 11 (3). С. 148–159 (на русском языке)
6. Лялькина Г.Б., Николаев А.В., Макарычев Н.С. Методика расчета величины и направления общерудничной естественной тяги с заданной доверительной вероятностью // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология Нефтегазовое и горное дело. 2018. № 17 (2). С. 181–188 (на русском языке)
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Устойчивость конвективного проветривания рудника после отключения вентилятора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 4. С. 122–130 (на русском языке)
8. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Семин М.А. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 283–291 (на русском языке)
9. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А. Устойчивость режима естественной вентиляции после остановки основного вентилятора // Международный журнал тепло- и массообмена. 2015. № 86. С. 288–293 (на английском языке)
10. Шалимов А.В., Казаков Б.П., Зайцев А.В. Аналитический подход к оценке эффекта водяной пробки в вентиляционных стволах шахт // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 332 (6). С. 39–48 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Хубиева В.М. Алмаз кен орындарының аэрологиялық қауіпсіздігіне табиғи тартудың әсері // Таулы ақпараттық-талдамалық бюллетень. 2020. № 6–1. Б. 186–193 (орыс тілінде)
2. Исмайылов Р.Т., Гамзаев В.Х. Гадир кен орнындағы желдетудің тиімділігін арттыру // Әзербайжан мұнай өнеркәсібі журналы. 2024. № 3. Б. 4–7 (орыс тілінде)
3. Тау-кен шығару қуыстарында жылу қалдықтарын үлкен көлемде жинайтын жүйеде ауа алдын ала кондициялау жүйесінде табиғи конвекцияның әсері / Горейши-Мадисе С.А. [және т. б.] // Қолданбалы энергетика. 2018. № 221. Б. 268–279 (ағылшын тілінде)
4. Заплетал П., Худечек В., Трофимов В. Шахталық желдету жүйесіндегі табиғи қысым айырмашылығының әсері // Таулы ғылымдар архиві. 2014. № 59 (2). Б. 501–508 (ағылшын тілінде)
5. Алборов И.Д., Заалишвили В.Б. Кен орындарының жел режимі мен атмосфералық қысымның желдету сенімділігіне және адамның организмне әсері // Оңтүстік Ресейдің геологиясы және геофизикасы. 2021. № 11 (3). Б. 148–159 (орыс тілінде)
6. Лялькина Г.Б., Николаев А.В., Макарычев Н.С. Белгіленген сенімділік ықтималдығымен жалпы кен орындарының табиғи тарту мәлішерін және бағытын есептеу әдістемесі // Пермь ұлттық зерттеу политехникалық университетінің хабаршысы. Геология, мұнай-газ және тау өнеркәсібі. 2018. № 17 (2). Б. 181–188 (орыс тілінде)
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Вентиляторды өшіруден кейін кен орнының конвективті желдету тұрақтылығы // Пайдалы қазбаларды өндірудің физико-техникалық мәселелері. 2019. № 4. Б. 122–130 (орыс тілінде)
8. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Семин М.А. Күрделі желдету жүйесі бар кен орындарында желдетудің тиімділігін арттыру әдістерін әзірлеу // Тула мемлекеттік университетінің хабаршысы. Жер ғылымдары. 2019. № 4. Б. 283–291 (орыс тілінде)
9. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А. Негізгі вентиляторды тоқтатқаннан кейінгі табиғи желдету режимінің тұрақтылығы // Халықаралық жылу және масса алмасу журналы. 2015. № 86. Б. 288–293 (ағылшын тілінде)
10. Шалимов А.В., Казаков Б.П., Зайцев А.В. Шахталық итольняларда су тығыны әсерін бағалауға аналитикалық тәсіл // Томск политехникалық университетінің хабаршысы. Георесурстарды инжиниринг. 2021. № 332 (6). Б. 39–48 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Khubieva V.M. Vlijanie estestvennoj tjagi na aerologicheskiju bezopasnost'almazodobyvajushhih rudnikov [Influence of natural draft on the aerological safety of diamond mines], Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [Mining information and analytical bulletin]. 2020. No. 6–1. 186–193 pp. (in Russian)
2. Ismayilov R.T., Hamzayev V.Kh. Povyshenie jeffektivnosti provetrivaniya rudnika Gadir [Increasing the efficiency of ventilation of the Gadir mine], Azerbajdzhanskij zhurnal neftjanoy promyshlennosti [Azerbaijan Oil Industry Journal]. 2024. No. 3. 4–7 pp. (in Russian)

3. *Effect of buoyancy-driven natural convection in a rock-pit mine air preconditioning system acting as a large-scale thermal energy storage mass / Ghoreishi-Madiseh S.A. [et al.] // Applied Energy. 2018. No. 221. 268–279 pp. (in English)*
4. *Zapletal P., Hudeček V., Trofimov V. Effect of Natural Pressure Drop in Mine Main Ventilation // Archives of Mining Sciences. 2014. No. 59 (2). 501–508 pp. (in English)*
5. *Alborov I.D., Zaalishvili V.B. Vliyanie vetrovogo rezhima i davleniya atmosfernogo vozduha na nadezhnost' ventiljacii rudnikov i organizm cheloveka [Influence of wind regime and atmospheric pressure on mine ventilation reliability and human health], Geologija i geofizika Juga Rossii [Geology and Geophysics of Southern Russia]. 2021. No. 11 (3). 148–159 pp. (in Russian)*
6. *Lyalkina G.B., Nikolaev A.V., Makarychev N.S. Metodika rascheta velichiny i napravlenija obshherudnichnoj estestvennoj tjagi s zadannoju doveritel'noj verojatnost'ju [Methodology for calculating the magnitude and direction of overall mine natural draft with a given confidence probability], Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Geologija Neftegazovoe i gornoe delo [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology, Oil & Gas and Mining]. 2018. No. 17 (2). 181–188 pp. (in Russian)*
7. *Kazakov B.P., Shalimov A.V. Ustojchivost' konvektivnogo provetrivanija rudnika posle otključenija ventiljatora [Stability of convective mine ventilation after fan shutdown], Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical-Technical Problems of Mineral Resources Development]. 2019. No. 4. 122–130 pp. (in Russian)*
8. *Maltsev S.V., Kazakov B.P., Semin M.A. Razrabotka sposobov povyshenija jeffektivnosti provetrivanija rudnikov so slozhnymi sistemami ventiljacii [Development of methods to improve ventilation efficiency in mines with complex ventilation systems], Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [Izvestia of Tula State University. Earth Sciences]. 2019. No. 4. 283–291 pp. (in Russian)*
9. *Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation regime after main fan shutdown // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. No. 86. 288–293 pp. (in English)*
10. *Shalimov A.V., Kazakov B.P., Zaytsev A.V. Analiticheskij podhod k ocenke jeffekta vodjanoj probki v ventiljacionnyh stvolah shaht [Analytical approach to evaluate water plug effect in mine shafts], Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Geo-resources]. 2021. No. 332 (6). 39–48 pp. (in Russian)*

Сведения об авторах:

Спатаев Н.Д., канд. тех. наук, ассоц. профессор кафедры «Промышленная безопасность и экология», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), n.spataev@ktu.edu.kz; <https://orsid.org/0000-0003-1967-7698>

Саттарова Г.С., канд. тех. наук, ассоц. профессор кафедры «Промышленная безопасность и экология», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), g.sattarova@ktu.edu.kz; <https://orsid.org/0000-0002-9764-2311>

Кудрявцев С.С., канд. биол. наук, профессор кафедры «Промышленная безопасность и экология», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), s.kudryavtsev@ktu.edu.kz; <https://orsid.org/0000-0002-7232-6304>

Медведубаев Н.А., канд. тех. наук, профессор кафедры «Промышленная безопасность и экология», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), n.medeubaev@ktu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-2086-4650>

Авторлар туралы мәліметтер:

Спатаев Н.Д., техн. ғылым. канд., «Өнеркәсіптік қауіпсіздік және экология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

Саттарова Г.С., техн. ғылым. канд., «Өнеркәсіптік қауіпсіздік және экология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» (Қарағанды қ., Қазақстан)

Кудрявцев С.С., биол. ғылым. канд., «Өнеркәсіптік қауіпсіздік және экология» кафедрасының профессоры, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

Медведубаев Н.А., техн. ғылым. канд., «Өнеркәсіптік қауіпсіздік және экология» кафедрасының профессоры, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Spataev N.D., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Safety and Ecology, NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Sattarova G.S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Safety and Ecology, NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Kudryavtsev S.S., Candidate of Biological Sciences, Professor of the Department of Industrial Safety and Ecology, NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Medeubaev N.A., Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Safety and Ecology, NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)



ГОРНОРУДНЫЙ КОНГРЕСС КАЗАХСТАНА

13–14 МАЯ 2026, АСТАНА, КАЗАХСТАН

ПОДДЕРЖКА
2025:

KAZAKH INVEST
NATIONAL COMPANY

ЗОЛОТОЙ
СПОНСОР 2025:

БРОНЗОВЫЙ СПОНСОР 2025:

JENBACHER

VOSTOCK CAPITAL
— 23 года динамичного успеха —

СРЕДИ ДОКЛАДЧИКОВ И ПОЧЕТНЫХ ГОСТЕЙ 2025:



**СЕРИК
ТУЛЕНБЕРГЕНОВ**

вице-министр,
Министерство по
чрезвычайным
ситуациям Республики
Казахстан



**МАРГУЛАН
БАЙБАТЫРОВ**

заместитель председателя,
Комитет геологии
Министерства
промышленности
и строительства
Республики Казахстан



**БАУЫРЖАН
АЙТКУЛОВ**

директор департамента
проектов,
Kazakh Invest



**ЯН
ЛИНЬ**

исполнительный
директор,
Silk Road Resources



**АРМАНБЕК
ОМИРГАЛИ**

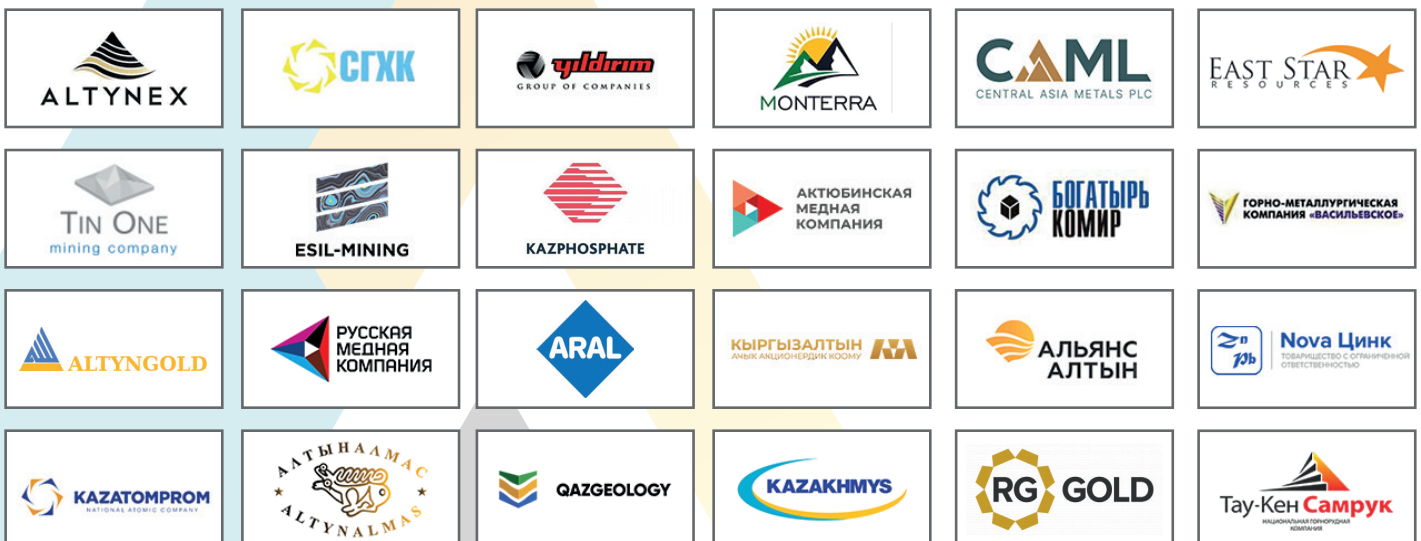
директор
департамента науки
и редких металлов,
Национальная
атомная компания
Казатомпром



**МЕЙРХАН
ДЖУМАШЕВ**

директор департамента
минеральных ресурсов,
Алтыналмас

СРЕДИ ПОСТОЯННЫХ УЧАСТНИКОВ:



Код МРНТИ 87.19.03

E. Ibragimova¹, A-B. Nurlybay², K. Berikkyzy², *N. Abdimutalip¹

¹*Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkistan, Kazakhstan),*

²*International University of Tourism and Hospitality, Language school (Turkistan, Kazakhstan)*

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT AND ESG ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF MINING ACTIVITIES

Abstract. The article evaluates the impact of mining activities on the state of the soil cover. An increase in the pollution coefficients of *Pb* to 1.55 and *Cd* to 1.40 was found, as well as an increase in the integral pollution index Z_c to 5.05, which indicates the cumulative nature of the anthropogenic load. The excess of the background values for *Cr* up to 120 mg/kg and *Ni* up to 50 mg/kg was revealed, which indicates a long-term accumulation of pollutants. Spatial analysis showed maximum pollution levels near mining sources. The ESG analysis showed an increase in environmental risk to 0.78 with a low level of the management component (0.45). The results obtained confirm the significant impact of the mining industry on the soil component of the environment.

Key words: heavy metals, soils, mining activities, integrated pollution indicator (Z_c), environmental risk, ESG analysis.

Тау-кен қызметінің қоршаған ортаға әсерін геоэкологиялық бағалау және ESG-талдау

Аннотация. Мақалада тау-кен жұмыстарының жер жамылғысының жағдайына әсері бағаланды. *Pb* бойынша ластану коэффициенттерінің 1.55 және *Cd* бойынша 1.40-қа дейін ұлғаюы, сондай-ақ Z_c ластануының интегралдық көрсеткішінің 5.05-ке дейін өсуі белгіленді, бұл техногендік жүктеменің жинақтаушы сипатын көрсетеді. *Cr* бойынша фондық мәндердің 120 мг/кг-ға дейін және *Ni* бойынша 50 мг/кг-ға дейін артуы анықталды, бұл ластанушы заттардың ұзақ уақыт жиналуын көрсетеді. Кеңістіктік талдау тау-кен көздеріне жақын ластанудың максималды деңгейін көрсетті. ESG талдауы басқару компонентінің төмен деңгейінде (0.45) 0.78-ге дейін экологиялық тәуекелдің өсуін көрсетті. Нәтижелер тау-кен өнеркәсібінің қоршаған ортаның топырақ компонентіне айтарлықтай әсерін растайды.

Түйін сөздер: ауыр металдар, топырақ, тау-кен қызметі, ластанудың интегралды көрсеткіші (Z_c), экологиялық тәуекел, ESG талдауы.

Геоэкологическая оценка и ESG-анализ воздействия горнодобывающей деятельности на окружающую среду

Аннотация. В статье проведена оценка влияния горнодобывающей деятельности на состояние почвенного покрова. Установлено увеличение коэффициентов загрязнения по *Pb* до 1.55 и *Cd* до 1.40, а также рост интегрального показателя загрязнения Z_c до 5.05, что свидетельствует о накопительном характере техногенной нагрузки. Выявлено превышение фоновых значений по *Cr* до 120 мг/кг и *Ni* до 50 мг/кг, что указывает на длительное накопление загрязняющих веществ. Пространственный анализ показал максимальные уровни загрязнения вблизи источников добычи. ESG-анализ продемонстрировал рост экологического риска до 0.78 при низком уровне управленческого компонента (0.45). Полученные результаты подтверждают значительное воздействие горнодобывающей отрасли на почвенный компонент окружающей среды.

Ключевые слова: тяжелые металлы, почвы, горнодобывающая деятельность, интегральный показатель загрязнения (Z_c), экологический риск, ESG-анализ.

Introduction

In recent decades, in the context of increasing anthropogenic pressure on the environment and the transition to the concept of sustainable development, the integration of environmental, social and managerial aspects into the activities of industrial enterprises has become particularly relevant. One of the key tools of such integration is the ESG approach (Environmental, Social, Governance), which takes into account environmental factors, social responsibility and the quality of corporate governance when assessing the sustainability of economic activity.

Initially, the ESG concept was developed within the framework of the United Nations Global Compact initiative and was consolidated in the report of the United Nations Environment Program Finance Initiative «WHO Cares Wins», which emphasizes the need to take non-financial factors into account when making investment decisions. Subsequently, the ESG approach became an integral part of the global sustainable development agenda, including within the framework of the UN Sustainable Development Goals [1–2]. According to research by Alloway, Kabata-Pendias and Tchounwou, companies that integrate ESG factors into their development strategy demonstrate more sustainable long-term results and reduce environmental and reputational risks [3–5]. Similar conclusions are presented in the works of Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan, where, based on a meta-analysis of more than 2,000 empirical studies, a positive relationship between ESG indicators and financial efficiency of companies is shown [6].

In the mining industry, the ESG approach is of particular importance due to the high level of environmental risks, in-

cluding pollution of soils, water resources and atmospheric air, as well as the formation of significant amounts of waste. The research by Daniel Franks and David Brereton highlights that the implementation of ESG principles helps to reduce the negative impact of extractive activities on the environment and increase the level of interaction with local communities. Domestic research also indicates the increasing role of ESG in the development of the mining industry. Thus, the works of K.S. Mukhtarova and J.S. Nurgalieva consider the issues of introducing the principles of sustainable development and the «green economy» in the industrial sector of the Republic of Kazakhstan [7–8]. It is noted that there is a need to modernize the environmental policy of enterprises, introduce resource-saving technologies and improve environmental monitoring. The systematization of the impact of various types of mining industry on the components of the biosphere is presented in table 1.

The analysis of the presented data shows that the most pronounced negative impact on the soil component of the biosphere is typical for the polymetallic and coal mining industries, where there is an intensive accumulation of heavy metals, including lead, cadmium and arsenic. It has been established that the mining industry generates up to 80% of industrial waste containing toxic substances, which significantly increases the anthropogenic burden on ecosystems. At the same time, pollution is complex and spreads to various components of the environment, including the atmosphere and biota. The ability of heavy metals to accumulate in soils with subsequent involvement in trophic chains, which causes long-term negative consequences, is a particular environmental danger. Due

Table 1

The impact of mining industries on the components of the biosphere

Кесте 1

Тау-кен өндірісінің биосфера құрауыштарына әсері

Таблица 1

Влияние видов горнодобывающей промышленности на компоненты биосферы

Type of mining industry	The main pollutants	A component of the biosphere	The nature of the impact	Quantitative indicators
Coal mining (quarries, mines)	<i>Pb, Cd, Hg, SO₂</i> , dust	Soils	Accumulation of heavy metals, degradation of the structure	<i>Pb</i> up to 1.5–2 MPC; <i>Cd</i> up to 1.3–1.8 MPC
Polymetallic (<i>Cu, Zn, Pb</i>)	<i>Pb, Zn, Cu, As</i>	Soils	Soil cover toxicity, reduced fertility	<i>Pb</i> up to 45 mg/kg; <i>Zn</i> up to 150 mg/kg (Gumilyov ENU. Chemistry. Geography)
Gold mining	<i>Hg, As</i> , cyanides	Soils	Chemical contamination, pH change	
Uranium mining	<i>U, Ra</i> , radionuclides	Soils, biota	Radioactive contamination, biological accumulation	As up to 10–15 mg/kg (above background)
Extraction of building materials (sand, crushed stone)	Dust, <i>SiO₂</i>	Atmosphere, soils	Mechanical destruction of soils, erosion	Increased background radiation (locally) (Ruviki)
Mining and chemical raw materials (phosphorites)	<i>P₂O₅, F</i> , heavy metals	Soils	Chemical pollution, changes in chemical composition	
All types (enrichment, tailings storage)	Heavy metals, acid effluents	Soils	Prolonged accumulation of toxicants	Violation of land by dozens of hectares

to the fact that the main impact of the mining industry is on the soil cover, this study focuses on the analysis of soil conditions.

Despite a significant amount of research, the issues of a comprehensive geoecological assessment of the impact of mining activities from the perspective of ESG remain insufficiently developed, especially for the regions of southern Kazakhstan, including the Turkestan region, where there is an increase in anthropogenic pressure on natural ecosystems. In this regard, the purpose of this study is to conduct a geoecological assessment and an ESG analysis of the environmental impact of mining activities, taking into account regional specifics.

In the Republic of Kazakhstan, the mining industry occupies a key place in the structure of the economy, which leads to a significant anthropogenic impact on the environment. In this regard, Kazakhstan's national science pays great attention to the study of the consequences of mining for various components of the natural environment. The results of scientific work show that mining activities are accompanied by the formation of technogenic landscapes, degradation of the soil cover, pollution of surface and groundwater, as well as a deterioration in the quality of atmospheric air. Mining and metallurgical waste, including tailings and dumps, are a particular environmental hazard, which are sources of secondary pollution and contribute to the migration of toxic elements in ecosystems.

Studies conducted in the industrialized regions of Kazakhstan, including the Karaganda region, indicate a high level of integrated environmental pollution. It has been established that the main sources of negative impact are enterprises of

the mining and metallurgical industries, which generate significant emissions of pollutants into the atmosphere and the hydrosphere, as well as leading to the accumulation of heavy metals in soils. In addition, it is noted that the transformation of natural landscapes under the influence of mining is sustainable and is accompanied by a violation of the ecological balance, a decrease in biological diversity and a deterioration in the living conditions of the population.

Thus, analysis of domestic studies confirms that mining activities in Kazakhstan have a multi-component and long-term impact on the environment. At the same time, most of the works are focused on the study of certain types of pollution or specific territories, which necessitates an integrated approach to assessing environmental consequences, taking into account modern concepts, including the ESG approach.

Materials and research methods

Within the framework of this study, a comprehensive geoecological assessment of the environmental impact of mining activities was carried out using the ESG approach. The research is focused on identifying the interrelationships between man-made stress, the state of natural components and the principles of sustainable development. The territory of the Turkestan region of the Republic of Kazakhstan, characterized by the presence of mining facilities, as well as the increasing level of anthropogenic impact on natural ecosystems, was chosen as the object of research.

The information basis of the study was made up of official statistical data, state environmental reports, environmental

monitoring results, as well as materials from remote sensing of the Earth. Additionally, scientific publications devoted to the assessment of the impact of the mining industry on the environment were used. The statistical data included indicators of atmospheric air pollution, heavy metal content in soils, surface water quality, as well as the volume of industrial waste generation. The methodological basis of the research is based on a combination of geoeological, statistical and analytical methods. The geoeological analysis included an assessment of the state of the main environmental components – the lithosphere, hydrosphere and atmosphere – in areas affected by mining activities. During the analysis, the main sources of pollution were identified, the spatial distribution of pollutants was assessed, and areas of increased environmental risk were identified.

To quantify the level of pollution, a method was used to compare the actual concentrations of pollutants with the established maximum permissible concentrations (MPC). The pollution coefficient was calculated using the formula:

$$K_i = \frac{C_i}{MPC_i}, \quad (1)$$

where C_i is the actual concentration of the i -th pollutant;

MPC_i is the maximum permissible concentration of this substance.

The total indicator was used for an integral assessment of the pollution level:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_i - (n - 1), \quad (2)$$

where n is the amount of pollutants analyzed.

The impact assessment of mining activities was carried out using an ESG approach that includes three key components: environmental, social, and governance. Appropriate indicators have been identified for each component, allowing for a comprehensive assessment of the sustainability of the studied area. In the course of the research, an expanded system of indicators was developed to systematize ESG indicators, taking into account the specifics of mining activities and regional peculiarities of southern Kazakhstan. When forming the list of indicators, modern scientific approaches to assessing man-made impacts were taken into account, including studies of soil pollution with heavy metals, typical for industrial regions of Kazakhstan. To carry out a comprehensive assessment of the sustainability of the territory, a multilevel system of ESG indicators has been proposed, including quantitative and qualitative indicators, as well as methods for their assessment (table 2).

The presented system of indicators makes it possible to take into account both direct environmental effects (pollution of soils, air and waters) and indirect consequences related to the impact on the population and the level of environmental management.

For comparability of indicators, a normalization procedure was used, in which the values were reduced to a dimensionless form in the range from 0 to 1. This made it possible to aggregate heterogeneous indicators into a single integrated ESG index.

The calculation of the integral ESG index was carried out according to the formula:

$$ESG = \frac{E + S + G}{3}, \quad (3)$$

where ESG are the normalized values of the corresponding components.

ESG indicator system for geoeological assessment of mining impacts

Тау-кен жұмыстарының әсерін геоэкологиялық бағалауға арналған ESG көрсеткіштер жүйесі

Система показателей ESG для геоэкологической оценки воздействия горных работ

Table 2

Кесте 2

Таблица 2

Component	Subcategory	The indicator	Units of measurement	Evaluation method	Data source
Environmental	Soil quality	Content of <i>Pb, Cd, Zn, Cu, As, Ni, Cr</i>	mg/kg	AAC/ICP-MS	Soil monitoring
Environmental	Air pollution	PM10, <i>SO₂</i> , <i>NO_x</i>	mg/m ³	Gas analyzers	Kazhydromet
Environmental	Water quality	pH, TDS, heavy metals	mg/l	Laboratory analysis	Surface waters
Environmental	Waste	Waste volume	thousand tons/year	Statistics	Enterprises
Social	Public health	Morbidity	cases/1000 people	Statistical analysis	Ministry of Health
Social	Living conditions	Environmental comfort	index	Social assessment	Surveys
Governance	Environmental policy	Having an ESG strategy	binary	Expert analysis	Company reports
Governance	Compliance	Compliance with MPC	%	Comparative analysis	Standards

Geoinformation technologies were used to analyze the spatial distribution of pollution. GIS tools were used to map pollution zones, as well as visualize monitoring data. This made it possible to identify areas with the greatest anthropogenic load and determine their relationship to the location of mining facilities.

Statistical data processing included the calculation of averages, standard deviation, and coefficients of variation. This made it possible to assess the degree of heterogeneity in the distribution of pollutants and identify trends in environmental indicators. Based on the generalization of monitoring data and literature sources, an expanded sample of pollutants typical of the mining territories of Kazakhstan, including polymetallic and rare elements, has been formed (table 3).

The obtained values indicate an excess of the standard values for a number of toxic elements (*Pb*, *Cd*, *As*, *Ni*), which is consistent with the results of modern research indicating the formation of stable anthropogenic anomalies in mining areas. Based on these data, an integral pollution indicator was calculated, which makes it possible to assess the overall level of environmental impact.

Graphical methods were used to visualize the results of the study. Below is an example of Python code for plotting pollution levels. To visualize the level of soil pollution, a comparative graph of pollution coefficients for the main heavy metals was constructed (figure 1).

The figure 1 shows that the greatest contribution to pollution is made by lead and cadmium, which are highly toxic and bioaccumulative, which is confirmed by the data of modern research in Kazakhstan. For a more detailed assessment of the temporal dynamics of pollution, graphs of changes in pollution coefficients (K_i) for heavy metals exceeding the maximum permissible concentrations for the period 2018–2025 have been constructed (figure 2).

The results obtained demonstrate a steady upward trend in pollution coefficients for all considered elements exceeding the regulatory values. The most pronounced dynamics is ob-

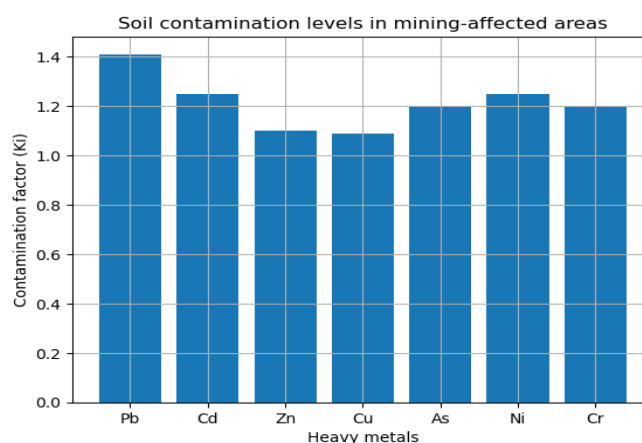


Figure 1. Comparative analysis of soil contamination factors for heavy metals in the study area.

Сурет 1. Зерттелетін аумақтағы топырақтың ауыр металдармен ластану факторларын салыстырмалы талдау.

Рис. 1. Сравнительный анализ факторов загрязнения почв тяжелыми металлами на исследуемой территории.

served for lead (*Pb*), cadmium (*Cd*) and nickel (*Ni*), which indicates an increase in the anthropogenic load associated with mining activities. At the same time, a gradual increase in K_i values in the period 2023–2025 may indicate insufficient effectiveness of environmental protection measures and the need to introduce ESG-oriented approaches to environmental risk management.

Results and discussion

As a result of the geoecological analysis of the territory of the Turkestan region, it has been established that mining activities have a significant impact on the environment.

Heavy metal concentrations and pollution coefficients in soils

Ауыр металдардың шоғырлануы және топырақтағы ластану коэффициенттері

Концентрации тяжелых металлов и коэффициенты загрязнения в почвах

Table 3

Кесте 3

Таблица 3

Element	Concentration (mg/kg)	MPC (mg/kg)	K_i	Hazard class	A source
<i>Pb</i>	45	32	1.41	1	<i>Pb-Zn</i> Ores
<i>Cd</i>	2.5	2.0	1.25	1	Tails
<i>Zn</i>	110	100	1.10	2	Metallurgy
<i>Cu</i>	60	55	1.09	2	Enrichment
<i>As</i>	12	10	1.20	1	Polymetals
<i>Ni</i>	50	40	1.25	2	Sulfides
<i>Cr</i>	120	100	1.20	2	Chromites
<i>Mn</i>	900	1500	0.60	3	Natural background
<i>Co</i>	25	20	1.25	2	Ores
<i>Fe</i>	35000	-	-	3	Geogenic

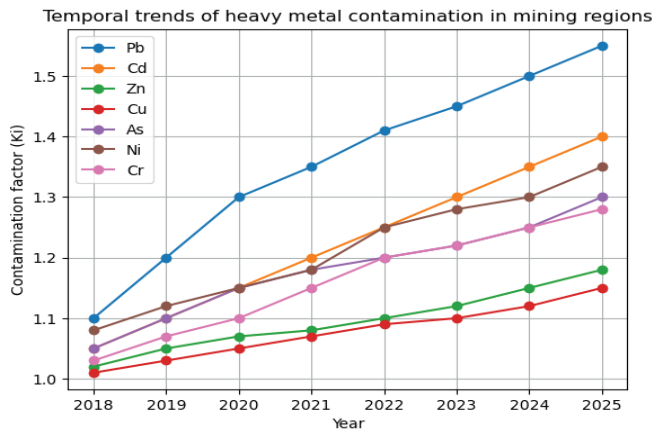


Figure 2. Temporal dynamics of contamination factors (Ki) for heavy metals exceeding permissible limits.

Сурет 2. Шектелген нормалардан асатын ауыр металдармен ластану (Ki) коэффициенттерінің уақытша динамикасы.

Рис. 2. Временная динамика коэффициентов загрязнения (Ki) тяжелыми металлами, превышающих допустимые нормы.

The data obtained show a steady excess of heavy metal concentrations in soils relative to the maximum permissible concentrations. Based on calculations of pollution coefficients (K_i), estimated by the formula 1. It was found that for elements such as lead (*Pb*), cadmium (*Cd*), arsenic (*As*), nickel (*Ni*), and chromium (*Cr*), K_i values consistently exceed 1.0. This indicates the technogenic nature of the accumulation of these elements in the soil cover, which confirms the results of similar studies in the industrial regions of Kazakhstan and the world. For example, studies on soil pollution near polymetallic mines have also noted increased concentrations of *Pb* and *Cd* due to their migration from enrichment waste and tailings [9–10].

As part of the study of the ecological state of the Turkestan region, a comprehensive assessment of the impact of mining

activities on soils, water bodies, as well as the socio-managerial environment was carried out. For this purpose, data on concentrations of heavy metals in soils and water for the period 2018–2025 were collected. Based on these data, pollution coefficients (K_i) and the integrated pollution index (Z_c) were calculated, and an ESG analysis was performed to assess the region’s resilience to environmental and social risks.

The soil study included sampling from 12+ key sites located near mining areas. The samples were taken from the upper soil layer (0–20 cm), as it is this layer that is most susceptible to anthropogenic impact. Pollution coefficients K_i were calculated for each element – *Pb*, *Cd*, *Zn*, *Cu*, *As*, *Ni*, and *Cr*. The soil results are shown in table 4.

The tabular data show a steady increase in *Pb* and *Cd* concentrations, as well as a gradual increase in the integral Z_c index, which indicates the accumulation of anthropogenic pollution and increased anthropogenic impact on the region’s soils. At the same time, *Zn* and *Cu* remain relatively stable, reflecting their natural geochemical background and lower mobility in soils.

The calculation of the integral pollution indicator showed a steady trend of increasing the total load on the soil. Based on calculations for 7 analyzed elements, an integral index (Z_c) was obtained, demonstrating an increase in anthropogenic load from 2018 to 2025 (fig. 2). The increase in Z_c reflects the complex influence of many components and is consistent with empirical data on the expanded territories of mining regions of Kazakhstan (for example, studies in the Karaganda region show a similar trend of increasing pollution due to anthropogenic impact). The increase in Z_c indicates not only the accumulation of pollution, but also the low effectiveness of current environmental protection measures in the relevant areas. This trend requires increased control and the introduction of new waste management technologies, which is confirmed by modern research showing that current regulatory measures are insufficient to stabilize the environmental situation in industrial regions.

Let’s consider the dynamics of changes in heavy metal pollution coefficients exceeding the MPC for 2018–2025 (figure 3). All elements show a positive trend, with the most

Pollution coefficients (K_i) of heavy metals in the soils, 2018–2025

Топырақтың ауыр металдармен ластану коэффициенттері (K_i), 2018–2025 жж.

Коэффициенты загрязнения (K_i) тяжелыми металлами почв, 2018–2025 гг.

Table 4

Кесте 4

Таблица 4

Year	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>As</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	Average Z_c
2018	1.10	1.05	1.02	1.01	1.05	1.08	1.03	3.54
2019	1.20	1.10	1.05	1.03	1.10	1.12	1.07	3.77
2020	1.30	1.15	1.07	1.05	1.15	1.15	1.10	4.02
2021	1.35	1.20	1.08	1.07	1.18	1.18	1.15	4.25
2022	1.41	1.25	1.10	1.09	1.20	1.25	1.20	4.50
2023	1.45	1.30	1.12	1.10	1.22	1.28	1.22	4.65
2024	1.50	1.35	1.15	1.12	1.25	1.30	1.25	4.85
2025	1.55	1.40	1.18	1.15	1.30	1.35	1.28	5.05

pronounced growth observed for **Pb** and **Cd**. These data correspond to the literature data, according to which these elements have high mobility in soils and are able to accumulate in the area of contact with mining facilities. Partially, the more moderate increase in K_i for **Zn** and **Cu** may be related to the geochemical characteristics of local rocks contributing to the natural background content of these elements, as well as certain adjustments in the technological processes of mining and processing ores at some sites in the region. However, K_i values above one for all these elements indicate a pronounced anthropogenic contribution.

For an in-depth analysis, additional chemical parameters were measured, including **Cr** and **Ni**, as indicators of long-lived pollutants capable of accumulating in ecosystems. The results are presented in table 5.

Table 5
Additional chemical parameters of soils and water, 2025

Топырақ пен судың қосымша химиялық параметрлері, 2025

Дополнительные химические параметры почв и воды, 2025 г.

Indicator	Soil (mg/kg)	Water (mg/l)	MPC	Excess
Pb	45	0.035	0.01	Yes
Cd	2.5	0.006	0.003	Yes
As	12	0.013	0.01	Yes
Ni	50	0.090	0.05	Yes
Cr	120	0.08	0.05	Yes

The collected data confirm the constant excess of MPC for the main toxic metals and indicate the need to take measures to reduce their accumulation in soil and water. Based on the data collected to combine environmental, social and management indicators, an ESG analysis was carried out. The normalized values of the components are presented in table 5 and are shown figure 3. ESG components make it possible to assess the comprehensive impact of enterprise activities on regional sustainable development.

To in-depth assess the sustainability of the region, ESG components were analyzed not only in statics (2025), but also in dynamics for 2018–2025. In accordance with modern approaches to the visualization of sustainable development, it is advisable to present a comparative analysis of categorical ESG indicators in the form of bar charts that provide a visual comparison of components and identification of imbalances.

The results obtained demonstrate the multidirectional dynamics of ESG components. The environmental indicator E increased from 0.62 in 2018 to 0.78 in 2025 (an increase of 25.8%), which indicates not an improvement in the state of the environment, but an increase in environmental risks and increased anthropogenic load. This is confirmed by the parallel growth of soil and water pollution coefficients, especially for **Pb** and **Cd**.

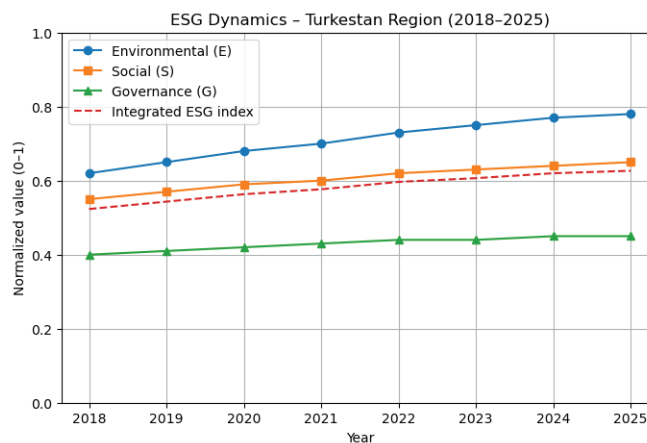


Figure 3. Dynamics of ESG components and the integrated ESG index of the Turkestan region, 2018–2025.

Сурет 3. Түркістан өңірінің ESG және ESG интегралдық индексі компоненттерінің динамикасы, 2018–2025 жж.

Рис. 3. Динамика компонентов ESG и интегрального индекса ESG Туркестанского региона, 2018–2025 гг.

The social component (S) showed a moderate increase from 0.55 to 0.65 (+18.2%), reflecting partial adaptation of the population and infrastructure development, but the pace of improvement remains insufficient compared to the increase in environmental burden. The weakest component remains the management component (G), which increased only from 0.40 to 0.45 (+12.5%), demonstrating the stagnation of environmental management systems and the low degree of implementation of ESG strategies in enterprises. The integral ESG index increased from 0.52 to 0.63, however, this growth does not indicate an increase in stability, but, on the contrary, reflects the accumulation of an imbalance between the components. The most critical gap is between the environmental and management blocks, which in 2025 is 0.33, which indicates the lack of effectiveness of institutional regulatory mechanisms. Thus, the dynamic analysis of the ESG confirms that environmental risks in the region are increasing faster than the management system and social adaptation are developing. This indicates the need to move from declarative implementation of ESG principles to practical tools for environmental regulation and corporate responsibility.

Within the framework of this study, a comprehensive assessment of the ecological state of the Turkestan region was carried out, with an emphasis on the impact of mining activities on environmental components and the sustainability of the territory's development. For the analysis, data from monitoring the content of heavy metals in soils and water bodies for the period 2018–2025 were used, as well as integral pollution indicators and ESG components were calculated. Soil sampling was carried out at a depth of 0–20 cm at 12 key points located near mining and processing zones, while water samples were taken at 6 control channels of rivers and reservoirs. The results of the soil analysis showed a steady trend towards an increase in the content of heavy metals, primarily lead and cadmium. Thus, the pollution coefficient values for **Pb** increased from 1.10 in 2018

to 1.55 in 2025, while for **Cd** – from 1.05 to 1.40, respectively. At the same time, the integral indicator of **Z_c** pollution increased from 3.54 to 5.05, which indicates the cumulative nature of the anthropogenic load. The growth of indicators is statistically significant ($p < 0.05$) with fluctuations in the range of ± 5 –12%, which confirms the stability of the identified trend. More moderate changes are observed for **Zn** and **Cu** (up to 1.18 and 1.15, respectively, by 2025), which may be due to their higher natural background and lower migration capacity.

Conclusions

As a result of the conducted study of the ecological state of the Turkestan region, it was found that mining activities have a significant and sustainable anthropogenic impact on environmental components. An analysis of the dynamics of soil pollution over the period 2018–2025 showed an increase in pollution coefficients for major heavy metals, primarily **Pb** (from 1.10 to 1.55) and **Cd** (from 1.05 to 1.40), which indicates the cumulative nature of pollution. The integral pollution index (**Z_c**) increased from 3.54 to 5.05, which confirms the increased environmental burden and the transition of the soil cover to the category of persistently polluted territories. It has been established that pollution is spatially heterogeneous: the maximum concentrations of heavy metals are recorded near mining facilities and tailings dumps, while in remote areas the indicators remain closer to the background values. This confirms the key role of mining infrastructure as a major source of pollution. The analysis of water bodies showed an excess of the maximum permissible concentrations of **Pb** (3.5 times), **Cd** (2 times) and **Ni** (1.8 times), which indicates the transfer of

pollutants from soils to the aquatic environment. The revealed relationship between the levels of soil and water pollution indicates the formation of a unified heavy metal migration system covering the soil-soil and hydrological environment. Additional analysis of chemical parameters confirmed the accumulation of long-lived pollutants (**Cr**, **Ni**), which is associated with dust emissions, infiltration from tailings ponds and low efficiency of environmental protection measures. This indicates the need to modernize mining technologies and strengthen environmental control. The results of the ESG analysis showed that the environmental component is characterized by a high level of risk (an increase from 0.62 to 0.78), the social component is characterized by a moderate level (from 0.55 to 0.65), while the management component remains at a low level (from 0.40 to 0.45). The integrated ESG index increased from 0.52 to 0.63, however, this growth does not reflect an increase in sustainability, but rather an increase in the imbalance between environmental stress and insufficient effectiveness of management mechanisms. Thus, it has been established that the region is experiencing an outstripping increase in environmental risks compared to the development of management systems and social adaptation. This confirms the need to move towards integrated approaches to sustainable development, including the introduction of ESG-oriented strategies, increased monitoring and improvement of environmental policy. It should be noted that the results obtained are limited by the number of sampling points and the lack of seasonal detail, which determines the prospects for further research aimed at spatiotemporally clarifying pollution estimates and developing effective measures to reduce it.

REFERENCES

1. United Nations Environment Programme (UNEP). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People* // Cambridge University Press. 2019. 708 p. 6 (in English)
2. World Health Organization (WHO). *Guidelines for Drinking-water Quality*. WHO Press. 4th ed. 2017. 541 p. (in English)
3. Alloway B.J. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*: Dordrecht: Springer, 2013. 613 p. (in English)
4. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed.: Boca Raton: CRC Press. 2011. 548 p. (in English)
5. *Heavy metal toxicity and the environment* / Tchounwou P.B. [et al.] // *EXS*. 2012. V. 101. 133–164 pp. (in English)
6. *Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize?* / Bolan N. [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2014. V. 266. 141–166 pp. (in English)
7. *Analysis and Evaluation of Environmental Management* / Mukhtarova K. [et al.] // *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2018. V. 9 (1). 167–174 pp. (in English)
8. *Innovative modeling methods for enhanced ESG risk assessment* / Nurgaliyeva A.M. [et al.] // *Journal of Economic Research & Business Administration*. 2024. V. 150 (4). 62–78 pp. (in English)
9. Ali H., Khan E., Sajad M.A. *Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications* // *Chemosphere*. 2013. V. 91. 869–881 pp. (in English)
10. Kumpiene J., Lagerkvist A., Maurice C. *Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments* // *Waste Management*. 2008. V. 28. 215–225 pp. (in English)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. United Nations Environment Programme (UNEP). *Жаһандық экологиялық шолу – GEO-6: Салауатты планета, салауатты адамзат* // Cambridge University Press. 2019. Б. 708 (ағылшын тілінде)
2. World Health Organization (WHO). *Ауыз су сапасы бойынша нұсқаулық*. WHO Press. 4-басылым. 2017. Б. 541 (ағылшын тілінде)
3. Alloway B.J. *Топырақтағы ауыр металдар: топырақтағы микроэлементтер мен металлоидтар және олардың биожегімділігі*: Дордрехт: Springer, 2013. 613 б. (ағылшын тілінде)
4. Kabata-Pendias A. *Топырақ пен өсімдіктердегі микроэлементтер*. 4-басылым: Бока-Ратон: CRC Press, 2011. 548 б. (ағылшын тілінде)

5. Ауыр металдардың уыттылығы және қоршаған орта / Tchouinwou P.V. [және т. б.] // EXS. 2012. Т. 101. Б. 133–164 (ағылшын тілінде)
6. Ауыр металдармен ластанған топырақты қалпына келтіру – мобилизациялау немесе тұрақтандыру? / Bolan N. [және т. б.] // Journal of Hazardous Materials. 2014. Т. 266. Б. 141–166 (ағылшын тілінде)
7. Қоршаған ортаны басқаруды талдау және бағалау / Mukhtarova K. [және т. б.] // Journal of Environmental Management and Tourism. 2018. Т. 9 (1). Б. 167–174 (ағылшын тілінде)
8. Nurgaliyeva A.M., Jondelbayeva A.S., Niyazbekova Sh.U. ESG тәуекелдерін бағалауды жетілдіруге арналған инновациялық модельдеу әдістері // Journal of Economic Research & Business Administration. 2024. Т. 150 (4). Б. 62–78 (ағылшын тілінде)
9. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Ауыр металдарды фиторемедиациялау – тұжырымдамалар мен қолдану // Chemosphere. 2013. Т. 91. Б. 869–881 (ағылшын тілінде)
10. Kumpiene J., Lagerkvist A., Maurice C. Топырақтағы As, Cr, Cu, Pb және Zn элементтерін тұрақтандыру әдістері // Waste Management. 2008. Т. 28. Б. 215–225 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. United Nations Environment Programme (UNEP). Глобальный экологический обзор – GEO-6: Здоровая планета, здоровые люди // Cambridge University Press. 2019. С. 708 (на английском языке)
2. World Health Organization (WHO). Руководство по качеству питьевой воды. WHO Press. 4-е изд. 2017. С. 541 (на английском языке)
3. Alloway B.J. Тяжелые металлы в почвах: микроэлементы и металлоиды в почвах и их биодоступность: Дордрехт: Springer, 2013. 613 с. (на английском языке)
4. Kabata-Pendias A. Микроэлементы в почвах и растениях. 4-е изд.: Бока-Ратон: CRC Press, 2011. 548 с. (на английском языке)
5. Токсичность тяжелых металлов и окружающая среда / Tchouinwou P.V. [и др.] // EXS. 2012. Т. 101. С. 133–164 (на английском языке)
6. Ремедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами – мобилизация или стабилизация? / Bolan N. [и др.] // Journal of Hazardous Materials. 2014. Т. 266. С. 141–166 (на английском языке)
7. Анализ и оценка экологического управления / Mukhtarova K. [и др.] // Journal of Environmental Management and Tourism. 2018. Т. 9 (1). С. 167–174 (на английском языке)
8. Nurgaliyeva A.M., Jondelbayeva A.S., Niyazbekova Sh.U. Инновационные методы моделирования для оценки ESG-рисков // Journal of Economic Research & Business Administration. 2024. Т. 150 (4). С. 62–78 (на английском языке)
9. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Фиторемедиация тяжелых металлов: концепции и применение // Chemosphere. 2013. Т. 91. С. 869–881 (на английском языке)
10. Kumpiene J., Lagerkvist A., Maurice C. Стабилизация As, Cr, Cu, Pb и Zn в почве с использованием добавок // Waste Management. 2008. Т. 28. С. 215–225 (на английском языке)

Information about the authors:

- Ibragimova E.**, Candidate of technical sciences, Acting professor at Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkistan, Kazakhstan), elmira.ibragimova@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-8944-5433>
- Nurlybay A-B.**, Master of pedagogical science, International University of Tourism and Hospitality, Language school (Turkistan, Kazakhstan), aisha-bibi.nurlybai@iuth.edu.kz; <https://orcid.org/0009-0005-5777-3316>
- Berikkyzy K.**, Master of Pedagogical Sciences, Lecturer of Language School International University of Tourism and Hospitality (Turkistan, Kazakhstan), khanshaiym.berikkyzy@iuth.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-6490-5368>
- Abdimutalip N.**, Associate Professor, Ph.D, Acting professor at Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkistan, Kazakhstan), nurlibek.abdimutalip@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-1173-4344>

Авторлар туралы мәліметтер:

- Ибрагимова Э.**, техн. ғылым. канд., доцент, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)
- Нұрлыбай А-Б.**, педагогика ғылымдарының магистрі, Халықаралық туризм және меймандостық университеті, тілдер мектебі (Түркістан қ., Қазақстан)
- Берікқызы К.**, педагогика ғылымдарының магистрі, Халықаралық туризм және меймандостық университеті, Тіл мектебінің оқытушысы (Түркістан қ., Қазақстан)
- Әбдімүтәліп Н.**, доцент, проф. м. а. Ph.D, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің профессор м. а. (Түркістан қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:

- Ибрагимова Э.**, канд. техн. наук, доцент, Международный казахско-турецкий университет им. Х.А. Ясауи (г. Туркестан, Казахстан)
- Нұрлыбай А-Б.**, магистр педагогических наук, Международный университет туризма и гостеприимства, языковая школа (г. Туркестан, Казахстан)
- Берікқызы К.**, магистр педагогических наук, преподаватель языковой школы, Международный университет туризма и гостеприимства (г. Туркестан, Казахстан)
- Абдимуталип Н.**, доцент, Ph.D, и. о. профессора Международного казахско-турецкого университета им. Ходжи Ахмеда Ясауи (г. Туркестан, Казахстан)

Код МРНТИ 87.19.15

*А.С. Нұртаева¹, Р.А. Исаева¹, У.П. Байысбай¹, С.Е. Головатый²

¹Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казакстан),
²«Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

ОЦЕНКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СХЕМ И УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. Статья посвящена оценке экологической безопасности технологических процессов фосфорной промышленности в условиях перехода от традиционных производственных схем к малоотходным технологическим модулям. Объектом исследования являются процессы образования, очистки и утилизации фторсодержащих газов и твердых отходов, возникающих при производстве кормовых обесфторенных фосфатов и аммофоса. Цель работы заключается в обосновании технологических решений, направленных на снижение техногенной нагрузки и повышение ресурсной эффективности производства. Показано, что переработка абсорбционного шлама с применением бентонитовых добавок позволяет получать гранулированный фторид кальция с улучшенными прочностными и термостойкими характеристиками, что обеспечивает экологический и экономический эффект.

Ключевые слова: экологическая безопасность промышленных производств, фосфорная промышленность, фторсодержащие газовые выбросы, очистка и утилизация промышленных отходов, малоотходные технологические модули, абсорбционная очистка газов, переработка шлама фторида кальция, гранулированный фторид кальция, эколого-экономическая эффективность.

Дәстүрлі өндірістік схемалар мен өнеркәсіптік қалдықтарды кәдеге жаратудың салыстырмалы экологиялық қауіпсіздігін бағалау

Аңдатпа. Мақала фосфор өнеркәсібіндегі технологиялық процестердің экологиялық қауіпсіздігін дәстүрлі өндірістік схемалардан аз қалдықты технологиялық модульдерге көшу жағдайында бағалауға арналған. Зерттеу нысаны ретінде жемдік дефторланған фосфаттар мен аммофос өндірісінде пайда болатын фторқұрамды газдар мен қатты қалдықтардың түзілу, тазалау және кәдеге жарату процестері қарастырылған. Жұмыстың мақсаты техногендік жүктемені төмендетуге және өндірістің ресурстық тиімділігін арттыруға бағытталған технологиялық шешімдерді негіздеу болып табылады. Бентонит қоспаларын қолдана отырып абсорбциялық шламды қайта өңдеу беріктік және термиялық төзімділік қасиеттері жақсартылған түйіршіктелген кальций фторидін алуға мүмкіндік беретіні көрсетілді.

Түйінді сөздер: өнеркәсіптік өндірістердің экологиялық қауіпсіздігі, фосфор өнеркәсібі, фторқұрамды газды шығарындылар, өнеркәсіптік қалдықтарды тазалау және кәдеге жарату, аз қалдықты технологиялық модульдер, газдарды абсорбциялық тазалау, кальций фториді шламын қайта өңдеу, түйіршіктелген кальций фториді, экологиялық-экономикалық тиімділік.

Comparative assessment of environmental safety of traditional production schemes and industrial waste utilization

Abstract. The article evaluates the environmental safety of technological processes in the phosphorus industry under the transition from traditional production schemes to low-waste technological modules. The study focuses on the formation, purification, and utilization of fluoride-containing gases and solid wastes generated during the production of defluorinated feed phosphates and ammophos. The aim of the research is to substantiate technological solutions that reduce technogenic load and improve resource efficiency. The methodology includes a comparative assessment of specific toxic mass flows and experimental studies on calcium fluoride granulation. The results indicate that processing absorption sludge with bentonite additives enables the production of granulated calcium fluoride with enhanced strength and thermal resistance, contributing to reduced emissions and waste generation.

Key words: environmental safety of industrial production, phosphorus industry, fluoride-containing gas emissions, industrial waste treatment and utilization, low-waste technological modules, gas absorption purification, calcium fluoride sludge processing, granulated calcium fluoride, environmental and economic efficiency.

Введение

Производственные процессы по выпуску кормовых обесфторенных фосфатов, экстракционной фосфорной кислоты и аммофоса сопровождаются выделением в атмосферу фторсодержащих газов с температурой 180–240 °С.

Основная масса фтористых соединений в отходящих газах предприятий Завода минеральных удобрений (далее «ЗМУ») представлена фтороводородом (свыше 90%) и SiF_4 (до 10 %) [1].

В работе [2] фторсодержащие газы классифицированы по степени загрязнения и возможности извлечения фтора, что определяет выбор методов их очистки и утилизации.

Очистка фторсодержащих газов первой категории основана преимущественно на абсорбции фтористых соединений водой или аммиачными растворами с образованием фторсодержащих солей; степень улавливания фтора при этом достигает 97–99% [3].

Что касается очистки фторсодержащих газов второй категории, применение абсорбционных методов здесь признано неэффективным [4], поскольку при таком подходе наблюдаются значительные потери фтористых соединений. Содержание фтора в газах третьей категории обычно

невелико – порядка 0,1–1,0 г/м³, и их использование в хозяйственных целях экономически неоправданно. Поэтому очистку таких газов от пыли целесообразно проводить одновременно с утилизацией фтора.

В работе [5] подчеркнута необходимость улавливания и утилизации фтористых газов. Предложенный процесс осуществляется в полых скрубберах, оснащенных форсунками с центральным и тангенциальным вводом; в качестве сорбентов применяются волокнистые ионообменные материалы.

В литературе описан ряд методов абсорбционной очистки фторсодержащих газов, включая использование известковых и карбонатных суспензий, содовых растворов и природных сорбентов, обеспечивающих степень удаления фтора до 99,9% [6–7]. Однако ряд технологий характеризуется высокой коррозионной активностью и значительными эксплуатационными затратами.

Методы исследования

В работе [8] рассмотрен двухступенчатый процесс очистки газов от вредных компонентов: на первой стадии применяется раствор ацетата натрия, на второй – известковая суспензия.

Анализ существующих методов очистки фторсодержащих газов показывает, что процессы абсорбции изучены достаточно глубоко: разработаны эффективные составы абсорбентов, установлены механизмы и кинетика абсорбции, проработана конструкция аппаратов. Однако проблема переработки шлама, образующегося при абсорбционных методах очистки, остается недостаточно решенной.

Для удаления фторсодержащих примесей применяются водные, щелочные и солевые абсорбенты, однако использование кислотных и алюминиевых растворов ограничено вследствие высоких коррозионных и эксплуатационных затрат; на практике наибольшее распространение получили водная промывка и щелочная абсорбция.

Для очистки малоконцентрированных и запыленных фторсодержащих газов широко применяется известковое молоко, что обусловлено высокой растворимостью фторсодержащих соединений в воде. Данный метод особенно эффективен при очистке газов, образующихся при производстве кормовых обесфторенных фосфатов по предлагаемой технологии, позволяя получать товарный фторид кальция в качестве продукта газоочистки.

Для лабораторных опытов по переработке на фторид кальция фторсодержащего шлама, полученного из фильтров отделения абсорбционной очистки газов производств трикальцийфосфата и фосфорных удобрений, использован шлам со следующими физическими свойствами:

- насыпной вес сухого материала без утряски (влагосодержание – 1%) – 0,5 г/см³;
- пикнометрическая плотность – 2,5 г/см³;
- угол естественного откоса – 3637.

Фракционный состав, %: 100–150 мкм – 810; 50–100 мкм – 6265; до 50 мкм – 2530. Химический состав шлама представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав фторсодержащего шлама

Кесте 1

Фторқұрамды шламның химиялық құрамы

Table 1

Chemical composition of fluorine-containing sludge

Компонент	CaF ₂	P ₂ O ₅	CaCO ₃	CaO	SiO ₂
Содержание, %	35-40	10-12,5	3-6	25-32	2,5-3

Для обеспечения удобства транспортировки и эффективного обжига фторид кальция целесообразно формировать в гранулы. Наиболее эффективным методом окускования является окатывание с последующим упрочняющим обжигом, обеспечивающее высокую производительность и стабильные физико-механические свойства гранул; для повышения эффективности процесса применяются связующие добавки, не снижающие содержание основного компонента и не вносящие вредных примесей [9–12].

Исследования по получению гранул фторида кальция осуществлены на укрупненно-лабораторном чашевом грануляторе с регулируемым углом наклона и диаметром 0,5 м. Опыты по сушке гранул осуществлены в лаборатор-

ной сушильной камере при 140–160°C, а по упрочняющему обжигу – в лабораторной вертикальной электропечи, теплоизолированной огнеупорным материалом.

Рабочая зона электропечи представляет собой кварцевую трубку, обогреваемую при помощи силитовых стержней. Гранулы фторида кальция размером 12–16 мм в печь загружались в корзине из нихромовой проволоки.

Полученные гранулы испытывались на прочность (статическая и динамическая) и термостойкость.

Для проведения опытов по получению гранулированного фторида кальция использовали шлам, образующийся в фильтрах абсорбционной очистки фтористых газов на заводе минеральных удобрений г. Тараза.

Результаты

Результаты исследований влияния бентонитовых глин на прочность сырых и обожженных гранул фторида кальция, а также на их термостойкость приведены на рис. 1.

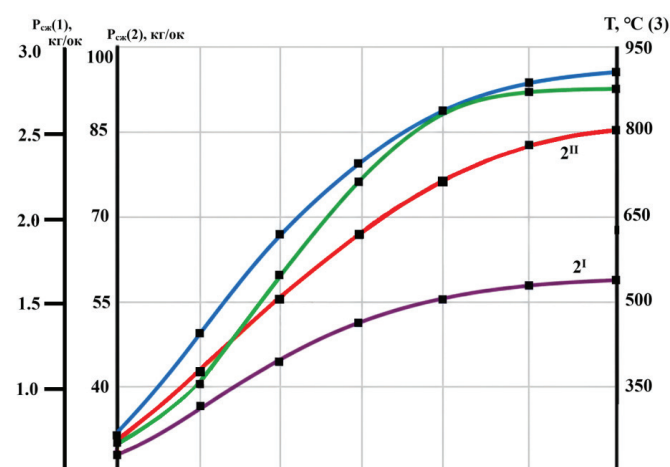


Рис. 1. Влияние бентонитовых глин на прочность сырых (1), обожженных (2) гранул фторида кальция и их термостойкость (3). 2' – обожженный при температуре 700 °C; 2'' – обожженный при температуре 900 °C.

Сурет 1. Бентонит саздарының кальций фторидінің шикі (1), күйдірілген (2) түйіршіктерінің беріктігіне және олардың термиялық төзімділігіне (3) әсері. 2' – 700 °C температурада күйдірілген; 2'' – 900 °C температурада күйдірілген.

Figure 1. Effect of bentonite clays on the strength of raw (1), calcined (2) calcium fluoride granules and their thermal resistance (3). 2' – calcined at a temperature of 700 °C; 2'' – calcined at a temperature of 900 °C.

Эксперименты по окомкованию фторида кальция показали, что добавление бентонитовых глин повышает пластичность материала, улучшает его смачиваемость, увеличивает капиллярное поглощение влаги и способствует формированию большего числа межчастичных контактов за счет пространственных мостиков. Важную роль бентонит играет и на стадии обжига: содержащиеся в нем ионы алюминия, кальция и магния, насыщая поровое пространство, формируют реакционную среду и образуют легко-

плавкие соединения, обеспечивающие прочное сцепление структурных элементов гранулы.

Опыты по сушке гранул показали, что оптимальным является режим 60–80 минут при температуре 140–160 °С. При таких условиях масса влаги снижается до 3–4%, а гранулы приобретают удовлетворительную прочность.

Как видно из рис. 1, в отсутствие добавок прочность сырых гранул на сжатие была менее 1 кг/ок, а при добавлении бентонитовых глин она повысилась до 2,8 кг/ок. Прочность гранул без добавок, обожженных при температурах 700 и 900 °С, была в пределах 35–38 кг/ок.

С введением бентонитовой глины прочность обожженных гранул также заметно увеличивается. Наиболее рациональным, на наш взгляд, является ее содержание в пределах 1,5–1,8%, при котором получают товарный гранулированный фторид кальция с прочностью на сжатие 80–84 кг/гранулу (при температуре обжига 900 °С).

Использование бентонитовой глины значительно повышает и термостойкость гранул фторида кальция. Так, при отсутствии добавок термостойкость составляет 330–360 °С, тогда как при введении 1,5% глины она увеличивается до 850–900 °С.

Испытания динамической прочности показали, что сырые гранулы выдерживают 3–7 ударов при падении с высоты 0,5 м, а высушенные – до 12–15 ударов. Таким образом, проведенные исследования подтвердили, что добавление бентонитов Кынгракского месторождения благодаря высокому содержанию ионов алюминия, кремния, кальция и магния способствует насыщению поровой жидкости легкоплавкими соединениями. Это приводит к формированию плотной и прочной структуры гранул фторида кальция, обеспечивающей хорошие прочностные свойства и высокую термостойкость конечного продукта.

Оценка относительной экологичности традиционных схем производств и малоотходных технологических модулей

Сравнительная оценка удельных потоков токсичной массы для традиционной технологии и малоотходных технологических модулей приведена на рисунках 2–3. Относительная экологичность (А) исследуемых технологических процессов рассчитывалась по формуле:

$$A = 1 - \frac{M_o}{M_c + M_p}, \quad (1)$$

где M_c , M_p , M_o – соответственно, масса сырья, вспомогательных ресурсов и отходов в единицах токсичной массы (етм).

Были сопоставлены данные полученных диаграмм удельных потоков токсичной массы и выполнена оценка относительной экологичности рассматриваемых производств.

В традиционной схеме производства КОФ основными источниками токсичных потоков являются фторсодержащие отходящие газы, шлам абсорбционного отделения и пылеунос, что обуславливает повышенную нагрузку на окружающую среду.

В случае получения КОФ по МТМ шлам из фильтров абсорбционного отделения полностью перерабатывается

в товарный фторид кальция. Также уменьшается объем выбросов фторсодержащих газов и исключается пылеунос благодаря измененной конструкции технологического оборудования.

Ниже приведены показатели А для традиционной схемы и МТМ КОФ:

$$A_{\text{Трад}}^{\text{КОФ}} = 1 - \frac{(29 + 51 + 70 + 263 + 11)}{(1170 + 342 + 79)} = 0,73$$

$$A_{\text{МТМ}}^{\text{КОФ}} = 1 - \frac{(22 + 2 + 3)}{(1170 + 96,5 + 172)} = 0,98$$

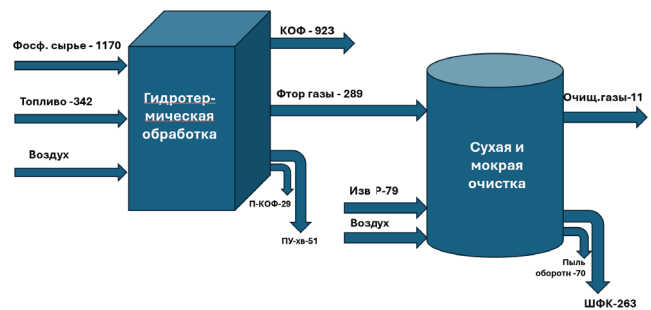


Рис. 2. Диаграмма удельных потоков относительной токсичной массы производства кормовых обесфторенных фосфатов по традиционной технологической схеме.

Сурет 2. Дәстүрлі технологиялық схема бойынша жемдік дефторланған фосфаттар өндірісінің салыстырмалы улы массаның меншікті ағындарының диаграммасы.

Figure 2. Diagram of specific flows of relative toxic mass in the production of defluorinated feed phosphates using a traditional technological scheme.

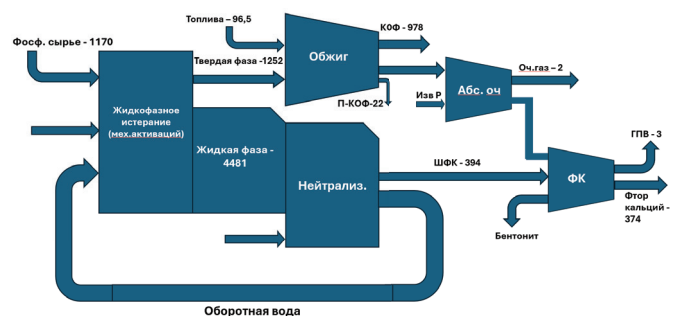


Рис. 3. Диаграмма удельных потоков относительной токсичной массы производства кормовых обесфторенных фосфатов по схеме малоотходного технологического модуля.

Сурет 3. Аз қалдықты технологиялық модуль схемасы бойынша жемдік дефторланған фосфаттар өндірісінің салыстырмалы улы массаның меншікті ағындарының диаграммасы.

Figure 3. Diagram of specific flows of relative toxic mass in the production of defluorinated feed phosphates using a low-waste technological module scheme.

Производительность МТМ «КОФ» и МТМ аммофос определяется уровнем освоения технологии и производственными возможностями конкретного предприятия.

Сравнительная оценка альтернативных вариантов осуществляется на основе минимизации приведенных затрат при выпуске основного и попутных продуктов при условии сопоставимого качества и равной техногенной нагрузки на окружающую среду.

Для предприятий фосфорной подотрасли характерна неполная загрузка производственных мощностей, обусловленная сырьевыми и организационными факторами, что повышает требования к стабильности и оптимизации технологических процессов.

Оценка эколого-экономических показателей разработок

Экономическая оценка результатов комплексной экологической оптимизации деятельности ЗМУ основана на определении совокупного экономического эффекта, достигаемого за счет рационального использования сырья и вспомогательных ресурсов.

В рамках блочно-модульного принципа основные технологические процессы объединяются в единый производственный блок, что обеспечивает упорядоченность материальных потоков и снижение потерь.

Вспомогательные производства целесообразно объединять в отдельный блок с локальной системой очистки сточных вод, что снижает затраты на их обработку и создает условия для утилизации загрязняющих компонентов. Компактная блочно-модульная компоновка производств, включая административно-бытовые здания, позволяет сократить протяженность коммуникаций и количество потенциальных источников аварийного загрязнения, повышая экологическую надежность предприятия.

Принципы создания малоотходных технологических модулей

Одним из ключевых критериев при разработке малоотходных технологических модулей является максимальное извлечение ценных и сопутствующих компонентов с получением дополнительной товарной продукции. Экономическая эффективность малоотходной схемы оценивается по величине совокупного экономического эффекта, учитывающего стоимость товарной продукции, предотвращенный экологический ущерб и затраты на ее получение, что позволяет определить ожидаемый эффект от внедрения разработок по комплексной экологической оптимизации деятельности предприятия.

Экономический эффект внедрения технологии кормового обесфторенного фосфата

Результаты экономических расчетов показали, что внедрение малоотходного технологического модуля производства кормового обесфторенного фосфата обеспечивает существенный экономический эффект. Он достигается за счет снижения удельных затрат на энергетические и материальные ресурсы, сокращения капитальных и эксплуатационных расходов, а также уменьшения численности обслуживающего персонала. Совокупный экономический эффект от внедрения разработанной технологии подтверждает ее целесообразность и эффективность при промышленной реализации.

Внедрение малоотходного технологического модуля производства кормового обесфторенного фосфата со-

провождается значительным снижением техногенной нагрузки на окружающую среду. Количество образующихся фторсодержащих газов уменьшается в несколько раз, полностью устраняется пылеунос из-под холодных воронок и шахты ЭТА, а абсорбционный шлам фильтров газоочистки полностью перерабатывается в товарный гранулированный фторид кальция.

Дополнительный экономический эффект достигается за счет переработки абсорбционного шлама, ликвидации накопления фосфогипса и других отходов, а также снижения эколого-экономического ущерба от загрязнения водных объектов и почв. Совокупный результат подтверждает экологическую и экономическую целесообразность внедрения разработанных технологических решений.

Обсуждение результатов

Полученные результаты обусловлены комплексным характером предложенных малоотходных технологических модулей, в которых процессы очистки газов, переработки отходов и получения товарной продукции интегрированы в единую схему. Снижение удельных потоков токсичной массы достигается за счет сокращения выбросов фторсодержащих газов, устранения пылеуноса и полного вовлечения абсорбционного шлама в повторный технологический цикл. Улучшенные прочностные и термостойкие характеристики гранул фторида кальция связаны с применением бентонитовых глин, способствующих формированию плотной структуры материала.

Преимущества предложенных решений обеспечиваются использованием эффективных абсорбционных систем, оптимизацией режимов гранулирования и термической обработки, а также применением доступных природных связующих добавок. Это позволяет повысить степень улавливания фтора и обеспечить стабильное качество получаемого товарного продукта.

Преимущество данного исследования по сравнению с аналогами заключается в совмещении экологической и эколого-экономической оценки с экспериментальным подтверждением возможности переработки фторсодержащего шлама в товарную продукцию, что обеспечивает дополнительный экологический и экономический эффект.

К ограничениям исследования относится привязка экспериментальных данных к условиям конкретного предприятия и масштабам проведенных испытаний. Перспективы дальнейших исследований связаны с масштабированием разработанных решений, их адаптацией к различным типам фосфатного сырья и уточнением показателей экологической эффективности при длительной эксплуатации.

Заключение

Выполненные исследования по оптимизации вспомогательных технологических процессов ЗМУ и эколого-экономической оценке результатов показали, что повышение экологичности производств может быть достигнуто за счет внедрения узла доочистки сточных вод методом карбонизации с использованием флокулянтов. Реализация данного решения обеспечивает интенсификацию осаждения твердой фазы и снижение техногенной нагрузки на окружающую среду.

Соединения фтора, аккумулируемые в шламе абсорбционного отделения, целесообразно перерабатывать в товарный фторид кальция, получаемый в гранулированном виде. Установлено, что применение бентонитовых глин способствует повышению прочностных характеристик гранул, что расширяет возможности утилизации фторсодержащих отходов и повышает эколого-экономическую эффективность производства.

Благодарность

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры «Экология» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауезова за методическую поддержку, научные консультации и содействие в обсуждении результатов исследования. Признательность также выражается специалистам, оказавшим помощь в проведении экспериментальных работ и интерпретации полученных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эшлан П.А. Улавливание и переработка фторсодержащих выбросов в химической промышленности // *Химическая технология*. 2016. № 4. С. 201–207 (на русском языке)
2. Бишимбаев В.К., Балтабаев Л.Ш. Экологические аспекты переработки фосфатного сырья: Алматы: Ғылым, 2017. 256 с. (на русском языке)
3. Тарат Э.Я., Воробьев О.Г. Очистка газов в производстве фосфорных удобрений: М.: Химия, 2018. 312 с. (на русском языке)
4. Исаева Р.К., Нуртаева А. Экологическая оценка малоотходных технологий в фосфорной промышленности // *Экология и промышленность Казахстана*. 2019. № 2. С. 45–52 (на русском языке)
5. Смирнов Д.С., Белов М.И. Современные методы утилизации фторсодержащих отходов // *Химическая промышленность сегодня*. 2020. № 6. С. 33–39 (на русском языке)
6. Архипова Л.И. Абсорбционные методы очистки газовых выбросов: СПб.: Профессия, 2015. 198 с. (на русском языке)
7. Zhang Y., Li H., Wang X. Удаление фтора из промышленных отходящих газов с использованием абсорбционных технологий // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Т. 6. № 4. С. 4752–4760 (на английском языке)
8. Olejarczyk M., Niesler A., Knapik E. (2022). Управление твердыми отходами, содержащими фтор, – обзор. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9147173/> (на английском языке)
9. Szulc A., Skotnicka E., Gupta M.K., Królczuk J.B. (2024). Процессы агломерации порошкообразных сыпучих материалов – современный обзор методов гранулирования и областей применения. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119092> (на английском языке)
10. González A., Romero M. Малоотходные технологии в химической промышленности: экологическая и экономическая оценка // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Т. 122. С. 12–20 (на английском языке)
11. Smith D., Allen P. Комплексная экологическая оценка систем очистки промышленных газов // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. Т. 104. С. 45–53 (на английском языке)
12. Рябова Н.Е., Стариков В.Ф. Методы абсорбционной очистки газов от фтористого водорода в производстве фосфорных удобрений // *Фосфорные удобрения и химическая экология*. 2020. Т. 38. № 10. С. 56–60 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Эшлан П.А. Химия өнеркәсібіндегі фторқұрамды шығарындыларды ұстау және қайта өңдеу // *Химиялық технология*. 2016. № 4. Б. 201–207 (орыс тілінде)
2. Бишимбаев В.К., Балтабаев Л.Ш. Фосфатты шикізатты қайта өңдеудің экологиялық аспектілері: Алматы: Ғылым, 2017. 256 б. (орыс тілінде)
3. Тарат Э.Я., Воробьев О.Г. Фосфор тыңайтқыштары өндірісіндегі газдарды тазалау: М.: Химия, 2018. 312 б. (орыс тілінде)
4. Исаева Р.К., Нуртаева А. Фосфор өнеркәсібіндегі аз қалдықты технологияларды экологиялық бағалау // *Қазақстанның экологиясы және өнеркәсібі*. 2019. № 2. Б. 45–52 (орыс тілінде)
5. Смирнов Д.С., Белов М.И. Фторқұрамды қалдықтарды кәдеге жаратудың заманауи әдістері // *Химия өнеркәсібі бүгін*. 2020. № 6. Б. 33–39 (орыс тілінде)
6. Архипова Л.И. Газ шығарындыларын абсорбциялық тазалау әдістері: СПб.: Профессия, 2015. 198 б. (орыс тілінде)
7. Zhang Y., Li H., Wang X. Өнеркәсіптік шығарындылар газдарынан фторды абсорбциялық технологиялар арқылы жою // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Т. 6. № 4. Б. 4752–4760 (ағылшын тілінде)
8. Olejarczyk M., Niesler A., Knapik E. (2022). Фторы бар қатты қалдықтарды басқару – шолу. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9147173/> (ағылшын тілінде)
9. Szulc A., Skotnicka E., Gupta M.K., Królczuk J.B. (2024). Сусымалы материалдарды ұнтақ агломерациялау процесі – түйіршіктеу әдістері мен қолдану салаларына арналған қазіргі жағдайға шолу. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119092> (ағылшын тілінде)
10. González A., Romero M. Химия өнеркәсібіндегі аз қалдықты технологиялар: экологиялық және экономикалық бағалау // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Т. 122. Б. 12–20 (ағылшын тілінде)
11. Smith D., Allen P. Өнеркәсіптік газдарды тазалау жүйелерінің кешенді экологиялық бағасы // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. Т. 104. Б. 45–53 (ағылшын тілінде)

12. Рябова Н.Е., Стариков В.Ф. Фосфор тыңайтқыштары өндірісінде фторсутекті газдарды абсорбциялық тазалау әдістері // Фосфор тыңайтқыштары және химиялық экология. 2020. Т. 38. № 10. Б. 56–60 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Eshlan P.A. Ulavlivanie i pererabotka ftorsoderzhashchikh vybrosov v khimicheskoi promyshlennosti [Capture and processing of fluoride-containing emissions in the chemical industry], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology]. 2016. No. 4. 201–207 pp. (in Russian)
2. Bishimbaev V.K., Baltabaev L.Sh. *Ekologicheskie aspekty pererabotki fosfatnogo syrya* [Environmental aspects of phosphate raw material processing]. Almaty: Gylym, 2017. 256 p. (in Russian)
3. Tarat E.Ya., Vorobyov O.G. *Ochistka gazov v proizvodstve fosfornykh udobrenii* [Gas purification in the production of phosphorus fertilizers]. Moscow: Khimiya, 2018. 312 p. (in Russian)
4. Issayeva R.K., Nurtayeva A. *Ekologicheskaya otsenka malootkhodnykh tekhnologii v fosfornoj promyshlennosti* [Environmental assessment of low-waste technologies in the phosphorus industry], *Ekologiya i Promyshlennost Kazakhstana* [Ecology and industry of Kazakhstan]. 2019. No. 2. 45–52 pp. (in Russian)
5. Smirnov D.S., Belov M.I. *Sovremennye metody utilizatsii ftorsoderzhashchikh otkhodov* [Modern methods for utilization of fluoride-containing waste] *Khimicheskaya promyshlennost segodnya* [Chemical industry today]. 2020. No. 6. 33–39 pp. (in Russian)
6. Arkhipova L.I. *Absorbtsionnye metody ochistki gazovykh vybrosov* [Absorptive methods for purification of gaseous emissions]. Saint-Petersburg: Professiya, 2015. 198 p. (in Russian)
7. Zhang Y., Li H., Wang X. *Fluoride removal from industrial exhaust gases using absorption technologies* // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. V. 6. No. 4. 4752–4760 pp. (in English)
8. Olejarczyk M., Niesler A., Knapik E. (2022). *Management of solid waste containing fluoride – A review* // *Environmental Science and Pollution Research*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9147173/> (in English)
9. Szulc A., Skotnicka E., Gupta M.K., Królczyk J.B. (2024). *Powder agglomeration processes of bulk materials – A state of the art review on different granulation methods and applications*. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119092> (in English)
10. González A., Romero M. *Low-waste technologies in chemical industry: environmental and economic evaluation* // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. V. 122. 12–20 pp. (in English)
11. Smith D., Allen P. *Integrated environmental assessment of industrial gas cleaning systems* // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. V. 104. 45–53 pp. (in English)
12. Ryabova N.E., Starikov V.F. *Metody absorbtsionnoi ochistki gazov ot ftoristogo vodoroda v proizvodstve fosfornykh udobrenii* [Absorption methods for purification of hydrogen fluoride gases in phosphorus fertilizer production], *Fosfornye udobreniya i khimicheskaya ekologiya* [Phosphorus Fertilizers and Chemical Ecology]. 2020. V. 38. No. 10. 56–60 pp. (in Russian)

Сведения об авторах:

Нұртаева А.С., докторант, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казакстан), nurtayeva94@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0274-5976>

Исаева Р.А., к. т. н., доцент, преподаватель, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казакстан), razia_68@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-2675-1987>

Байысбай У.П., к. т. н., доцент, декан, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казакстан), omirbek_7819@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4209-3087>

Головатый С.Е., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента, «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь), GolovatySE@bsu.by; <https://orcid.org/0000-0001-8039-1926>

Авторлар туралы мәліметтер:

Нұртаева А.С., докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

Исаева Р.А., техника ғылымдарының кандидаты, доцент, оқытушы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

Байысбай У.П., техника ғылымдарының кандидаты, доцент, декан, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

Головатый С.Е., ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь мемлекеттік университетінің «А.Д. Сахаров атындағы Халықаралық мемлекеттік экологиялық институты» экологиялық мониторинг және менеджмент кафедрасының менгерушісі (Минск қ., Беларусь)

Information about the authors:

Nurtayeva A.S., Doctoral student, South Kazakhstan University named after M. Auevov (Shymkent, Kazakhstan)

Issayeva R.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lecturer, South Kazakhstan University named after M. Auevov (Shymkent, Kazakhstan)

Baiysbay U.P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean, South Kazakhstan University named after M. Auevov (Shymkent, Kazakhstan)

Golovaty S.E., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Monitoring and Management, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Belarus)

Масштабное событие горной отрасли в России

Рудник

официальная поддержка:



Минпромторг
России



Торгово-промышленная
палата Российской Федерации



Правительство
Свердловской области



НП «Горнопромышленники
России»

27–29 октября 2026
Екатеринбург

11-я международная выставка современных
технологий, оборудования и спецтехники
для горнодобывающей промышленности

принять участие



посетить



МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»
ЭКСПО-бульвар, дом 2
(342) 204-03-17

mine.proexpo.ru



PRO
ЭХРО

ПАМЯТИ ГУРЬЕВСКОГО БОРИСА АЛЕКСЕЕВИЧА 19.09.1939 – 02.04.2026

На 87-м году жизни ушел от нас в мир иной один из лучших горных инженеров нашего советского прошлого Борис Алексеевич Гурьевский. Провожая его прах в последний путь, мы, с кем он учился, с кем бегал на лекции, с кем трудился, с кем дружил, вспоминаем веселого, остроумного, талантливое, всегда желанного собеседника в разговорах на самые разнообразные темы, которого судьба и его неуемная страсть к знаниям одарила и поэтическим даром, и умением читать увлекательные лекции о недрах Земли и необходимости дружбы с ними, и говорить об обыденных вещах, сегодня скорбим, склоняем свои седые и лысые головы, и говорим: «Борис, прощай!».

Вся его жизнь и трудовая биография, продлившаяся с 1962 г. и более 50-ти лет, были наполнены творческой работой, на каком бы этапе жизненного пути он не находился: на школьной парте в г. Петропавловске, где он родился 19 сентября 1939 г., в стенах Щучинского горно-металлургического техникума, куда он поступил в 1953 г. и окончил его с отличием в 1957 г., и в аудиториях Казахского горно-металлургического (позднее – политехнического) института, откуда он выпорхнул на самостоятельную стезю с Красным Дипломом горного инженера в 1957 г., и далее, став известным и на производстве, и на научном поприще.

В период 1962–1963 гг. он работал в должности горного мастера, а затем помощника начальника участка капитальной вскрыши Иртышского разреза № 2 треста «Иртышуголь» Экибастузского угольного комплекса. Начиная с 1964 г. занимался педагогической, научной, научно-организационной и общественной деятельностью. В период 1964–1968 гг. он преподавал цикл горных дисциплин на кафедре открытых работ Индустриального факультета КазПТИ в г. Рудном (ныне Рудненский индустриальный университет). В 1968 г. поступил в очную аспирантуру Института горного дела Академии наук Казахской ССР. В 1970 г. досрочно ее закончил и по результатам защиты диссертации ему присвоена ученая степень кандидата технических наук.

Работая в ИГД АН Каз. ССР в должности старшего научного сотрудника лаборатории открытых горных работ, его научные интересы были связаны с решением актуальных проблем проектирования, строительства и эксплуатации крупных глубоких карьеров Казахстана (Качарского, Соколовского, Сарбайского и др.). Профессиональные знания и опыт Б.А. Гурьевского в этот период были востребованы в совместном с институтом Ленгипроруда обосновании целесообразности открытой разработки Качарского железорудного месторождения, при его участии в качестве эксперта ГКЗ СССР в решении вопроса постановки на баланс разведанных запасов Коксайского меднорудного месторождения. Результаты исследований этого периода опубликованы в 41 научном труде в виде статей, докладов на научных конференциях республиканского и союзного уровня и трех монографиях.

В 1978 г. Б.А. Гурьевский перешел в Минвуз Казахской ССР, где возглавил Отдел планирования и координации НИР во вновь образованном Управлении научно-исследовательских работ, а с 1987 г. назначается начальником Главного управления научно-исследовательских работ Минобразования.

В этот период под его руководством и при его участии Управлением усилено внимание развитию в вузах республики фундаментальных исследований по приоритетным научным направлениям, эффективному использованию научного потенциала вузов в разработке государственных и республиканских научно-технических программ, внедрению новых форм организации их результатов, развитию интеграционных связей вузовской и академической науки и производства. За проявленные в работе профессионализм, компетентность, хорошее знание принципов и путей совершенствования организации вузовской науки был награжден нагрудным знаком Высшей школы СССР «За отличные успехи в работе», Почетной грамотой Минвуза Казахской ССР.

В 1991 г. Борис Алексеевич возвратился к педагогической деятельности в стенах Казахского политехнического института, а ныне Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, где в должности доцента кафедры открытых горных работ как высококвалифицированный педагог передал свои знания и опыт молодому поколению будущих горных инженеров, активно участвовал в разработке Государственного стандарта образования по специальности «Горное дело», типовых и рабочих учебных планов и программ, учебно-методических комплексов по спецдисциплинам. В 1993 г. Высшей аттестационной комиссией ему было присвоено ученое звание доцента по специальности «Горное дело». В эти годы он в качестве эксперта Госкомимущества РК участвовал в проведении мониторинга деятельности Бакырчикского ГОКа, карьеров Тургайского и Краснооктябрьского бокситовых рудоуправлений.

Одновременно Борис Алексеевич продолжал заниматься научными исследованиями в области совершенствования ресурсосберегающей системы адаптивного проектирования карьеров. Результаты исследований в этом направлении представлены в виде докладов на международных горных конгрессах и конференциях в Казахстане и за рубежом (Россия, Украина, Греция, Турция, Индия). В 2009 г. он был избран действительным членом Международной академии информатизации.

В целом Б.А. Гурьевским опубликовано более 110 работ, в том числе более 31 учебно-методической разработки, направленной на повышение качества учебного процесса. Он награжден Почетной грамотой КазНТУ, пользовался заслуженным авторитетом и уважением сотрудников института.

Прощаясь с Борисом Алексеевичем, мы вспоминаем, какую прекрасную и трудовую семью он создал за эти годы со своей супругой Татьяной, воспитав детей и принимая активное участие в становлении уже внуков.

Друзья, коллеги, однокурсники, горная общественность, редакция «Горного журнала Казахстана» в эти скорбные дни выражает искренние соболезнования семье дорогого Бориса Алексеевича Гурьевского.



ПАМЯТИ ГУДКОВА БОРИСА ВАСИЛЬЕВИЧА 16.09.1951 – 13.04.2026

С глубоким прискорбием сообщаем, что на 75-м году ушел из жизни Борис Васильевич Гудков.

Он родился в городе Ярославле. Детство и юность провел вместе с родителями в поселке Байжансай. Получил высшее образование, окончив Чимкентский политехнический институт.

Создал семью. Его супруга, окончив педагогический институт, посвятила себя преподаванию в школе № 16 города Кентау.

Трудовая жизнь Бориса Васильевича была неразрывно связана с промышленностью. Он работал в городе Кентау на руднике «Глубокий» комбината «Ачполиметалл». В 1984 году был приглашен Маратом Жакуповичем Битимбаевым в Восточный Казахстан для участия в развитии Иртышского комбината

Вернувшись в Кентау, занял должность заместителя главного энергетика комбината, где проявил себя как высококвалифицированный специалист и преданный своему делу человек. Он искренне любил свою работу и отдавал все силы развитию города, в котором жил вместе с семьей.

В 1994 году, в связи с историческими переменами, Борис Васильевич с семьей репатриировался в Израиль, где прожил более тридцати лет. До последних дней он продолжал тру-

диться по своей специальности, оставаясь верным своему делу.

Похоронен с почестями на городском кладбище.

Пусть душа его обретет покой.

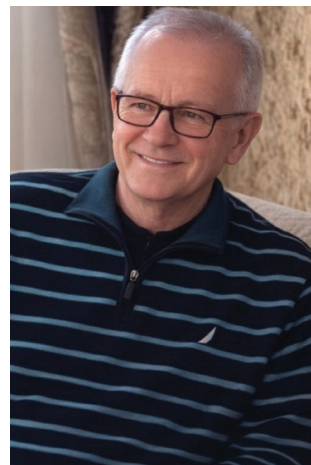
Он оставил после себя любящую семью: супругу, двух сыновей и шестерых внуков.

Борис Васильевич был человеком чести, настоящим мужчиной, специалистом высшего класса, носил в себе доброе сердце, умел дружить.

Светлая память о Борисе Васильевиче навсегда сохранится в наших сердцах.

Помним. Скорбим. Любим.

Ветераны комбината – Джумабаев И.Д., Битимбаев М.Ж., Куштаев А.Ж., Габченко В.Н., Сансызбаев Б.З., Аккулов Ж., Ахмамбетов Б.О., Рудой Н.М., Хаев В.А.



ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И УСЛОВИЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ в редакцию периодического печатного издания «Горный журнал Казахстана»

1. «Горный журнал Казахстана» принимает к публикации оригинальные статьи научного и научно-технического содержания, отражающие результаты исследовательской и научной деятельности, имеющие рекомендации к практическому применению решаемых вопросов, а также статьи обзорного характера, отвечающие критериям первичной научной публикации (полный перечень рубрик указан на сайте *minmag.kz*).

2. Основные требования к статьям, представленным для публикации в журнале:

- набор статьи производится в текстовом редакторе Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем с полуторным интервалом;
- общий объем статьи, включая рисунки, таблицы, метаданные не должен превышать 8 печатных страниц;
- статьи (за исключением обзоров), должны содержать новые научные результаты;
- статья должна соответствовать тематике (см. п. 1), научному уровню журнала;
- статья должна быть оформлена в полном соответствии с требованиями, отраженными в п. 3;
- статья может быть представлена на казахском, русском или английском языке;
- в редакцию представляется окончательный, **тщательно выверенный вариант** статьи, исключающий необходимость постоянных доработок текста на этапах издательского процесса;
- перед отправкой статьи в редакцию журнала авторам необходимо проверить текст на предмет отсутствия плагиата.

3. Структура статьи должна содержать следующие разделы:

- код МРНТИ (ГРНТИ <http://grnti.ru/?p1=52>) – шестизначный;
- название статьи (сокращения не допускаются, не допускается использование аббревиатур и формул; максимальное количество слов 10-12) должно быть информативным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы, предоставляется на казахском, русском и английском языках;
 - инициалы и фамилии авторов; статья должна иметь не более 4 авторов; знаком «*» указывается автор-корреспондент;
 - сведения о каждом авторе (ученая степень, ученое звание, должность, место основной работы, город, страна, контактные данные (адрес электронной почты), ORCID ID) предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - полное название организации (-й), где работают авторы (с указанием ведомственной принадлежности);
 - аннотация в соответствии с требованиями международных баз данных должна достаточно полно раскрывать содержание статьи, включая характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению материалами. Аннотация предоставляется на казахском, русском и английском языках объемом не менее 700 и не более 900 символов;
 - ключевые слова в количестве 6...10 устойчивых словосочетаний, по которым в дальнейшем будет выполняться поиск статьи (сокращения и аббревиатуры не допускаются): ключевые слова отражают специфику темы, объект и результаты исследования и предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - текст статьи, содержащий следующие разделы (введение, методы/исследования, результаты, обсуждение результатов, заключение/ выводы);
 - список использованных источников (10...12), в том числе не менее 3 зарубежных не ранее 2015 года, предоставляется на казахском, русском и английском языках.

РИСУНКИ должны иметь расширение графических редакторов CorelDraw, Photoshop, Illustrator и т. п.). Фотографии должны быть предельно четкими в графическом формате (TIFF, JPEG, CDR) с разрешением не менее 300 dpi. Все буквенные и цифровые обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисуночном текстах. Надписи и другие обозначения на графиках и рисунках должны быть четкими и легко читаемыми. **ПОДПИСИ К РИСУНКАМ и ЗАГОЛОВКИ ТАБЛИЦ ОБЯЗАТЕЛЬНЫ.** Оформляются отдельным блоком на казахском, русском и английском языках.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ следует набирать в формульном редакторе MathTypes Equation или MS Equation, греческие и русские буквы в формулах набирать прямым шрифтом (опция текст), латинские – курсивом. **Обозначения величин и простые формулы в тексте и таблицах набирать как элементы текста** (а не как объекты формульного редактора). Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении. Нумерация формул сквозная.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ составляется в порядке цитирования и оформляется в строгом соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Ссылки на литературу в тексте отмечаются по мере их появления порядковыми номерами в квадратных скобках. Список приводится на казахском, русском и английском языках с указанием в скобках оригинала публикации. Образец оформления литературы и транслитерации размещен на сайте *minmag.kz*.

4. Условия приобретения журналов авторами.

С автором(ами) заключается договор о приобретении 10 (десяти) экземпляров журнала согласно установленным расценкам на текущий год, которые он(они) имеют право распространять среди горной общественности. После оплаты статья публикуется в номере журнала согласно очередности.