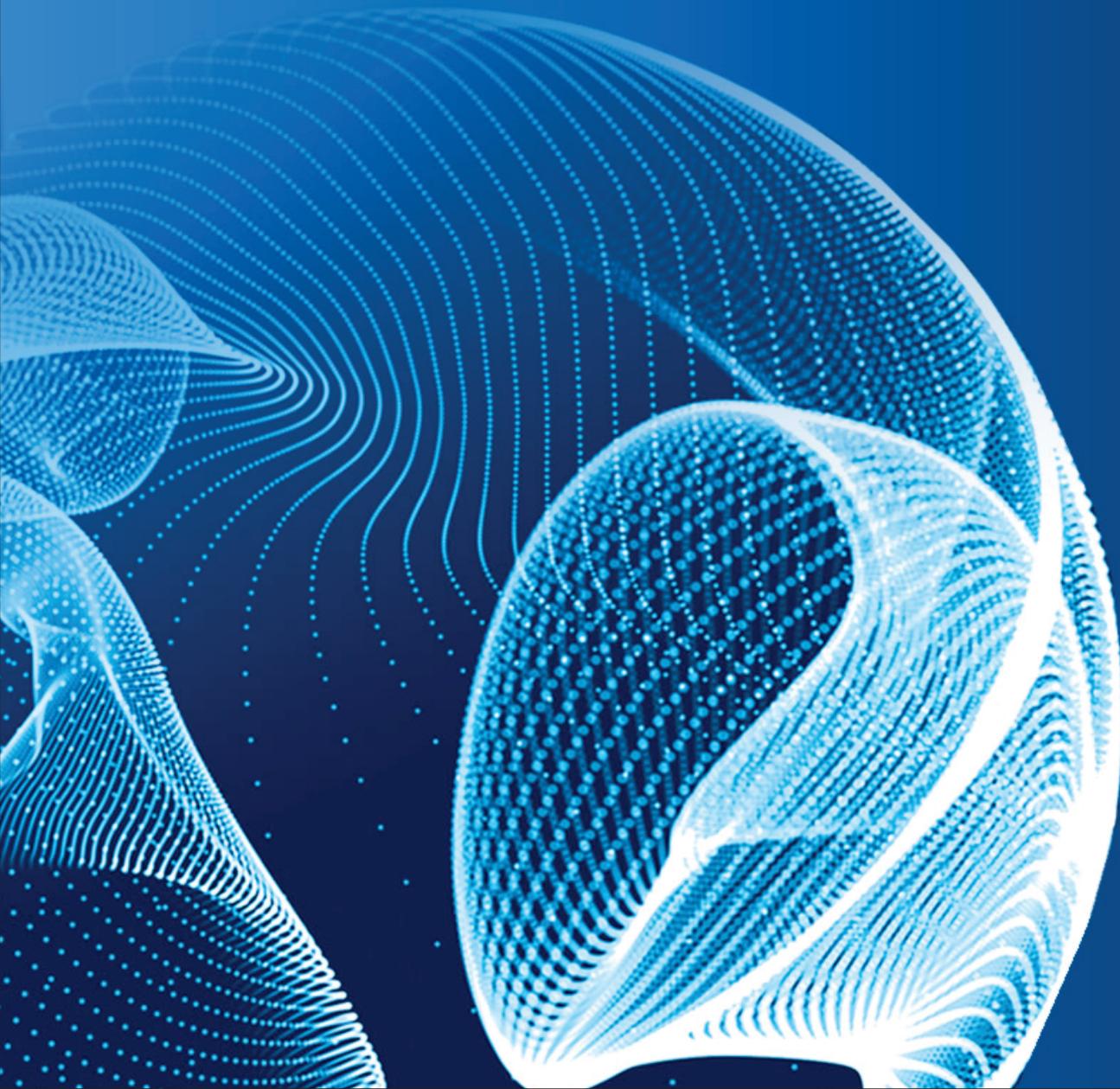


ENGINEERING JOURNAL of Satbayev University

Volume 144 (Issue 3)
June 2022



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN



ENGINEERING JOURNAL OF SATBAYEV UNIVERSITY

144 (3)

EDITORIAL TEAM

Ata Utku AKÇİL, PhD, professor, Suleyman Demirel University, Turkey

Alma A. Bekbotaeva, Ph.D., associate professor, Geology and Oil-gas Business Institute, KazNRTU, Kazakhstan

Adilkhan B. Baibatsha, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, Geology and Oil-gas Business Institute, KazNRTU, Kazakhstan

Atac Bascetin, Phd, professor, Istanbul Technical University, Turkey

Madina B. Barmenshinova, candidate of technical sciences, Mining and Metallurgical Institute, KazNRTU, Kazakhstan

Omirsirik S. Baigenzhanov PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institut, KazNRTU, Kazakhstan

Tatiana A. Chepushtanova PhD, candidate of technical sciences, Mining and Metallurgical Institute, KazNRTU, Kazakhstan

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, habilitation doctor, professor, Adam Mickiewicz University, Poland

Vasily G. Lozinsky, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

Serik K. Moldabaev, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute, KazNRTU, Kazakhstan

Brajendra Mishra, PhD, professor, Worcester Polytechnic Institute, USA

Kanai B. Rysbekov, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute, KazNRTU, Kazakhstan

Seltmann Reimar, PhD, professor, Director of the Earth Sciences Department, Center for Russian and Central Asian Mineral Research (CERCAMS), Great Britain

Atsushi Shibayama, Ph.D., professor, Akita University, Japan

Olena O. Sdvyzhkova, doctor of technical sciences, professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

Peng Suping, professor, academician, Chinese Mining University, China

Khalidilla A. Yusupov, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute, KazNRTU, Kazakhstan

Executive secretary

Gulziya Burshukova, PhD, associate professor, KazNRTU, Kazakhstan

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ

Ата Утку (Ata Utku AKÇIL), Ph.D., профессор, Сүлейман Демирел Университеті, Түркия

Бекботаева Алма Анарбекқызы, Ph.D., қауымдастырылған профессор, Геология және мұнай-газ ісі институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Байбатша Әділхан Бекділдаұлы, г-м.ғ.д., профессор, Геология және мұнай-газ ісі институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Атак Баскетин (Atac Bascetin), Ph.D., профессор, Ыстамбұл техникалық университеті, Түркия

Барменшинова Мадина Богембаевна, т.ғ.к., Тау-кен-металлургия институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Байгенженов Өмірсерік Сабыржанұлы, Ph.D., қауымдастырылған профессор, Тау-кен-металлургия институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Чепуштанова Татьяна Александровна, Ph.D., т.ғ.к., Тау-кен-металлургия институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Агата Дучмаль-Черникевич (Agata Duczmal-Czernikiewicz), Ph.D., хабилит.доктор, профессор, Адам Мицкевич Университеті, Польша

Лозинский Василий Григорьевич, "Днепр политехникасы" Ұлттық техникалық университеті, Украина

Молдабаев Серік Құрашұлы, т.ғ.д., профессор, Тау-кен-металлургия институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Бражендра Мишра (Brajendra Mishra), Ph.D., профессор, Вустер политехникалық институты, АҚШ

Рысбеков Қанай Бахытұлы, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Тау-кен-металлургия институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Зельтман Реймар (Seltmann Reimar), Ph.D., профессор, Жер туралы ғылымдар бөлімінің директоры, Ресей және Орта Азия минералды зерттеулер орталығы (CERCAMS), Ұлыбритания

Атсуши Шибаяма (Atsushi Shibayama), Ph.D., профессор, Акита Университеті, Жапония

Сдвижкова Олена Олександровна, т.ғ.д., профессор, "Днепр политехникасы" Ұлттық техникалық университеті, Украина

Пенг Супинг (Peng Suping), профессор, академик, Қытай тау-кен университеті, ҚХР

Юсупов Халидилла Абенович, т.ғ.д., профессор, Тау-кен-металлургия институты, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

Жауапты хатшы

Буршукова Гулзия Адилбековна, Ph.D., қауымдастырылған профессор, ҚазҰЗТУ, Қазақстан

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ата Утку (Ata Utku AKÇIL), доктор философии, профессор Университета Сулеймана Демиреля, Турция

Бекботаева Алма Анарбековна, Ph.D., ассоциированный профессор, Институт геологии и нефтегазового дела КазНТУ, Казахстан

Байбатша Әділхан Бекділдаұлы, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт геологии и нефтегазового дела КазНТУ, Казахстан

Атак Баскетин (Atac Bascetin), Ph.D., профессор, Стамбульский технический университет, Турция

Барменшинова Мадина Богембаевна, кандидат технических наук, Горно-металлургический институт КазНТУ, Казахстан

Байгенженов Омирсерик Сабыржанович, к.т.н., ассоциированный профессор, Горно-металлургический институт КазНТУ, Казахстан

Чепуштанова Татьяна Александровна, Ph.D., к.т.н., Горно-металлургический институт КазНТУ, Казахстан

Агата Дучмаль-Черникевич (Agata Duczmal-Czernikiewicz), Ph.D., хабилит.доктор, профессор Университета Адама Мицкевича, Польша

Лозинский Василий Григорьевич, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Украина

Молдабаев Серик Курашович, доктор технических наук, профессор, Горно-металлургический институт КазНТУ, Казахстан

Бражендра Мишра (Brajendra Mishra), Ph.D., профессор, Вустерский политехнический институт, USA

Рысбеков Канай Бахытович, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Горно-металлургический институт КазНТУ, Казахстан

Зельтманн Реймар (Seltmann Reimar), Ph.D., профессор, директор отдела наук о Земле Центра изучения полезных ископаемых России и Центральной Азии (CERCAMS), Великобритания

Атсуши Шибаяма (Atsushi Shibayama), Ph.D., профессор, Университет Акита, Жапония

Сдвижкова Олена Олександровна, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Украина

Пенг Супинг (Peng Suping), профессор, академик, Китайский горный университет, Китай

Юсупов Халидилла Абенович, доктор технических наук, профессор, Горно-металлургический институт КазНТУ, Казахстан

Ответственный секретарь

Буршукова Гулзия Адилбековна, Ph.D., ассоциированный профессор, КазНТУ, Казахстан

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i3.01>

New opportunities for the development of the coal industry: technology of waste gas purification from SO₂, NO_x, CO₂

N.K. Dosmukhamedov*, E.E. Zholdasbay, M.G. Egizekov

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: nurdos@bk.ru

Abstract. Based on a brief overview and analysis of global trends and the development of the coal industry, the article examines the causes and factors constraining the provision of conditions for the sustainable development of the industry. It is shown that despite the negative consequences resulting from the burning of coal, it remains the main cheap and widespread source of energy. The current state of the global coal industry is analyzed and ways of solving its further effective development are shown. One of the key solutions for the development of the coal industry is to reduce the environmental burden of harmful gases (SO₂, NO_x, CO₂). A significant reserve for the development of the coal industry could be the involvement of high-calorie low-ash cheap coals. However, this requires the development and implementation of highly efficient, innovative technologies for deep purification of waste gases of TTP from SO₂, NO_x, CO₂. One of such solutions is a new technology of complex deep purification of waste gases of the TTP, providing a high level of utilization of SO₂, NO_x, CO₂ with the production of commercial products.

Keywords: coal, waste gases, purification, sulfur dioxide, nitrogen oxide, chemical absorption, chemical regeneration.

1. Введение

Проблема загрязнения воздуха и связанных с ней негативных последствий для здоровья населения набирает все большие темпы вследствие роста энергопотребления промышленностью и урбанизированными территориями. Научные данные свидетельствуют о том, что загрязнители воздуха, которые переносятся в атмосфере на большие расстояния, приводят к серьезным экологическим последствиям: к кислотным дождям, коррозии металлов, гибели флоры и фауны, заболеваниям людей, подкисление почвы, эвтрофикация водных объектов, обуславливая деградацию экосистем и соответственно снижения их продуктивности и качества жизни.

Одним из основных источников загрязнений атмосферы являются теплоэлектростанции, работающие на сжигании угля, мировые запасы которого огромны. По сравнению сравнительно высоких цен на нефть и природный газ, изобилие запасов угля предопределяет его использование в качестве надежного и экономически эффективного вида топлива в странах Евразии, включая Казахстан. Уголь может обеспечивать энергетические потребности планеты на протяжении ближайших столетий и является наиболее распространенным в мире энергоносителем.

2. Мировые тренды. Направления развития угольной отрасли

В мире ежегодно добывается примерно 5 млрд.т. каменного угля. В Китае добывается более 1 млрд.т. угля, в США – около 1 млрд.т. Около 70% мировых разведан-

ных месторождений угля находится на территории США, Китая и стран СНГ, включая Россию и Казахстан. По запасам углей Казахстан входит в десятку стран-лидеров, уступая лишь Китаю, США, России, Австралии, Индии, ЮАР, Украине. Государственным балансом республики учтены запасы по 49 месторождениям, которые составляют 33.6 млрд.т, в том числе каменных – 21.5 млрд.т, бурых углей – 12.1 млрд.т. [1].

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в 2007 году в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) 81% угля потреблялось в производстве электроэнергии и 10% - в промышленности (включая 3% на производство стали). В настоящее время на уголь приходится 47% в структуре топливного баланса электроэнергетики, и ожидается, что в будущем уголь останется ключевым видом топлива в структуре топливного баланса электроэнергетики [2, 3].

По величине запасов уголь превосходит все остальные виды ископаемого топлива. По данным BP Statistics [4], коэффициент кратности запасов R/P (отношение оставшихся запасов к годовой добыче) для угля в настоящее время составляет 122 года. Для сравнения: коэффициент кратности запасов нефти равен 42 годам, природного газа - 60 годам.

Запасы угля более равномерно распределены между Азиатско-Тихоокеанским регионом, Северной Америкой, Европой и Евразией (рисунок 1). Поэтому, по утверждению Мировой энергетической ассоциации (МЭА), риск значительных перебоев поставок не так велик, как в случае нефти [4].

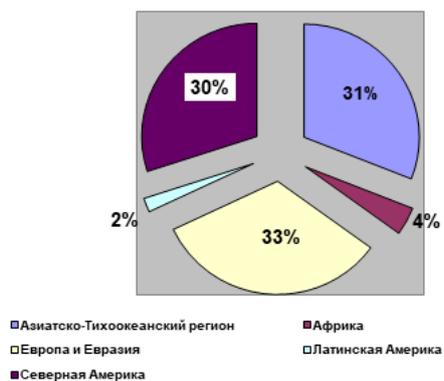


Рисунок 1. Доказанные запасы угля по данным BP Statistics [4]

В структуре мирового баланса первичной энергии уголь является вторым после нефти крупнейшим источником энергии, затем следует природный газ. На уголь приходится 27% мирового объема предложения энергии (рисунок 2).

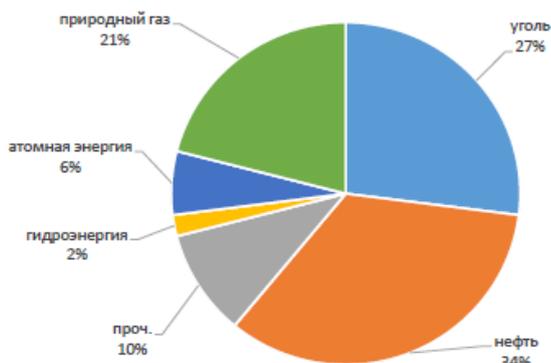


Рисунок 2. Мировое предложение первичной энергии

По данным МЭА, в 2007 году в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) 81% угля потреблялось в производстве электроэнергии и 10% - в промышленности (включая 3% на производство стали). В то же время, на уголь приходится 47% в структуре топливного баланса электроэнергетики (рисунок 3).



Рисунок 3. Топливный баланс мировой электроэнергетики

По утверждению МЭА ожидается, что в будущем уголь останется ключевым видом энергии в структуре топливного баланса электроэнергетики.

Спрос на уголь растет небывалыми темпами, причем большая часть потребления приходится на развивающиеся страны.

На развитие энергетики оказывают влияние ограниченность и неравномерность распределения ресурсов ископаемого топлива при росте потребления энергетических ресурсов, стремление стран к обеспечению энергетической безопасности, экологические ограничения по выбросам парниковых газов. Данные факторы приводят к необходимости увеличения доли возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе.

Как показывают исследования международных энергетических агентств и институтов, доля возобновляемых источников энергии в мировом энергетическом балансе 2050 г. может составить порядка 18%, или даже выше, для удовлетворения возрастающего спроса на энергию и стабилизации содержания парниковых газов в атмосфере. Развитыми странами принимаются Программы по развитию возобновляемых источников энергии. Так, Европейским Союзом принято решение об увеличении доли производства электроэнергии от возобновляемых источников энергии до 20% к 2020 г. (без учета крупных гидроэлектростанций). В Казахстане доля электроэнергии, выработанной, на крупных гидроэлектростанциях, составляет порядка 12%.

3. Анализ текущей ситуации угольной отрасли Казахстана

Минерально-сырьевая база угольной промышленности Казахстана достаточно прочная. Несмотря на большие объемы добычи углей, их запасы в недрах остаются значительными. Сегодня технические возможности казахстанских угледобывающих предприятий позволяют полностью обеспечить спрос на внутреннем рынке. Вместе с тем увеличение экспортного объема казахстанского угля маловероятно. Наша конкурентоспособность падает вследствие сравнительно низкого качества углей и высоких транспортных издержек.

Развитие угольной отрасли в Казахстане с решением основных ключевых его задач – минимизации эмиссий в окружающую среду диоксида серы и парниковых газов, внедрения новых безотходных технологий по утилизации отходов сжигания угля позволит повысить технологическую и инновационную сложность экономики. В рамках новых технологических трендов, таких как Индустрия 4.0, вся промышленность, в том числе и угольная отрасль должна быть направлена на увеличение эффективности и производительности существующих технологий за счет принятия высокотехнологичных решений по переработке продуктов сжигания угля путем автоматизации, роботизации и цифровизации производства.

Сегодня угольная отрасль республики обеспечивает выработку в Казахстане 78% электроэнергии, практически стопроцентную загрузку коксохимического производства. Ресурсы энергетического угля в полной мере обеспечивают потребности тепловых электростанций.

Для удовлетворения спроса коммунального сектора быстро растущих урбанизированных территорий и соответственно численности их населения планируется увеличение добычи малозольного угля на Шубаркульском и Майкубенском месторождениях. Балансовые запасы угля позволяют полностью обеспечить внутренние потребности и экспортировать значительные объемы угольной продукции.

В Казахстане преобладают низкокачественные угли с высоким содержанием серы, которые покрывают более чем на 40% спрос на первичные энергоресурсы. Используемые в энергетике и промышленности угольные ресурсы характеризуются низким уровнем обогащения. Несотвествующий международным стандартам экспортный уголь реализуется на внешнем рынке по сравнительно невысоким ценам.

Выработка электроэнергии в республике производится на традиционных источниках – тепло- и гидроэлектростанциях (соответственно 88% и 12%). По состоянию на 2010 г., установленная электрическая мощность тепловых и гидроэлектростанций в республике составила соответственно 17 252 и 2 273 тыс.кВт. В региональном разрезе наибольший объем мощностей тепловых электростанций (46.4%) приходится на Павлодарскую область, гидроэлектростанций (75.8%) на Восточно-Казахстанскую область.

Основную электроэнергию в Казахстане вырабатывают 37 тепловых электростанций, работающих на углях Экибастузского, Майкубинского, Тургайского и Карагандинского бассейнов. Крупнейшие из них – Экибастузские ГРЭС-1, ГРЭС-2 и Аксусская (Ермаковская) ГРЭС, которая вырабатывает до 14% всей электроэнергии.

Тепловые электростанции Казахстана, работающие на углях, имеют КПД 33-35%. Объекты электроэнергетики, построенные в 50-е и 70-е годы XX века, практически выработали производственный ресурс. При этом коэффициент износа основного электрооборудования, по предварительным расчетам на 2010 г., составляет 82%.

4. Очистка отходящих газов ТЭЦ от SO₂, NO_x и CO₂

Одной из ключевых проблем угольной отрасли является высокое содержание сернистого ангидрида и парниковых газов (CO₂) в отходящих газах ТЭЦ.

Угли содержат от 0.2 до десятков процентов серы в основном в виде пирита, сульфата, закисного железа и гипса. Для уменьшения концентрации серы в продуктах сгорания угля возможны два пути: уменьшение содержания серы в топливе до его сжигания и очистка дымовых газов от окислов серы. Имеющиеся способы улавливания серы при сжигании угля далеко не всегда используются из-за сложности и дороговизны. Поэтому значительное количество ее поступает и, по-видимому, будет поступать в ближайшей перспективе в окружающую среду.

Сжигание на тепловых электростанциях, преимущественно низкокалорийного бурого угля с высоким содержанием золы и серы, не отвечающего стандартам котельного оборудования, повлекло за собой следующие негативные последствия:

- выбросы в воздушный бассейн загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих предельно допу-

стимые нормы, включая значительные объемы «парниковых газов», влияющих на изменение климата;

- захламление территорий золоотвалами и терриконами отработанной породы, с которых на десятки километров разносятся пыль, зола и шлаки;

- формирование губительных кислотных дождей.

Доля основных подкатегорий в общих выбросах промышленных групп (рисунок 4) показывает, что удельный вес выбросов от источников энергетического комплекса Казахстана с его высокой зависимостью от угля как основного источника энергии, составляет 61% от эмиссий загрязняющих веществ в атмосферный воздух в республике.

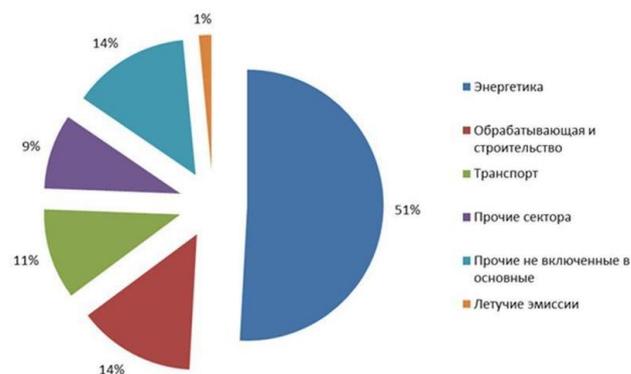


Рисунок 4. Доля основных подкатегорий в общих выбросах промышленных групп

Выбросы тепловых электростанций составляют до 70% от общего объема эмиссий энергетического комплекса (Северная зона – 92%, в том числе Карагандинская область – до 42%, Павлодарская область – 39%). Наиболее крупными источниками выбросов Центральной зоны являются ОАО «Испат-Кармет» (36%), ОАО «ЕЭК» (15.5%).

Выбросы промышленных предприятий Казахстана в атмосферу составляют более трех миллионов тонн в год, из которых 85% приходится на 43 крупных предприятия. За период 1990-2008 гг. объем выбросов от стационарных источников снизился почти в три раза за счет усиления контроля, увеличения доли природного газа в топливно-энергетическом балансе страны, а также по причине спада производства в ряде отраслей промышленности.

В эмиссиях от различных источников Единой энергетической системы доминируют твердые частицы - 35%, диоксид серы - 31%, окись углерода- 19%, окислы азота - 14%.

Уровень существующих систем очистки газов значительно уступает современным требованиям. Отсутствие надежной системы очистки дымовых газов и использование старых методов улавливания SO₂ и других вредных загрязнителей атмосферы привели к возрастанию их концентраций в выбросах выше предельно допустимых норм. По данным статистики, из всего количества источников выбросов загрязняющих веществ, имеющихся в республике, очистными сооружениями оборудовано ~ 10% источников.

На действующих ТЭЦ очистку отходящих газов от SO₂ проводят пропусканием потока отходящего газа через известняк - CaCO₃ или гашеную известь - Ca(OH)₂

[5-8]. Эти методы не достаточно эффективны и обладают рядом недостатков: высокое остаточное содержание серы в газах (в лучшем случае 90% SO_2 удаляется из отходящих газов при его исходном содержании около 2%); процессы довольно дорогие (при их применении стоимость электричества может увеличиться на несколько десятков процентов); большой выход не используемых твердых отходов (в основном, загрязненного примесями от сгорания угля, гипса - CaSO_4), количество которых составляет несколько процентов от веса сжигаемого угля. К примеру, тепловая станция мощностью 1ГВт, сжигающая уголь с содержанием 3% серы, производит в сутки более 1000т гипса, загрязненного алюминием, железом, кремнием, фосфором и др. элементами, присутствующими в золе.

Мониторинг состояния атмосферы загрязнения урбанизированных территорий показал, что города Алматы, Зыряновск, Усть-Каменогорск, Темиртау, Тараз относятся к зонам с высокой степенью экологического риска для здоровья населения.

Государственное регулирование и контроль выбросов осуществляется в соответствии с Техническим регламентом [9]. В настоящее время в Технический регламент предлагается внести дополнения по дифференциации требований по выбросам для котельных установок, не подлежащих реконструкции, требующих реконструкции, а также вводимых на действующих тепловых электрических станциях и на новых теплоэлектростанциях. Настоящие предложения позволят обеспечить поэтапный переход электростанций на более высокий уровень энергоэффективности и экологической безопасности сжигаемого угля.

Снижение эмиссий на фоне увеличения потребностей в энергоносителях, в основном, зависит от обеспечения тепловых электрических станций высококачественным углем и применением инновационных технологий сжигания и очистки отходящих газов от SO_2 , NO_x и CO_2 .

Слабым звеном угольной отрасли, наряду с перечисленными выше, является использование углей с низкой калорийностью и высокой зольностью. Низкая комплексность переработки угля и продуктов его сжигания, практическое отсутствие производств товарной продукции с высокой добавленной стоимостью указывает на сырьевую направленность отрасли и ставит страну в полную зависимость от спроса мировых рынков на уголь.

Переход угольной отрасли от сырьевой направленности возможен при создании условий для разработки и внедрения наукоемких и высокотехнологичных производств.

В развитых странах за использование угля с высоким содержанием серы взимаются значительные штрафы. К примеру, в США налоги за использование высокосернистых углей составляют до 0.202\$ за 1 MBtu угля с высоким содержанием серы и 0.036\$ за 1 MBtu угля с низким содержанием серы [10, 11].

Использование высококалорийных углей с высоким содержанием серы в настоящее время сдерживается из-за отсутствия высокоэффективной технологии очистки отходящих газов от сернистого ангидрида. В этой связи большой интерес представляет интегрирование инновационной технологии глубокой очистки отходящих газов от SO_2 , NO_x и CO_2 [12] в действующие технологические

линии ТЭЦ. Это позволит вовлечь в производство угли с высоким содержанием серы. При этом достигается значительный экономический и социальный эффект за счет снижения стоимости угля и отпускной цены выработанного тепла и/или электроэнергии для населения.

Научно-технический уровень разработанной технологии включает использование двух инновационных технологий:

1. Глубокой очистки отходящих газов от SO_2 путем *химической абсорбции* SO_2 расплавом карбонатов щелочных металлов и *регенерацию* карбонатно-сульфатных расплавов восстановлением монооксидом углерода и/или природным газом с получением товарных продуктов.

2. Технологии полной утилизации CO_2 путем *электролиза* карбонатно-оксидных расплавов щелочных металлов с получением товарного чистого монооксида углерода и кислорода.

Важнейшие целевые индикаторы технологии:

– комплексная глубокая очистка отходящих газов от SO_2 и CO_2 с получением товарных продуктов;

– полная утилизация CO_2 путем электролиза расплавленных карбонатно-оксидных солей щелочных металлов с получением чистого товарного монооксида углерода и кислорода.

Основные показатели эффективности технологии:

– обеспечение значительного сокращения выбросов серы в атмосферу (остаточное содержание серы в выбрасываемых в атмосферу газах после очистки будет составлять 0.001%) и полной утилизации CO_2 до CO ;

– исключение использования дорогостоящих материалов и реагентов;

– исключение образования дополнительных твердых и/или жидких отходов;

– повышение энергоэффективности за счет вовлечения в переработку высококалорийных углей с высоким содержанием серы;

– снижение издержек ТЭЦ и металлургических предприятий за счет сокращения существующих энерго- и материально затратных, расходуемых для операций очистки отходящих газов;

– снижение объема отходов производства за счет получения дополнительных товарных продуктов – элементной серы или серной кислоты и монооксида углерода;

– обеспечение стабильных условий комплексной очистки отходящих газов от SO_2 и CO_2 за счет использования новых технических решений («*ноу-хау*»).

Финансирование

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2020-2022 годы по приоритетному направлению «Рациональное использование природных ресурсов, в том числе водных ресурсов, геологии, переработки, новых материалов и технологий, безопасных изделий и конструкций» проекта № AP08856384 ««Разработка новой высокотехнологичной технологии утилизации SO_2 и CO_2 из отходящих газов ТЭЦ и металлургических предприятий с получением товарных продуктов»».

Литература / References

- [1] Programma po narahivaniyu potenciala dlya regionalnogo sotrudnichestva po prioritetu Regionalnogo plana deistvii po ohrane okrujayuschei sredi «Kachestvo vozduha» v ramkah proekta KAPAKT. (2012). *Tashkent*
- [2] Programma po razvitiyu elektroenergetiki Respubliki Kazahstan na 2010-2014 godi §302. (2010). *Postanovlenie Pravitelstva Respubliki Kazahstan*
- [3] Cena energii Formirovanie mejdunarodnih cen na ugol. (2010). *Otchet Sekretariata Energeticheskoi Hartii. Bryussel*
- [4] Kaplan, V., Dosmukhamedov, N.K. & Lubomirsky, I. (2017). Electrochemical Method of Carbonate Melts Regeneration for Efficient Capture of SO₂ from Coal Combustion. *231st ECS Meeting in New Orleans, LA, USA, FO 1070, 103*
- [5] Gupta, S., Singh Pahwa & M., Gupta, A. (2013). Innovative Price Adjustments Technique for Thermal Coal: A Study of operation Function under Changing Techno Environment. *Global Journal of Management and Business Research Finance, 13(4), 8-15*
- [6] Putilov, V.Ya. (2003). *Ekologiya energetiki, M.: MEI*
- [7] Abramov, A.I. & Elizarov, D.P. (2002). *Povishenie ekologicheskoi bezopasnosti TES. M.: MEI*
- [8] Rijkin, V.Ya. (1976). *Teplovie elektricheskie stancii. M. Energiya*
- [9] Tehnicheskii reglament «Trebovaniya k emissiyam v okrujayuschuyu sredu pri sjiganiy razlichnih vidov topliva v kotlah teplovih elektricheskikh stancii» §1232. (2007). *Postanovlenie Pravitelstva Respubliki Kazahstan*
- [10] The price of various types of coal were estimated according to <http://www.eia.gov/coal/news/markets/>. (2016)
- [11] Hutzler, M., Doman, L. & Anderson, A.T. (2020). *International Energy outlook 98: With Projections thru 2020*
- [12] Dosmukhamedov, N., Kaplan, V. (2021) Flue gas purification from SO₂ and NO_x using molten mixture of alkali metal carbonates. *International journal of coal preparation and utilization, 3004-3015*. <https://doi.org/10.1080/19392699.2021.1931147>

Көмір саласын дамытудың жаңа мүмкіндіктері: шығатын газдарды SO₂, NO_x, CO₂ тазарту технологиясы

Н.Қ. Досмұхамедов*, Е.Е. Жолдасбай, М.Г. Егизеков

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: nurdos@bk.ru

Аңдатпа. Мақалада көмір саласының дамуына қысқаша шолу негізінде және әлемдік трендтерді талдау мен саланың тұрақты даму жағдайларын қамтамасыз етуді тежейтін себептер мен факторлар қарастырылған. Көмірді жағу нәтижесінде пайда болатын теріс әсерлерге қарамастан, ол негізгі арзан және кең таралған энергия көзі болып қала береді. Әлемдік көмір саласының қазіргі жай-күйіне талдау жасалды және оны одан әрі тиімді дамытудың шешу жолдары көрсетілді. Көмір саласын дамытудың негізгі шешімдерінің бірі қоршаған ортаға зиянды газдардың (SO₂, NO_x, CO₂) жүктемесін азайту болып табылады. Көмір саласын дамытудың елеулі резерві жоғары калориялы күлі аз арзан көмірді пайдалану болуы мүмкін. Алайда, бұл ЖЭО-ның шығатын газын SO₂, NO_x, CO₂-ден терең тазартудың жоғары тиімді, инновациялық технологияларын әзірлеуді және енгізуді талап етеді. Осындай шешімдердің бірі тауар өнімдерін алу отырып SO₂, NO_x, CO₂ кәдеге жаратудың жоғары деңгейін қамтамасыз ететін ЖЭО шығатын газдарды кешенді терең тазартудың жаңа технологиясы болып табылады.

Негізгі сөздер: көмір, шығатын газдар, тазарту, күкіртті ангидрит, азот оксиді, химиялық абсорбция, химиялық регенерация.

Новые возможности развития угольной отрасли: технология очистки отходящих газов от SO₂, NO_x, CO₂

Н.К. Досмұхамедов*, Е.Е. Жолдасбай, М.Г. Егизеков

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: nurdos@bk.ru

Аннотация. В статье на основании краткого обзора и анализа мировых трендов и развития угольной отрасли рассмотрены причины и факторы, сдерживающие обеспечение условий устойчивого развития отрасли. Показано, что несмотря на негативные последствия, возникающие в результате сжигания угля, он остается основным дешевым и распространенным источником энергии. Проанализировано современное состояние мировой угольной отрасли и показаны пути решения ее дальнейшего эффективного развития. Одним из ключевых решений развития угольной отрасли является снижение нагрузки на окружающую среду вредных газов (SO₂, NO_x, CO₂). Значительным резервом развития угольной отрасли могло бы стать вовлечение высококалорийных малозольных дешевых углей. Однако это требует

разработки и внедрения высокоэффективных, инновационных технологий глубокой очистки отходящих газов ТЭЦ от SO₂, NO_x, CO₂. Одним из таких решений является новая технология комплексной глубокой очистки отходящих газов ТЭЦ, обеспечивающей высокий уровень утилизации SO₂, NO_x, CO₂ с получением товарных продуктов.

Ключевые слова: *уголь, отходящие газы, очистка, сернистый ангидрид, оксид азота, химическая абсорбция, химическая регенерация.*

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i3.02>

Study of complex processing of 10-160 mm grade chromium tailings by encapsulation in GreenCrete™ composite sulfur concrete

I.G. Bussygin¹, Ye.I. Kuldeyev², I.V. Bondarenko^{2*}, A.V. Volkov¹, D.D. Khayrutdinova¹

¹Gubkin Engineering and Technical Center, Orenburg, Russia

²Satbayev University, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: i.bondarenko@imio.kz

Abstract. In recent years, methods of utilization of lumpy mineral raw materials of chromium production by encapsulation with modified sulfur from substandard grades of oil to obtain sulfur concrete have become increasingly popular. A significant amount of lumpy waste with a low content of Cr_2O_3 (~ 5-7% w/w) is formed when Kazakhstani chrome raw materials are processed by gravitation methods, and they can only be used as backfill in mine construction or as a component in building and road-building mixtures. Wastes from chromium deposits in Kazakhstan are located in close proximity to oil deposits in the Aktobe region, which are characterized by a high content of sulfur-containing heavy oils, which can be jointly disposed of in the form of sulfur concrete. Composite material - sulfur concrete is produced based on sulfur polymer binder - GreenCrete™ modified sulfur under GOST R 56249-2014. The possibilities of the sulfur-concrete composite formation process for the use of beneficiation tails of 10-160 mm class chromium raw material as inert materials have been studied. The characteristics of the samples obtained during the tests allow us to draw conclusions about the relatively successful encapsulation of chromium production waste in an amount of 15% by weight of the sample with the formation of sulfur concrete of the M400 class, while with a 10% content of materials for enrichment of chromium raw materials, the M500 indicator was achieved.

Keywords: chromium raw materials, mine backfill, road pavement, sulfur polymer binder, recycling of poor chromium raw materials.

1. Introduction

The problem of disposal of chrome ore tailings, a toxic waste from chrome ore processing, has not been solved anywhere in the world so far resulted in closure of chrome production in a number of developed European countries and Japan [1]. In particular, the high content of calcium and silicon in the sludge prevents its use in the production of refractory materials.

The mines and quarry of the Donskoy GOK are located near the city of Khromtau in the northwestern part of Kazakhstan, 90 km east of Aktobe, the administrative centre of the Aktobe region. There are currently two mines and a quarry, two processing plants and two tailings processing sites in operation. At the concentrating plant, a large-sized chromium concentrate is obtained by heavy-medium separation with a Cr_2O_3 content of 48-50%, which is melted in electric arc furnaces to obtain ferrochrome [2]. Currently, poor chromite ores and dumps of off-balance ores are involved in processing, which serves as additional sources of raw materials. When they are enriched, large-sized fragments with a low chromium content remain in the waste rock.

In recent decades, increasing volumes of oil and gas production, as well as deep cleaning of oil and gas from sulfur, have led to the storage and accumulation of vast reserves of sulfur. One of the promising ways to sell these sulfur reserves is the production of compositions based on sulfur (sulfur concrete, sulfur asphalt concrete). The main advantages of

sulfur concrete over ordinary concrete are its higher strength characteristics (in compression and bending), low water absorption, the ability of this material to work in tension, corrosion resistance, water resistance, frost resistance, rapid strength development, low shrinkage and the possibility of recycling. At the same time, concrete and sulfur concrete are approximately equal in cost. But the production of sulfur concrete is possible even on fine sands (ordinary concrete will fall apart on such sand or require enormous overspending of the binder). And if traditional concretes are at least three-component, then sulfur concrete consists of two: modified sulfur and any of the fillers. However, the properties of sulfur concrete depend on the exact observance and control of the technological process and quality control of the input raw materials at all stages of production.

Sufficiently high content of Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Al^{3+} and Fe^{3+} ions in the initial chromium raw material prevents the formation of a compound - elite - the main component of cement- three-calcium silicate (Ca_3SiO_5), when, as in the production of sulfur concrete, such a problem no longer exists. However, the properties of sulfur concrete depend on the exact observance and control of the technological process and the quality control of incoming raw materials at all stages of production.

At the same time, concrete and sulfur concrete are approximately equal in cost. But the production of sulfur concrete is possible even on fine sands (ordinary concrete will fall apart on such sand or require overspending of the bind-

er). And if traditional concretes are at least three-component, then sulfur concrete consists of two: modified sulfur and any of the fillers. Reinforced concrete piles, foundation blocks, railway sleepers, road and paving slabs, curbstones, weights for gas and oil pipelines, sewer and water wells, hatches for heating mains, etc. can be made from sulfur concrete; monolithic foundations and pavements of roads and sites; hydraulic structures, including facing slabs for irrigation canals and construction, slabs for the construction of hydroelectric power stations, state district power plants and other hydraulic construction, bank protection, breakwaters; underground storage facilities for the disposal of aggressive environments, including radioactive ones, and much more [3].

When testing the sulfur asphalt concrete pavement, resistance to mechanical loads and weather and climatic conditions was shown. In sulfur-asphalt concrete, sulfur plays the role of a binder between bitumen and crushed stone, and has high adhesive properties with positively and negatively charged microparticles of the crushed stone grain surface, due to which the adhesion properties between bitumen and crushed stone increase. Couplings pass through the entire geometry of the cleavage, and not through particles of the same charge. Therefore, new composites do not require the use of surfactants. In the era of the emergence of higher axial loads and a high increase in traffic intensity, modern road surfaces should provide increased shear resistance at high summer temperatures, crack resistance at low temperatures, and be characterized by high corrosion resistance under the influence of anti-icing materials (chemical reagents). At the same time, a due role in assessing the durability of road surfaces is given to wear resistance, the ability of the material to withstand the effects of heavy traffic at high speeds, as well as the effects of studded tires and various other factors. The increase in the functional reliability of asphalt concrete pavements is currently associated in the world with the use of various modifying additives that help improve the transport and operational properties of road pavements. Such modifiers include: polymeric thermoplastic elastomers, crumb rubber and others. Bitumens of different viscosities and bituminous mastics are used as a binder. Therefore, the duality of sulfur is considered as a copolymer binder and as a reinforcing component that creates the effect of a "stone flower" [4–9]. In sulfur-asphalt concrete, sulfur plays the role of a binder between bitumen and crushed stone, has high adhesive properties with positively and negatively charged microparticles of the crushed stone grain surface, due to which the adhesion properties between bitumen and crushed stone increase. Couplings pass through the entire geometry of the cleavage, and not through particles of the same charge. Therefore, new composites do not require the use of surfactants (surfactants, high adhesion to stone material).

In a number of countries (Russia, USA, Canada, France, England, Holland) there is a wide experience in the use of sulfur in the manufacture of concrete (sulfur concrete), as mentioned above, and asphalt coating (sulfur bitumen), in order to reduce cracking, increase thermal stability, save up to 50% organic binder component [10].

Sulfur-containing road surfaces help to reduce the consumption of bitumen, which in turn is a valuable oil-bearing raw material and belongs to super-heavy grades of oil. The addition of sulfur makes it possible to improve the performance of the pavement in compression, respectively, to reduce the functional thickness of the pavement and to reduce the

consumption of gravel by a factor of three. Such pavements have a longer service life, do not crack in the heat and cold, and have a higher resistance to dynamic loads. Sulfur is actively used in road construction in Canada, USA, EU. High performance road surfaces contain up to 40% sulfur. It has been proven that sulfur asphalt is safe after curing. At the same time, it is estimated that the use of sulfur in the construction of roads will significantly reduce their cost by reducing the thickness of the coating, the amount of bitumen and gravel used. Also, the cost of maintaining roads will be reduced due to the use of a more efficient and wear-resistant coating [11].

It is possible to form binder components from the mineral part of chromite raw materials based on compounds similar in chemical composition to Sorel cements but it requires the use of additional chemical compounds [12-15].

The production of composite sulfur concrete is connected with the use of a binder with a different nature - modified sulfur with a proportion of "insoluble sulfur" of a metastable polymeric modification required under GOST R 56249-2014. Chemisorption processes involving metastable polymer modification with the formation of a solid composite material - sulfur concrete take place at elevated (up to 150°C) temperatures and the interaction with silicon oxide sand. Industrial wastes in this case serves as an inert filler performing a structuring function in the amount of the rocky body [16-17].

Green Crete modified sulfur under GOST R 56249-2014 (modified technical sulfur for the sulfur concrete production) is a product of processing lump or liquid Claus block sulfur under conditions of chemical conversion. Technically, there are now no restrictions on the performance of such equipment supplying a binder for the sulfur concrete production process. Modular sulfur-concrete plant provides isothermal mixing of modified sulfur with inert materials in a mass ratio of 1:3 with the capacity of 20 tons/hour and more, with the production of commodity sulfur-concrete, under PNST 105-2016, and reinforced concrete products based on it. However, these technologies are not widely used in Kazakhstani industries, so this work is relevant and significant for the concrete industry.

2. Methods

The studies were performed to obtain comparative characteristics of the physical and operational characteristics of the sulfur concrete samples in comparison with Portland cement concrete.

Physical and performance properties of the sulfur concrete samples obtained in comparison with Portland cement concrete are presented in Table 1 and depend on inert fillers: crushed stone and fine-dispersed admixtures, as well as on the efficiency of air removal from the amount of material in a concrete mixer.

Normative document PNST 105-2016 provides the following classification of inert materials:

1. Use as a fine filler - use the products obtained by grinding of rocks or solid industrial waste to prepare sulfur concretes. Acid resistance of fine aggregate must not be less than 97%.

2. Use sand under GOST 8736 as the fine aggregate for sulfur concrete. Acid resistance must be not less than 97%.

3. Use crushed rock or crushed gravel under GOST 8267, slag crushed under GOST 3344 as the coarse aggregate for heavy sulfur concretes. The maximum grain size of the aggregate must be not more than 40 mm.

Table 1. Comparative characteristics of GreenCrete sulfur concrete and Portland cement concrete

Parameters	Unit of measurement	Modified sulfur concretes		Portland cement concrete
		With dense aggregates	With porous aggregates	With dense aggregates
Average density	kg/m ³	2,300-2,500	1,600-2,000	2,200-2,400
Compression strength	MPa	40-90	30-50	30-50
Bending strength	MPa	10-12	7-8	8-10
Compression elasticity modulus	MPa	(3.5-4.1)x10 ⁴	(2-2.5)x10 ⁴	(2.4-2.8)x10 ⁴
Poisson's ratio	-	0.25	0.31-0.21	0.19-0.21
Coefficient of Linear Thermal Expansion CLTE	C	(11-13)x10 ⁻⁶	(7-9)x10 ⁻⁶	(10-12)x10 ⁻⁶
Linear shrinkage	%	0.02	-	0.02
Water absorption	%	0.9-1.5	0.7-1.1	1.0-3.5
Frost resistance	Cycles	300-800	up 100	100-300
Water resistance		20-40	10-20	8-10
Friction resistance	g\cm	0.4-0.45	0.3-0.35	0.35-0;4
Heat resistance	C	80	80	120
Concreting at subzero temperatures		Possible		Warmingup is required
Concreting under water, including sea water		Possible		Obstructed
Chemical resistance		High		Protectionis required
Production wastes, after operational period		Absent		Available

To prepare a sample of GreenCrete™ grade sulfur concrete, chromium raw material jigging tailings of the Donskoy Mining and Processing Plant of the 10-30 mm class have been produced, that is, they are superior in size to sand of increased size according to GOST 8736. Industrial waste samples in the amount of 10 and 15% of the final mixture weight were heated with river sand of medium coarseness and mixed with GreenCrete™ modified sulfur (under GOST R 56249-2014 with the characteristics presented in Table 2) in the amount of 25% of the final mixture weight.

Table 2. Characteristics of GreenCrete modified sulfur

Parameter	Value
Mass fraction of sulfur, %, min.	98.80
Mass fraction of ash, %, max	1.00
Mass fraction of acids, %, max	0.02
Mass fraction of organic stabilizer, %, max.	0.20
Mass fraction of water, %, max	0.06
Mass fraction of insoluble (toluene, 60°C) part, %, min	8.00

The results of chromium waste encapsulation (The concrete is made at 150°C, the concrete hardens when it is cooled in natural conditions) are shown in Table 3.

Table 3. The results of chromium waste encapsulation

Lab number	Design concrete grade	Date of placing	Test Date
441/1, yellow	B30	13.08.2021	15.08.2021
441/2, grey	B40	13.08.2021	15.08.2021
Age, days	Strength of concrete, MPa, Rm	Required strength of concrete at the age of 28 days, MPa, Rm	Percentage of required strength
2	38.0	38.4	99
2	51.8	51.2	101

3. Discussion

Both samples of gray and yellow material, respectively, were obtained at a temperature of 150°C and in the process of intensive mixing; they were poured into 100x100 mm test cubes and vibrated on a SMZh-539 vibrating pad.

The characteristics of the samples obtained during the tests and shown in Table 3 suggest that the encapsulation of chromium production wastes in the amount of 15% of the sample weight with the production of M400 class sulfur concrete was relatively successful, while M500 was achieved at 10% of the amount of chrome beneficiation materials.

If weighting agents (e.g., lead shot) are added to the obtained sample materials it is possible to obtain composite concretes with radiation and protective properties for disposal of radiochemical wastes of low and medium activity.

The use of technical sulfur modified with additives as a binder for the production of sulfur concrete will make it possible to control its physical and mechanical properties in a wide range. In the process of preparing concrete, sulfur melts and plays the role of an independent binder, evenly distributed among the mineral components, enveloping them, creating structural bonds of the crystallization type.

4. Conclusions

The results obtained prove that the weight of the disposed chrome tails by the encapsulation method of the 10-40 mm chrome beneficiation tailings will make 24 thousand tons/year with the output of M400 class sulfur-concrete with the productivity of the experimental modular sulfur-concrete plant of 20 t/h, i.e. 160 thousand tons/year. Larger particles of the chrome beneficiation tailings must be subjected to crushing to the limit size of crushed stone specified in PNST 105-2016 for the production of sulfur concrete, i.e. 40 mm.

The number of disposed tailings can rise by increasing the productivity of the pilot plant and the number of pilot plants. The technology provides 100% replacement of Portland cement and solves the environmental problems of oil-producing regions and chromium production in Kazakhstan through using industrial waste (lump sulfur) and sludge tailings.

Acknowledgements

The research was conducted with the financial support of the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan under grant №AP08856229 "Development and testing of advanced technology for the production of durable chromium pellets from finely dispersed chromium concentrate with their melting to ferrochromium".

References

- [1] Dyussenova, S.B. (2019). Development of technology for complex processing of technogenic beneficiation tailings of Donskoy MPP (Doctoral dissertation). *Almaty*
- [2] Report on the Mineral Assets Fund of Kazchrome JSC, Kazakhstan. SRK Consulting (UK) Limited. (2018)
- [3] Electronic resource. Retrieved from <https://strategy2050.kz/ru/news/13695/>
- [4] Vasiliev, Yu.E., Motin, N.V., Sarychev, I.Yu. & Kochetkov, A.V. (2013). Physico-chemical bases for the use of sulfur as a material as a binder for sulfur asphalt concrete and sulfur cement concrete. *Collection of materials of the international scientific conference, Kirov, 64-71*
- [5] Vasiliev, Yu.E., Motin, N.V. & Shubin A.N. (2015). Innovative environmentally friendly sulfur-containing composite materials for transport construction. *Industrial and civil construction, (12), 8-13*
- [6] Vasiliev, Yu.E., Voeyko, O.A. & Tsarkov, D.S. (2014). Investigation of corrosion resistance of sulfur asphalt concrete. *Internet Journal of Science Studies, 5 (24), 22*
- [7] Alekhina, M.N., Vasiliev, Yu.E., Motin, N.V. & Sarychev, I.Yu. (2011). Sulfur asphalt concrete mixtures. *Building materials, (10), 12 - 13*
- [8] Motin, N.V., Alekhina, M.N. & Vasiliev, Yu.E. (2004). Method for producing sulfur asphalt concrete. *Patent § 2223992*
- [9] Vasiliev, Yu.E., Alekhina, M.N. (2011). Automation of the selection of the mineral part of sulfur-asphalt concrete mixtures based on computer modeling. *Industrial and civil construction, (11), 72-75*
- [10] Kortyanovich, K. V. (2007). Improvement of the properties of road bitumen with modifying additives (Doctoral dissertation). *Ufa State Oil Technical University*
- [11] Asylbekova, G.E., Boldishor, I.V. & Mukanova, R.Zh. (2015). Alternative use of sulfur as a raw material for the manufacture of paving slabs. *Collection of articles International scientific-practical conference «Breakthrough scientific research as the engine of science», Samara, 33-36*
- [12] Bondarenko, I.V., Tastanov, E.A., Sadykov, N.M.-K. & Ismagulova, M.Sh. (2018). Processing of the mineral part of refined ferrochrome slag with obtaining granulated porous heat insulating material. *Complex Use of Mineral Resources, (4), 158-164*
- [13] Bondarenko, I.V., Tastanov, E.A. & Sadykov, N.M.-K. (2018). Obtaining innovative thermal insulation material from ferrochrome slag. *Ecology and Industry of Kazakhstan, 1(57), 32-35*
- [14] Bondarenko, I.V., Tastanov, Y.A., Roschin, A.V. & Sadykov, N.M.-C. (2020). Hydro-Chemical Method of Utilizing Mineral Part of Refined Ferrochrome Slags to Obtain Sorel's Cements for Building Materials Production. *International Journal of Advanced Science and Technology, 7s (29), 08-17*
- [15] Bondarenko, I.V., Kuldeyev, E.I., Tastanov, E.A., Kenzhaliev, B.K. & Temirova, S.S. (2020). Chrome-containing sludge processing method. *Patent §34533 of the Republic of Kazakhstan*
- [16] Vassiliev, Yu.E. (2013). Prospects of application of sulfur-containing composite materials. *Roads, (10), 96-98*
- [17] Vassiliev, Yu.E. Motin, N.V., Sarychev, I.Yu. & Kochetkov, A.V. (2013). Physical and chemical bases for use of sulfur as a binder for sulfur-asphalt concrete and sulfur-cement concrete. *Construction, design, architecture: development of scientific bases for creation of a healthy living environment, (5), 22-27*

GreenCrete™ маркалы композиттік серобетонға капсулалау әдісімен 10-160 мм класты хром шикізатын байыту қалдықтарын кешенді қайта өңдеуді зерттеу

И.В. Бусыгин¹, Е.И. Көлдеев², И.В.Бондаренко^{2*}, А.В. Волков¹, Д.Д. Хайрутдинова¹

¹Губкин инженерлік-техникалық орталығы, Орынбор, Ресей

²Satbayev University, Металлургия және кең байыту институты, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: i.bondarenko@imio.kz

Аңдатпа. Соңғы жылдары серобетондарды алу үшін кондиционерленбеген мұнай сорттарынан модификацияланған күкіртпен капсулалау арқылы хром өндірісінің кесек минералды шикізатын кәдеге жарату тәсілдері барған сайын танымал бола бастады. Қазақстандық хром шикізатын гравитация әдістерімен өңдеу кезінде құрамында Cr_2O_3 мөлшері төмен ірі кесек қалдықтардың едәуір көлемі түзіледі (~5-7% салмақ.), олар негізінен шахта құрылысында қайта толтыру немесе құрылыс және жол-құрылыс қоспаларында компонент ретінде пайдаланылуы мүмкін. Қазақстанның хром кен орындарының қалдықтары Ақтөбе облысындағы күкірті бар ауыр мұнай сорттарының жоғары құрамымен сипатталатын мұнай кен орындарына тікелей жақын орналасқан, оларды серобетон түрінде бірлесіп кәдеге жаратуға болады. Композиттік материал серобетон МЕМСТ Р 56249-2014 стандарты бойынша GreenCrete™ маркалы модификацияланған күкірт-серополимерлі тұтқыр зат негізінде өндіріледі. Инертті материалдар ретінде 10-160 мм класты хром шикізатын байыту қалдықтарын пайдалану үшін серобетон композит қалыптастыру процесінің мүмкіндіктері зерттелді. Сынақтар барысында алынған үлгілердің сипаттамалары М400 класты серобетонды үйрете отырып, үлгі массасының 15% мөлшерінде хром өндірісі қалдықтарын салыстырмалы түрде сәтті капсулалау туралы қорытынды жасауға мүмкіндік береді, ал хром шикізатын байыту материалдарының 10% құрамында М500 көрсеткішіне қол жеткізілді.

Негізгі сөздер: хром шикізаты, шахталық толтыру, жол жамылғысы, серополимерлі тұтқыр зат, кедей хром шикізатын кәдеге жарату.

Исследования комплексной переработки хвостов обогащения хромового сырья класса 10-160 мм методом капсулирования в композитный серобетон марки GreenCrete™

И.В. Бусыгин¹, Е.И. Кульдеев², И.В.Бондаренко^{2*}, А.В. Волков¹, Д.Д. Хайрутдинова¹

¹Губкинский инженерно-технический центр, Оренбург, Россия

²Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: i.bondarenko@imio.kz

Аннотация. В последние годы все большую популярность находят способы утилизации кускового минерального сырья хромового производства капсулированием с модифицированной серой из некондиционных сортов нефти для получения серобетонов. При переработке казахстанского хромового сырья методами гравитации образуется значительный объем крупнокусковых отходов с низким содержанием Cr_2O_3 (~5-7 % вес.), которые могут быть использованы в основном в виде обратной засыпки в шахтном строительстве или компонента в строительных и дорожно-строительных смесях. Отходы хромовых месторождений Казахстана расположены в непосредственной близости к нефтяным залежам в Актюбинской области, характеризующимся высоким содержанием серосодержащих тяжелых сортов нефти, которые могут быть совместно утилизированы в форме серобетонов. Композитный материал серобетон производится на основе серополимерного вяжущего – модифицированной серы марки GreenCrete™ по стандарту ГОСТ Р 56249-2014. Исследованы возможности процесса образования серобетонного композита для использования хвостов обогащения хромового сырья класса 10-160 мм в качестве инертных материалов. Характеристики полученных в ходе испытаний образцов позволяют сделать выводы об относительно успешном капсулировании отходов хромового производства в количестве 15 % от массы образца с получением серобетона класса М400, в то время как при 10 % содержании материалов обогащения хромового сырья был достигнут показатель М500.

Ключевые слова: хромовое сырье, шахтная засыпка, дорожное покрытие, серополимерное вяжущее, утилизация бедного хромового сырья.

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i3.03>

Disposal of solutions of copper electrofining processing of non-ferrous metal scrap

S.V. Gladyshev, S.D. Rakhimova, L.M. Imangalieva*, A.K. Kasymzhanova

Satbayev University, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: leila.imangalieva@mail.ru

Abstract. The results of studies on the utilization of copper electrorefining solutions, zinc-containing sublimation dusts of pyrometallurgical processing of non-ferrous metal scrap are presented. Zinc-containing sublimation dusts for the regeneration of commercial electrolyte by the neutralization method were used for the first time. Contained in dust, zinc oxide, when dissolved in a sulfuric acid electrolyte, binds sulfate ions of free sulfuric acid and increases the pH of the solution. When the pH of the precipitation of non-ferrous metals is reached, they are precipitated in the form of hydroxides, which makes it possible to return to processing a significant amount of copper, nickel, zinc, lead and tin contained in them. Studies of the material composition of the commercial electrolyte of copper and zinc sublimates for the processing of non-ferrous metal scrap have been carried out. The conditions for purification of the electrolyte by the method of staged neutralization are determined. The first stage of neutralization was carried out with zinc sublimates, the second and third stages with potash. As a result of the first stage of neutralization to pH 4.7, lead was obtained - a tin-containing product that can be processed together with lead-containing copper electrorefining sludge. As a result of the second stage of neutralization with potash to pH 7.1, a precipitate was obtained, after treatment of which in a KOH solution, a precipitate of copper oxide was obtained. As a result of the third stage of neutralization to pH 9.5, a nickel-zinc-containing precipitate was obtained. After treating the precipitate with a KOH solution, a zinc-containing solution and a nickel-containing precipitate were obtained, after calcining which a nickel oxide precipitate was obtained.

Keywords: copper electrolyte, potash, copper-containing precipitate, lead - tin-containing product, alkaline solution.

1. Введение

Проблемы в технологии переработки лома цветных металлов на стадии получения электрорафинированной меди заключаются в накоплении в оборотном электролите нежелательных примесей никеля, цинка и других, которые ухудшают сортность получаемой катодной меди.

Часть электролита из товарных ванн периодически выводится из цикла электролиза и подвергается переработке. Производительность предприятия и его рентабельность зависят от эффективности операции очистки растворов электрорафинирования меди, поэтому важным является проведение исследований по разработке инновационной технологии регенерации электролита.

Содержание примесей в растворе электрорафинирования меди строго регламентировано, особенно по содержанию никеля, поэтому технология переработки лома цветных металлов предусматривает вывод части товарного электролита на регенерацию.

Регенерация решает важную задачу производства в стабилизации состава медьсодержащего электролита в условиях использования загрязненной примесями анодной меди, полученной при переработке лома цветных металлов, поэтому совершенствование технологии очистки является актуальным.

Извлечение из технологических растворов катионов тяжелых металлов возможно различными способами:

экстракционными, сорбционными, мембранными и комбинированными, основанными на сорбционных и электрохимических методах [1-8].

Однако, применение данных способов либо недостаточно эффективно, экономически нецелесообразно, либо осложнено организацией производственного процесса. Поэтому разработка инновационных, эффективных технологических решений для извлечения катионов тяжелых металлов из промышленных растворов носят актуальный характер.

При получении рафинированной меди из минерального сырья, на большинстве предприятий применяется двухстадийная схема переработки растворов – упаривание и кристаллизация электролита с получением сульфата меди и извлечение остаточной меди из упаренного раствора электроэкстракцией. После извлечения меди из раствора извлекается никель в виде сернокислой соли методом выпаривания, кристаллизации и последующего рафинирования [9]. Способ не позволяет достаточно селективно выделить присутствующие в растворе цветные металлы.

На этом же комбинате после селективного разделения в результате испытаний получены высококачественные оксиды железа и достигнуто извлечение серной кислоты из анолита, очищены сульфатные никелевые растворы от кальция и магния, утилизированы медные растворы.

Недостатками методов экстракции для очистки оборотных электролитов являются многостадийность и использование дорогостоящих реагентов.

Известен способ переработки медного электролита, отбираемого на регенерацию, с получением медного и никелевого купороса. В котором путем трехкратной нейтрализации избыточной кислотности порошком меди в присутствии кислорода выпариванию в вакуум – испарительной установке, охлаждению с кристаллизацией, отделению кристаллов от маточника центрифугированием получают медный купорос. Из маточника путем электролиза с не растворимыми свинцово – серебряными электродами получают катодную медь, загрязненную мышьяком и сурьмой и никелевый раствор, направляемый на выпарку, охлаждение с кристаллизацией и отделение кристаллов никелевого купороса от фильтрата [10-12].

К причинам, препятствующим достижению указанного технического результата при использовании известного способа, относится то, что в известном способе схема регенерации раствора довольно громоздка, высок расход медного порошка, нежелательные микропримеси распределяются между медным и никелевым купоросом, ухудшая сортность, высок расход электроэнергии.

Известен способ переработки отработанного медного электролита, в котором путем нейтрализации избыточной кислоты в присутствии кислорода воздуха медными гранулами, выпариванию, кристаллизации, обезвоживанию в центрифугах, промыванию и сушке горячим воздухом получают медный купорос 1 сорта. Маточник вновь подвергают выпарке, кристаллизации, обезвоживанию в центрифугах, промывке сушке. Получают медный купорос 2 сорта. Маточный раствор этой стадии направляют на электролитическое обезмеживание в регенерационных ваннах в две – три стадии. Обезмеженный электролит подвергают упариванию и кристаллизации с получением «грязного» никелевого купороса [13].

К причинам, препятствующим достижению указанного ниже технического результата при использовании известного способа, относится то, что в известном способе схема переработки электролита также громоздка, электролитическое обезмеживание является малопроизводительной операцией, сопряженной с высоким расходом энергии и выделением ядовитого газа – арсина, нежелательные микропримеси не выводятся из медного цикла, никелевый купорос возвращается в голову процесса.

Известен способ очистки медного электролита, в котором путем осаждения смесью сульфата и хлорида аммония, охлаждения с кристаллизацией и отделения кристаллов от маточного раствора декантацией, получают никельсодержащее сырье, направляемое в никелевое производство, и маточный раствор, возвращаемый в медный цикл электролиза меди [14].

К причинам препятствующим использованию указанного способа, относится то, что в известном способе никельсодержащее сырье, состоящее из двойных солей меди и никеля, вновь возвращается в голову медно – никелевого производства, а выводимые микропримеси железа, цинка, сурьмы циркулируют в замкнутом цикле, лишь частично рассеиваясь по промпродуктам медного и никелевого производств.

Известен способ очистки медного электролита, в котором путем нейтрализации остаточной кислоты до 60 кг/м^3 , осаждения баритовым концентратом, отделения

осадка от электролита фильтрацией, получают раствор, возвращаемый в цикл электролиза меди, и мышьяковистый осадок, подвергаемый дальнейшей обработке смесью сульфата и сульфида натрия [13].

В известном способе происходит очистка только от мышьяка, другие же примеси из цикла электролиза меди не выводятся.

Также известен способ того же назначения к заявленному изобретению по совокупности признаков является хлоридный способ очистки медно-никелевых растворов, в котором путем нейтрализации, восстановления, осаждения и фильтрации получают однохлористую медь и никелевый раствор [15].

При использовании данного способа, нежелательные микропримеси переходят в никелевый раствор, высок расход медного порошка, имеются ограничения по содержанию остаточной кислоты. Предотвратить переход нежелательных микропримесей в раствор сложно из – за образования ими устойчивых хлоридных комплексов, снизить расход медного порошка не представляется возможным, так как его расход диктуется параметрами ведения процесса. Ограничения же по остаточной кислотности связаны со снижением извлечения меди в осадок по мере роста кислотности раствора.

Для извлечения цинка, меди и железа из растворов медно-никелевого производства исследована возможность сорбции с использованием ряда ионитов, однако в настоящее время ее использование ограничивается только при очистке некондиционных сернокислых растворов от цинка с помощью анионообменной смолы марки АМП [16]. Сорбционный способ очистки промышленных растворов является технологически и экономически предпочтителен для значительных объемов растворов и низких содержаниях целевых компонентов.

При переработке вторичного медного сырья принято извлекать медь из отработанного электролита методом электроэкстракции. После электроэкстракции раствор нейтрализуют известковым молоком с получением гипсового никельсодержащего кека, который отправляют на переработку на никелевые заводы [3].

Такая технология не позволяет получить селективного разделения цветных металлов и получить товарные продукты повышенной стоимости.

2. Методы и материалы

В работе для утилизации отработанного электролита методом нейтрализации использованы цинксодержащие пыли возгонки – промпродукт пирометаллургической переработки лома цветных металлов.

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на спектрометре с волновой дисперсией Venus 200 (PANalytical B.V., Голландия).

Химический анализ образцов выполнен на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно – связанной плазмой Optima 2000 DV (США, Perkin Elmer).

Полуколичественный рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре D8 Advance (BRUKER) на медном $\text{Cu-K}\alpha$ излучении при ускоряющем напряжении 36 кВ, токе 25 мА.

Микрофотографии сделаны на растровом низковакуумном электронном микроскопе с термоэмиссионным катодом (LaB_6)JSM-6610LV фирмы “JEOL”.

3. Результаты и обсуждение

Исходными продуктами для исследований использованы отработанный электролит меди и цинковые возгоны медеплавильного завода ТОО «Кастинг» в Казахстане.

Химический состав отработанного электролита меди, мас. г/дм³: Cu 67.14; Ni 36.41; Fe 11.43; Zn 10.96; SO₄ 125.9; N 4.1; As; 0.03; Bi 0.002; Na 2.6; Pb 0.014; Sb 0.05; Si 0.047; Sn 0.0.

Цинкодержажущий промпродукт – цинковые возгоны на медеплавильном заводе ТОО «Кастинг» образуются в процессе огневого рафинирования меди в результате окисления избыточного количества цинка в анодной меди до требуемых норм, путем продувки расплавов сжатым воздухом и улавливанием из отходящих газов на рукавных фильтрах.

Получаемые цинковые возгоны – мелкодисперсный порошок светло - серого цвета. В нем не допускается включение посторонних примесей (кусочки металла, изгари, керамики) при внешнем осмотре.

Химический состав цинковых возгонов мас. %: F 0.97, Al₂O₃ 0.15, P₂O₅ 0.82, SO₃ 4.0, Cl 11.64, K₂O 0.93, CaO 0.36, Fe₂O₃ 0.29, NiO 0.05, CuO 7.86, ZnO 39.46, Br 0.19, MoO₃ 0.1, CdO 0.23, SnO₂ 7.16, WO₃ 0.36, PbO 19.4, Bi₂O₃ 0.04, п.п 0.04.

Такие возгоны нельзя использовать для получения цинковых белил из – за присутствия свинца и олова. Обычно такие возгоны подвергают так называемый «Разгонке» для удаления примесей. Для этого возгоны смешивают с серосодержащим флюсом, гранулируют и подвергают отгонке свинца и олова во вращающейся печи. При этом получают цинковистый клинкер и запыленные газы, содержащие сульфиды свинца и олова, которые очищаются в фильтрах. Цинковистый клинкер смешивают с промытым коксовым орешком и направляют на вторичное восстановление. При этом цинк восстанавливается, возгоняется и с отходящими газами направляется в рукавные фильтры, где улавливаются в виде оксида цинка – сухих цинковых белил. Разработка технологии переработки цинковых возгонов с получением готовой товарной продукции позволит осуществить задачу по комплексному использованию промпродукта лома цветных металлов. В исследованиях цинковые возгоны использованы для нейтрализации раствора электролита меди с комплексной утилизацией имеющихся в них полезных компонентов и получения селективных концентратов цветных металлов.

Проведен ситовой и химический анализы пробы цинковых возгонов медеплавильного завода ТОО «Кастинг» (таблица 1).

На рисунках 2-4 отображен участок и состав в различных его точках, состоящий из нерудных минералов Si, P, Ca, железа и цветных металлов Cu, Zn, Sn и Pb. Результаты анализа состава цинковых возгонов показали его однородность.

Для определения оптимальных условий очистки товарного электролита и селективного выделения металлов нейтрализацию проводили стадийно исходя из pH осаждения гидроксидов металлов с использованием цинковых возгонов и поташа.

Рентгенофазовый состав усредненной пробы цинковых возгонов представлен в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 1. Химический состав цинковых возгонов

Наименование	Содержание, %					
	Класс крупности, мм					
	усредненный	+1,0	-1,0+0,25	-0,25+0,1	-0,1+0,056	-0,056
1	2	3	4	5	6	7
F	0,97	0,93	0,86	0,94	1,07	0,96
Al ₂ O ₃	0,15	0,06	0,07	0,07	0,05	0,1
SiO ₂	0,82	0,58	0,58	0,49	0,47	1,04
P ₂ O ₅	0,15	0,18	0,15	0,14	0,14	0,12
SO ₃	4,0	5,05	4,43	4,45	4,88	4,94
Cl	11,64	13,48	12,38	11,59	11,1	10,22
K ₂ O	0,93	0,95	0,98	0,87	0,85	0,68
CaO	0,36	0,14	0,17	0,13	0,2	0,18
Fe ₂ O ₃	0,29	0,94	0,28	0,24	0,22	0,28
NiO	0,05	0,04	0,03	0,45	0,05	0,04
CuO	7,86	7,55	8,64	8,25	7,42	6,44
ZnO	39,46	45,8	42,26	42,13	43,57	40,22
Br	0,19	0,19	0,2	0,2	0,17	0,15
MoO ₃	0,1	0,11	0,12	0,11	0,14	0,11
CdO	0,23	0,24	0,29	0,23	0,21	0,18
SnO ₂	7,16	5,97	7,65	7,28	7,38	5,52
WO ₃	0,36	0,22	0,2	0,26	0,26	0,17
PbO	19,4	17,28	20,49	23,32	21,79	19,72
Bi ₂ O ₃	0,04	0,03	0,05	0,07	-	0,06
п.п						
Выход класса, %	100	2,2	64,25	29,0	4,5	0,05

Таблица 2. Фазовый состав усредненной пробы цинковых возгонов

Наименование	Формула	%
Матлокит	PbClF	43,1
Гидроксид гидрат сульфата меди	Cu ₅ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ ·5H ₂ O	20,0
Хлорат меди	Cu(ClO ₄) ₂	10,3
Оксид дицинк стоната	Zn ₂ (SnO ₄)	9,8
Моолоонит	C ₂ CuO ₄ ·xH ₂ O	4,4
Ацетат гидроксид гидрат свинца	C ₄ H ₈ Pb ₂ O ₆ ·H ₂ O	3,8
Оксалат цинка	C ₂ O ₄ Zn	3,2
Федотовит	K ₂ Cu ₃ +2O(SO ₄) ₃	2,8
Хлорид цинка	ZnCl ₂	2,6

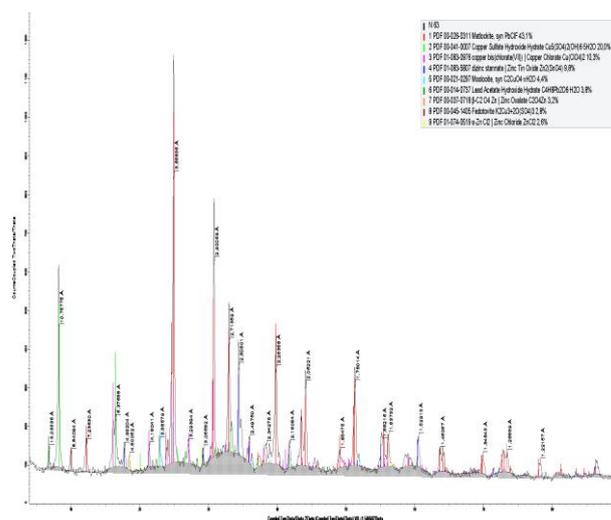


Рисунок 1. Рентгенограмма усредненной пробы цинковых возгонов

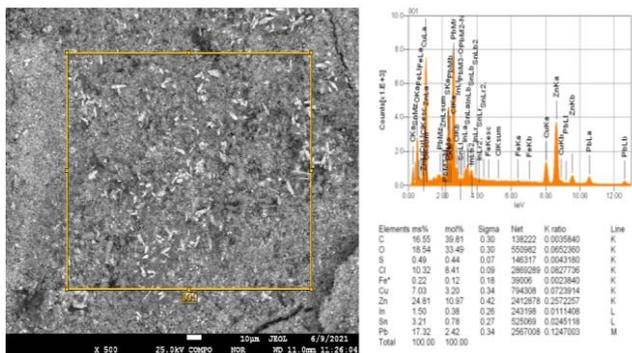


Рисунок 2. Микрофотографии цинковых возгонов x 500,0

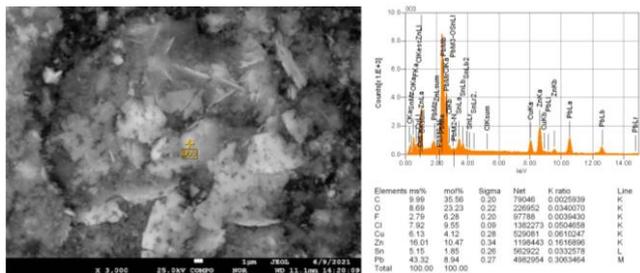


Рисунок 3. Микрофотографии цинковых возгонов x 3000,0

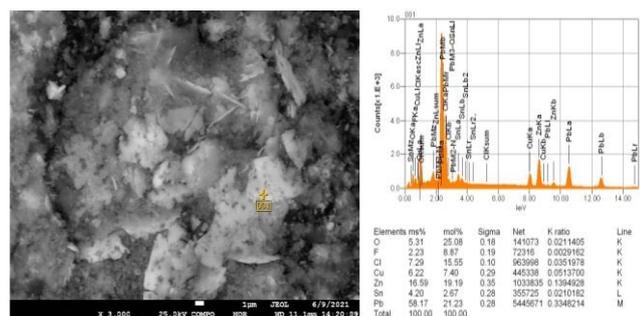


Рисунок 4. Микрофотографии цинковых возгонов x 3000,0

Исходя из данных pH осаждения гидроксидов металлов оптимальными условиями очистки электролита методом нейтрализации следует считать:

- первая стадия нейтрализации до pH 4.7, из условия pH осаждения железа;
- вторая стадия до pH 7.1 из условия pH полного осаждения меди;
- третья стадия до pH 9.5 из условия pH полного осаждения никеля и цинка.

Нейтрализацию проводили при Ж:Т = 5:1, температуре 20°C, продолжительности перемешивания 3 часа и центрифугирования для отделения труднофильтруемых осадков.

Первую стадию нейтрализации раствора электрофинирования меди проводили цинковыми возгонами, вторую и третью стадию - поташом (таблица 3).

Свинец – оловосодержащий осадок может быть переработан вместе со свинецсодержащим шламом, получаемым после отделения раствора электрофинирования меди.

В результате второй стадии нейтрализации электролита поташом до pH 7.1 получен – медьсодержащий осадок (таблица 5), который может быть возвращен в сернокислый раствор электрофинирования меди, либо переработан с получением оксида меди.

Таблица 3. Химический состав осадков нейтрализации раствора электрофинирования меди

Наименование	Содержание, %		
	pH		
	4,7	7,1	9,5
F	0,44	0,26	0,3
Na ₂ O	0,71	-	-
MgO	-	-	0,11
Al ₂ O ₃	1,56	0,34	1,3
SiO ₂	4,08	0,24	0,54
P ₂ O ₅	0,41	0,01	0,009
SO ₃	11,12	5,56	3,42
Cl	0,72	4,7	0,19
K ₂ O	0,19	-	0,05
CaO	0,85	0,03	0,38
Fe ₂ O ₃	5,48	0,31	0,14
NiO	0,15	1,1	27,63
CuO	2,97	76,45	0,68
ZnO	4,79	2,8	55,75
Br	0,09	0,01	-
MoO ₃	0,23	-	-
CdO	0,08	0,01	-
SnO ₂	16,36	-	-
WO ₃	0,29	-	-
PbO	44,69	0,06	-
Bi ₂ O ₃	0,09	-	-
п.п	4,7	5,12	8,131
Всего	100	100	100

В результате нейтрализации получили свинец – оловосодержащий продукт.

Рентгенофазовый анализ осадка первой стадии нейтрализации электролита представлен в таблице 4 и на рисунке 5.

Таблица 4. Фазовый состав осадка первой стадии нейтрализации электролита

Наименование	Формула	%
Англесит	Pb(SO ₄)	83,6
Оксид цинка и олова	Zn ₂ (SnO ₄)	8,7
Касситерит	SnO ₂	4,7
Медь – Кремний	Cu _{0,83} Si _{0,17}	1,9
Пирротин – 3Т	Fe ₇ S ₈	1,1

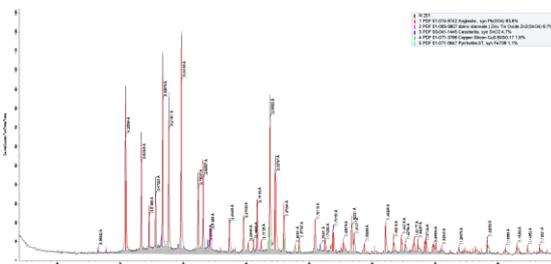


Рисунок 5. Рентгенограмма осадка первой стадии нейтрализации электролита

Третью стадию нейтрализации товарного электролита провели до pH 9.5. После фильтрации получили никель – цинксодержащий осадок состав которого приведен в таблице 5.

Из фильтрата третьей стадии нейтрализации после выпарки и кристаллизации получили товарный K_2SO_4 .

Осадок третьей стадии нейтрализации обработали раствором, содержащим 100 г/дм^3 КОН. При Ж:Т = 3:1 получили щелочной цинксо­дер­жа­щий раствор с содержанием ZnO 225.0 г/дм^3 и никель­со­дер­жа­щий осадок состава, мас. %: NiO 94.28; Fe_2O_3 5.09; CuO 0.63. После прокалки осадка при температуре 350°C и продолжительности 30 минут получили осадок оксида никеля (рисунок 6).

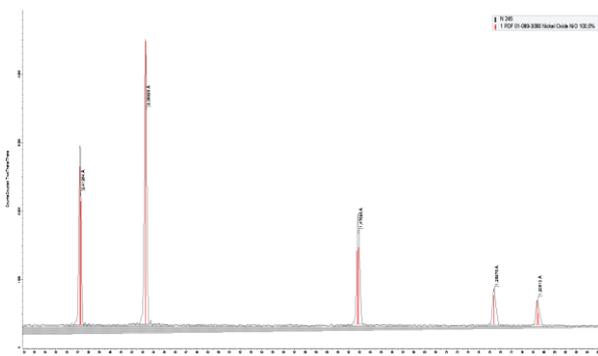


Рисунок 6. Рентгенограмма осадка оксида никеля

Щелочной цинк­со­дер­жа­щий раствор может быть использован для электроосаждения цинкового порошка.

4. Выводы

Проведены физико – химические исследования вещественного состава товарного электролита меди и цинковых возгонов переработки лома цветных металлов.

Для регенерации раствора электро­ра­фи­ни­ро­ва­ния меди использован метод стадийной нейтрализации. Впервые для регенерации электролита использованы цинк­со­дер­жа­щие пыли возгонки – промпродукта пирометаллургической переработки лома цветных металлов.

Определены режимы проведения стадийной нейтрализации.

Первую стадию нейтрализации проводили цинковыми возгонами, вторую и третью стадию – поташом.

На первой стадии нейтрализации до pH 4.7 получили свинец – оловосодержащий продукт с содержанием PbO 62.24 % и SnO_2 9.5 %, который может быть переработан вместе со свинец­со­дер­жа­щим шламом электро­ра­фи­ни­ро­ва­ния меди.

На второй стадии нейтрализации поташом до pH 7.1 получили осадок, после обработки которого в растворе содержащем 100 г/дм^3 КОН получили осадок с содержанием CuO 98.16%, который может быть возвращен в сернокислый раствор электро­ра­фи­ни­ро­ва­ния меди, либо переработан с получением оксида меди.

На третьей стадии нейтрализации до pH 9.5 получили никель – цинк­со­дер­жа­щий осадок с содержанием NiO 27.63 % и ZnO 55.75%. После обработки осадка раствором, содержащим 100 г/дм^3 КОН. При Ж:Т = 3:1 получили щелочной цинк­со­дер­жа­щий раствор с содержанием ZnO 225.0 г/дм^3 , который может быть использован для электроосаждения цинкового порошка и никель­со­дер­жа­щий осадок состава, мас. %: NiO 94.28; Fe_2O_3 5.09; CuO 0.63, после прокалки которого при температуре 350°C и продолжительности 30 минут получили осадок оксида никеля с содержанием NiO 89.14%.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке КН МОН РК по грантовому финансированию № AP09259315.

Литература / References

- [1] Pashkov, G.L., Fleitlikh, I.Yu., Kholkin, A.I., Luboshnikova, K.S., Sergeev, V.V., Kopanov, A.M., Grigorieva, N.A. & Nikiforova, L.K. (2010). Development and development of extraction processes at the Norilsk Mining and Metallurgical Combine. *Chemistry in the interests of sustainable development*, (3), 355-364
- [2] Kenzhaliyev, B., Surkova, T., Berkinbayeva, A., Dossymbayeva, Z., Yesimova, D. & Abdikerim, B. (2021). On methods of modifying natural minerals. *Proceedings of the IV International Practical Internet Conference "Challenges of Science". Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Satbayev University*, 4, 128-133. <https://doi.org/10.31643/2021.20>
- [3] Kasikov, A.G. (2010). The use of industrial waste in wastewater treatment processes. *Ecology and industry*, (2), 66-71
- [4] Olshanskaya, L.N. Sobgaida, N.A. & Valiev, R.S. (2015). Extraction of heavy metals from polluted effluents using adsorbents and phytosorbents. *Ecology and industry of Russia*, 11(19), 18-23
- [5] Levin, A.M., Bryukvin, V.A. (2010). On the use of reverse osmosis plant for utilization of nickel-cobalt industrial effluents and washing waters. *Non-ferrous metals*, (12), 32-33
- [6] Kenzhaliyev, B.K., Imangalieva, L.M., Manapova, A.I. & Azlan, M.N. (2021). Kaolinite clays as a source of raw materials for the aluminum industry of the Republic of Kazakhstan. *Complex Use of Mineral Resources*, 319(4), 5-12. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.34>
- [7] Taranovskaya, E.A. Sobgaida, N.A. & Morev, P.A. (2016). Composite materials for wastewater treatment from heavy metal ions. *Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference "Tatishchev readings: actual problems of science and practice"*, 217-220
- [8] Kenzhaliyev, B.K., Gladyshev, S.V., Abdulvaliev, R.A., Kuldeev, E.I., Beisembekova, K.O., Omarova, S.A. & Manapova, A.I. (2017). Development of technology for obtaining chromite concentrate from sludge tailings of enrichment. *Izvestia NAS RK, series of geology and technical sciences*, (3), 182-188
- [9] Lebed, A.B., Akulich, L.F. & Naboychenko, S.S. (2015). Obtaining salts of copper sulfate and nickel sulphate at Uralelectromed OJSC. *Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University*
- [10] Baymakov, Yu.V. Zhurin, A.I. (1977). Electrolysis in hydrometallurgy. *M.: Metallurgy*
- [11] Khudyakov, I.O., Tikhonov, A.I., Deev, V.I. & Naboychenko, S.S. (1977). Metallurgia copper. Vol.1. *Moscow: Metallurgy*
- [12] Borodina, L.S., Isyutina, I.V., Pinegina, N.D., Simkin, E.A. & Yanzen, V.I. (1981). Method of purification of copper electrolyte from impurities. *USSR Patent §827602*
- [13] Zhunusova, G.Zh., Kalyanova, O.A., Bedelova, Zh.D., Sydykanov, M.M. & Anarbekov, K.K. (2016). The process of purification of zinc sulfate solution from copper and cadmium. *Complex Use of Mineral Resources*, (4), 17-20

- [14] Golikov, V.M., Zhabekov, M.I., Zharmenov, A.A., Zhumashev, K., Omarov, N.B., Osip, E.A. & Plaksa, N.E. (1991). Method of purification of copper electrolyte from arsenic. *Patent SU §1643632*
- [15] Sedelnikov, V.A. (1972). *Non-ferrous metals*, 11, 85
- [16] Kasikov, A.G., Areshina, N.S., Malts, I.E., Zinkevich, T.R. & Mikhailenko, M.A. (2011). Sorption purification of solutions of copper-nickel production using "Purolite" ionites. *Sorption and chromatographic processes*, 5(11), 689-693

Түсті металл сынықтарын қайта өңдеу мысын электрофиндеу ерітінділерін кәдеге жарату

С.В. Гладышев, С.Д. Рахимова, Л.М. Имангалиева*, А.К. Касымжанова

Satbayev University, Металлургия және кең байыту институты, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: leila.imangalieva@mail.ru

Андатпа. Құрамында мырыш бар шаң бар мыс электрорафиндеу ерітінділерін кәдеге жарату түсті металл сынықтарын пирометаллургиялық өңдеу сублимациясы зерттеулерінің нәтижелері ұсынылған. Тауарлық электролитті бейтараптандыру тәсілімен Регенерациялау үшін құрамында мырыш бар шаңды сублиматорлар алғаш рет пайдаланылды. Шаң құрамындағы мырыш оксиді сульфат электролитінде еріген кезде бос күкірт қышқылының сульфат иондарын байланыстырады және ерітіндінің рН деңгейін жоғарылатады. Түсті металдардың тұндыру рН жеткенде, олар гидроксидтер түрінде жауын-шашынға бөлінеді, бұл олардың құрамындағы мыс, никель, мырыш, қорғасын және қалайының едәуір мөлшерін қайта өңдеуге қайтаруға мүмкіндік береді. Мыс тауарлық электролитінің және түсті металдардың сынықтарын қайта өңдеудің мырыш сублиматорларының заттық құрамына зерттеулер жүргізілді. Сатылы бейтараптандыру әдісімен электролитті тазарту шарттары анықталды. Бейтараптандырудың бірінші кезеңі мырыш сублимациясымен, екінші және үшінші кезең калиймен жүргізілді. рН 4.7-ге дейін бейтараптандырудың бірінші сатысы нәтижесінде қорғасын – құрамында қалайы бар өнім алынды, оны құрамында қорғасын бар мыс электроқорытпа шламымен бірге қайта өңдеуге болады. Калиймен рН 7.1-ге дейін бейтараптандырудың екінші кезеңі нәтижесінде тұнба алынды, содан кейін КОН ерітіндісінде мыс оксидінің тұнбасы алынды. рН 9.5-ке дейін бейтараптандырудың үшінші сатысы нәтижесінде құрамында никель-мырыш бар тұнба алынды. Тұнбаны КОН ерітіндісімен өндегеннен кейін құрамында мырыш бар ерітінді және құрамында никель бар тұнба алынды, оны қыздырғаннан кейін никель оксиді тұнбасы алынды.

Негізгі сөздер: мыс электролиті, калий, құрамында мыс бар тұнба, қорғасын – құрамында қалайы бар өнім, сілтілі ерітінді.

Утилизация растворов электрорафинирования меди переработки лома цветных металлов

С.В. Гладышев, С.Д. Рахимова, Л.М. Имангалиева*, А.К. Касымжанова

Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: leila.imangalieva@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований утилизации растворов электрорафинирования меди цинксо-держачие пыли возгонки пирометаллургической переработки лома цветных металлов. Цинксо-держачие пыли возгонки для регенерации товарного электролита способом нейтрализации использованы впервые. Содержащиеся в пылях оксид цинка при растворении в серноокислом электролите связывает сульфат ионы свободной серной кислоты и повышает рН раствора. При достижении рН осаждения цветных металлов они выделяются в осадки в виде гидроксидов, это позволяет вернуть в переработку значительное количество содержащихся в них меди, никеля, цинка, свинца и олова. Проведены исследования вещественного состава товарного электролита меди и цинковых возгонов переработки лома цветных металлов. Определены условия очистки электролита методом стадийной нейтрализации. Первую стадию нейтрализации проводили цинковыми возгонами, вторую и третью стадию – поташом. В результате первой стадии нейтрализации до рН 4.7 получили свинец – оловосодержащий продукт, который может быть переработан вместе со свинецсодержащим шламом электрорафинирования меди. В результате второй стадии нейтрализации поташом до рН 7.1 получили осадок, после обработки которого в растворе КОН получили осадок оксида меди. В результате третьей стадии нейтрализации до рН 9.5 получили никель – цинксо-держачий осадок. После обработки осадка раствором КОН получили цинксо-держачий раствор и никельсодержачий осадок, после прокалки которого получили осадок оксида никеля.

Ключевые слова: электролит, цинковые возгоны, поташ, нейтрализация, медь, никель, цинк, свинец, олово.

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i3.04>

Calculation of thermodynamic functions during agglomeration of heterogeneous charge components

Ye. Kobegen¹, D.A. Yessengaliyev^{1*}, B.M. Boranbaeva², N.B. Aitbaev², G.M. Koishina³

¹Aktobe regional university named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

²Karaganda technical university named after A. Saginov, Karaganda, Kazakhstan

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: dauralga@mail.ru

Abstract. The agglomerate, as a raw material of blast furnace melting, must have such a set of properties that meets the requirements of the blast furnace process to the maximum extent. The quality of agglomerates is assessed by chemical composition, mechanical and physico-chemical properties. A high-quality iron ore raw material for blast furnace melting is considered to be an agglomerate with a high iron content with a minimum content of harmful impurities, uniform in size with a minimum content of classes of more than 40 and less than 5 mm, a narrow range of softening and melting temperatures, having high reducibility and high strength. With the condition of the process of reducibility of dissimilar iron ore materials during agglomeration, it is necessary to consider the basic physico-chemical processes and thermodynamic conditions. The article describes the results of thermodynamic modeling of iron ore materials during the agglomeration process using the HSC Chemistry 5.10 program. Calculations are performed by the Reaction Equation subprogram. During the simulation, zonal technological processes of agglomeration of iron ore components of the charge are taken into account, since each zone corresponds to a certain phase formation due to physico-chemical processes corresponding to their temperature intervals. It is known, as a result of implementing all the basic physico-chemical processes of agglomeration of iron ore materials; they should positively affect the quality of the resulting product. As a result, thermodynamic functions were determined in the temperature range of 25-1500°C for chemical reactions occurring in various zones of iron ore materials during the agglomeration process.

Keywords: *agglomerate, pelletized charge, zonal structure, thermodynamic modeling, solid fuel gorenje, solid phase region.*

1. Введение

Современный агломерационный процесс относится к типу слоевых, когда проходящий через спекаемый рудный материал воздух обеспечивает протекание двух главных процессов:

- 1) горение твердого топлива шихты;
- 2) процесс переноса тепла из одного элементарного слоя в другой.

Слоевая зональность агломерации обусловлена интенсивными тепло- и массообменными процессами, протекающими в окомкованной шихте как следствие высокой удельной поверхности ее гранул (30-50 см²/см³). Именно этим объясняется относительно небольшая высота (по 15-40 мм) образующихся в процессе агломерации структурных зон плавления, интенсивного подогрева шихты, переувлажнения и конденсации влаги. На рисунке 1 представлены структурные состояния шихты по зонам при агломерации.

Суть процесса агломерации заключена в следующем: узкая область горения топлива перемещается с верхнего уровня агломерационной шихты к колосниковой решетке. Этот процесс сопровождается расширением зоны спека и смещением зон подогрева и переувлажнения вниз по высоте слоя шихты. В каждой зоне протекают физико-химические превращения, которые определяются

соответствующим интервалом температур и протекающими при агломерации шихты процессами. Перемещение слоя горения твердого топлива связано с воспламенением нагретых до 700-800°C твердых его частиц в примыкающей нижней границе, и догорания в верхней части области горения. Результатом процесса горения топлива является образование зоны плавления шихтовых материалов, которая также непрерывно перемещается вниз, в направлении движения газового потока, оставляя за собой области кристаллизации расплава и пористой структурой спека [1].

Поэтому при изучении закономерностей поведения компонентов шихты в условиях агломерации термодинамический анализ был выполнен с учетом рассмотрения зональных технологических процессов агломерации разнородных компонентов шихтовых материалов.

Следует учитывать, что в результате реализации всех основных физико-химических процессов, должен получаться агломерат требуемого качества и обеспечивать относительно высокие технико-экономические показатели. Логическая последовательность физико-химических процессов начинается с нижних зон, загруженной на паллете шихты, которая является твердофазной областью превращений. Она включает зоны исходной шихты, конденсации, переувлажнения и подогрева.

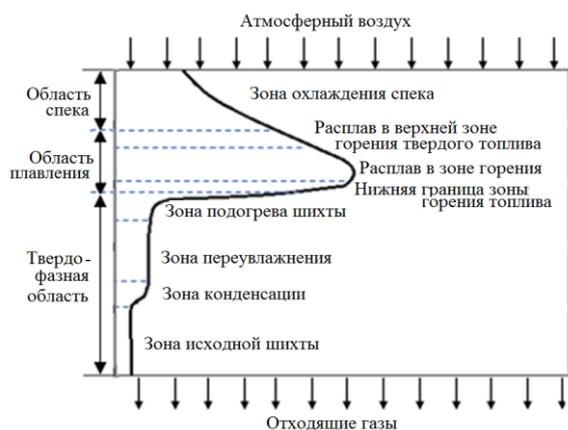


Рисунок 1. Зональная структура состояния агломерируемой шихты

Далее следует область плавления шихты, которая начинается с разложения отдельных фаз в нижней границе зоны горения твердого топлива, зона расплава и верхняя граница горения топлива, где реализуется процесс кристаллизации расплава. Завершается процесс агломерации в твердофазной зоне охлаждающейся спекшейся шихты.

Каждой зоне соответствует определенная фазовая структура системы, обусловленная физико-химическими процессами соответствующих их температурным интервалам. Анализ процесса агломерации нужно выполнять в интервале температур начиная от температур загрузки шихты $\sim 25^\circ\text{C}$ до максимально достигаемых при агломерации $\sim 1350\text{--}1400^\circ\text{C}$, рассматривая возможные к реализации в этих условиях уравнений химических реакций, как было указано ранее, сформированных на основе составляющих компонентов исходной шихты.

2. Методы исследования

В данной работе для определения термодинамических функций (ΔG , ΔH , $\log K$) химических реакций, протекающих в процессе агломерации при различных температурных интервалах, были использованы программный комплекс HSC Chemistry 5.10 подпрограммой «Reaction Equation» (Уравнения реакций) [2].

Пакет прикладных программ HSC Chemistry содержит набор средств, позволяющих радикально снизить затраты труда на проведение металлургических расчетов при одновременном повышении их качества. Проверенные алгоритмы вычислений, использование надежных исходных данных, заимствуемых из электронной базы данных, исключают возможные ошибки. Совместная работа в среде электронных таблиц Excel, дополненных возможностями встроенных функций HSC Chemistry, дает еще больше преимуществ в сравнении с традиционными приемами расчетов, которые сопряжены с возможностью возникновения ошибок или некорректных исходных данных. Сокращение времени, необходимого для расчета металлургического процесса, позволяет реализовать многовариантный расчет с изменением ряда технологических параметров, таких как состав сырья, количество и состав дутья, флюсов, и выбрать оптимальный режим. Результаты расчетов легко могут быть представлены графически, в виде технологической схемы с наложением исходных данных и ожидаемых результатов.

При расчете учитывали основные химические реакций агломерационного процесса, которые могли оказывать воздействие на ход металлургического процесса и, как следствие, работу металлургического оборудования и т.д. [2].

В таблице 1 приведены условия самопроизвольного течения реакций, которые были использованы для анализа возможности реализации протекающих в процессе агломерации реакций.

Таблица 1. Термодинамические условия самопроизвольного течения реакций

№	Показатели		Условия реализации реакции
	Энтропии	Энтальпии	
1	$\Delta S > 0$	$\Delta H < 0$	Энергия Гиббса всегда $\Delta G < 0$, реакция самопроизвольно протекает при любой температуре, реакция необратима
2	$\Delta S < 0$	$\Delta H > 0$	Энергия Гиббса всегда $\Delta G > 0$, реакция ни при каких условиях невозможна, но при любых условиях возможна обратная реакция
3	$\Delta S < 0$	$\Delta H < 0$	Энергия Гиббса $\Delta G < 0$, если $\Delta H > T\Delta S$, реакция возможна при низких температурах, чем ниже температура, тем спонтаннее реакция
4	$\Delta S > 0$	$\Delta H > 0$	Энергия Гиббса $\Delta G < 0$, если $\Delta H < T\Delta S$, чем выше температура, тем спонтаннее реакция

В качестве исходных данных для определения термодинамических функций для реальных составов шихт агломерата использовали следующие составы компонентов:

- гематитовый концентрат Атасу;
- бурожелезняковый концентрат Лисаковского месторождения (ЛГМК);
- магнетитовые руды Кентобинского и Атасорского месторождений;
- магнетитовый концентрат Соколовско-Сарбайского месторождений (ССГПО);
- карбонатные флюсоулирующие добавки (известняк, доломит и известь, отсеив извести конвертерного цеха);
- углерод содержащее твердое топливо – коксик;
- силикаты кальция, скрапа, закись железа, окислы и др. [3].

Результаты полученных термодинамических данных были выведены в виде таблицы, где приведены значения температуры, энтальпии, энергии Гиббса, константы равновесия и логарифм константы для исследуемых химических реакций [4].

3. Результаты и обсуждение

В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчета термодинамических функций химических реакций, в области твердофазных превращений ($25\text{--}700^\circ\text{C}$) протекающих в слое железорудных шихтовых материалов в процессе агломерации. Согласно зональности структуры агломерируемой шихты, процесс определения термодинамических функций в зависимости от фазообразования разбили на нескольких частей.

Таблица 2. Изменение ΔG° и ΔH° с температурой до температур воспламенения твердого топлива для характерных реакций дегидратации и других возможных реакций в твердофазной области процесса агломерации (в числителе - ΔG° , в знаменателе - ΔH°)

№ п/п	Реакция	ΔG° кДж / ΔH° кДж при температурном интервале 25-700°C							
		25	100	200	300	400	500	600	700
1.1	$H_2O_{\text{гипр}}=H_2O_{(r)}$	11.57	0.007	-10.42	-19.84	-28.11	-35.20	-41.26	-46.43
		45.041	40.873	36.516	31.192	23.375	15.421	7.592	-0.110
1.2	$2FeOOH_{(G)}=Fe_2O_3+H_2O_{(r)}$	13.57	-2.03	-17.30	-32.29	-47.07	-61.68	-76.20	-90.69
		56.682	55.509	54.267	52.996	51.797	50.797	50.247	50.333
1.3	$2FeOOH_{(L)}=Fe_2O_3+H_2O_{(r)}$	-2.50	-17.09	-31.63	-46.02	-60.23	-74.20	-87.93	-101.47
		37.419	37.301	36.881	35.985	34.629	32.897	31.018	29.16
1.4	$Fe_2O_3 \cdot H_2O=Fe_2O_3 + H_2O$	-1001.3	-1005.3	-1009.6	-1014.7	-1020.9	-1028.4	-1037.1	-1047.0
		-996.8	-990.0	-987.4	-982.9	-974.9	-965.8	-955.8	-944.5
1.5	$4Fe_3O_4+O_{2(r)}=6Fe_2O_3$	-1055.2	-1015.1	-975.3	-935.3	-894.7	-853.1	-810.1	-766.8
		-1163.9	-1164.4	-1163.5	-1165.4	-1171.1	-1180.8	-1188.4	-1187.3
1.6	$2Fe_{\text{мет}}+O_{2(r)} = 2FeO$	-491.86	-478.01	-464.69	-451.75	-439.07	-426.55	-414.08	-401.56
		-530.62	-528.58	-526.71	-525.07	-523.79	-523.03	-522.99	-524.10
1.7	$6FeO+O_{2(r)}= 2Fe_3O_{4(H)}$	-245.93	-225.39	-204.64	-184.33	-164.95	-146.90	-130.37	-115.09
		-301.03	-302.91	-302.23	-298.44	-291.31	-280.61	-268.78	-258.44
1.8	$FeO+H_2O_{(l)}=Fe(OH)_2$	-6.68	-2.28	2.83	8.56	15.10	22.54	30.73	39.57
		-17.43	-20.15	-22.796	-26.26	-32.13	-38.052	-43.78	-49.31
1.9	$Fe_2O_3 + 3H_2O = 2Fe(OH)_3$	45.61	54.99	66.48	79.63	95.05	113.07	133.39	155.82
		24.193	15.427	8.248	-1.118	-17.918	-35.488	-53.445	-72.055
1.10	$CaO_{\text{ост}} + H_2O_{(l)}=Ca(OH)_2$	-58.38	-55.70	-52.24	-48.13	-43.21	-37.42	-30.92	-23.82
		-64.39	-67.31	-70.14	-73.67	-79.45	-85.12	-90.44	-95.42
1.11	$Ca(OH)_2 + CO_2=CaCO_3 + H_2O$	-76.05	-62.76	-50.45	-38.99	-28.57	-19.22	-10.78	-3.12
		-113.86	-110.40	-106.67	-102.01	-94.94	-87.82	-80.89	-74.14

Таблица 3. Изменение ΔG° и ΔH° с температурой для характерных реакций между твердыми фазами в твердофазной области агломерации (в числителе - ΔG° , в знаменателе - ΔH°)

№ Пп	Реакция	ΔG° кДж / ΔH° кДж при температуре 100-1500 °C							
		100	300	500	700	900	1100	1300	1500
2.1	$FeO + SiO_2 = FeSiO_3$	-14.97	-14.23	-13.36	-12.16	-10.74	-9.19	-7.76	-4.67
		-16.31	-16.46	-17.19	-18.36	-20.05	-19.48	-18.48	-41.45
2.2	$2FeO + SiO_2 = Fe_2SiO_4$	-29.76	-28.00	-25.89	-23.30	-20.44	-17.52	-14.92	-9.23
		-32.62	-33.51	-34.86	-36.47	-38.13	-36.69	-33.54	-77.16
2.3	$Fe_2O_3 + CaO = CaO \cdot Fe_2O_3$	-28.88	-32.60	-35.32	-36.63	-36.91	-36.97	-43.14	-58.40
		-21.33	-23.18	-27.23	-34.30	-36.06	-36.93	73.82	79.97
2.4	$SiO_2 + CaO = CaSiO_3$	-90.03	-90.44	-90.78	-90.85	-90.80	-90.70	-90.77	-91.03
		-89.22	-89.31	-89.84	-90.62	-91.85	-90.82	-89.46	-87.79
2.5	$2CaO + SiO_2 = 2CaO \cdot SiO_2$	-135.6	-136.1	-136.5	-136.8	-138.0	-141.3	-145.3	-150.4
		-134.6	-134.9	-135.1	-134.7	-119.9	-116.4	-111.6	-91.99
2.6	$3CaO + SiO_2 = 3CaO \cdot SiO_2$	-118.3	-121.0	-124.0	-127.2	-130.8	-134.9	-139.8	-145.5
		-113.5	-113.0	-112.1	-110.5	-108.6	-103.8	-98.13	-91.66
2.7	$3CaO + 2SiO_2 = 3CaO \cdot 2SiO_2$	-239.5	-242.0	-244.3	-246.3	-248.4	-250.8	-254.1	-258.3
		-234.6	-235.1	-235.8	-236.2	-236.5	-231.4	-224.8	-216.7
2.8	$2CaO+SiO_2 = Ca_2SiO_4$	-109.5	-101.5	-82.09	-53.51	-17.60	24.47	71.72	123.56
		-111.4	-142.4	-176.1	-211.2	-247.8	-282.9	-318.6	-354.8
2.9	$CaCO_3 + Fe_2O_3 = CaO \cdot Fe_2O_3 + CO_{2(r)}$	89.57	54.52	21.31	-9.69	-38.89	-67.14	-100.7	-138.7
		156.38	152.49	145.70	135.25	129.44	123.79	229.05	190.35

Превращения в зонах переувлажнения и подогрева шихты. Как показали термодинамические расчеты (таблица 1) гигроскопическая и гидратная влага имеют термодинамическую возможность удаления в температурном интервале зоны подогрева шихты.

Гигроскопическая влага ($H_2O_{\text{гипр}}$) практически полностью выводится и процесс завершается до температур 500-600°C, о чем свидетельствует характер изменения скорости энергии Гиббса и логарифма константы равновесия реакции.

Что касается удаления гидратной влаги ЛГМК ($H_2O_{\text{гидр}}$ гетита и лепидокрокита - разновидности минерала гетита) можно считать, что завершение реакций разложения сдвигается из зоны сушки в область высоких температур и может частично попадать из зоны подогрева шихты в зону начала горения твердого топлива, где и завершается ее удаление. Так как удаление влаги по реакциям 1.2, 1.3 (таблица 2) экзотермический процесс, дегидратация требует значительного расхода тепла.

Кривые температурных зависимостей изменения энергии Гиббса, энтальпии, логарифма константы равновесия реакций дегидратации влаги приведены на рисунке 2.

Изменение энергии Гиббса (ΔG_0) в температурном интервале до 600°C (рисунок 3) свидетельствует, что реакции окисления $Fe_{\text{мет}}$ и его окислов, вносимых с агломерационным скрапом конвертерного цеха, могут протекать в нижней зоне твердофазных превращений по реакциям (1.5, 1.6, 1.7 в таблице 2).

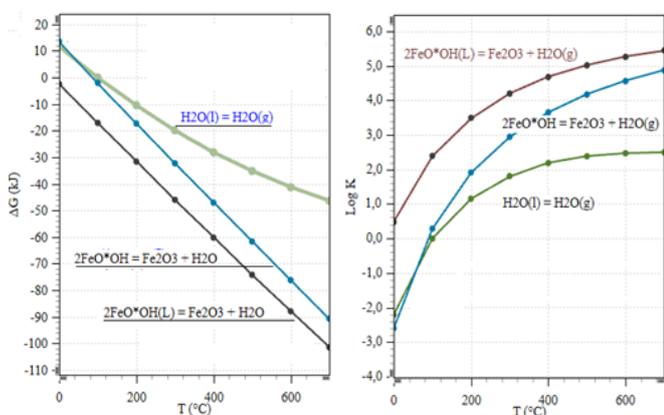


Рисунок 2. Графическая зависимость изменения энергии Гиббса и логарифма констант равновесия процесса удаления влаги от температуры в твердофазных зонах

Однако изменение величины логарифма константы равновесия (Log K), говорит, что в этом температурном интервале вероятность реализации реакции достаточно резко уменьшается.

Реакции между твердыми фазами. Нагрев шихтовых материалов отходящими из зоны горения топлива создают благоприятные условия для химического взаимодействия между твердыми фазами окомкованной шихты.

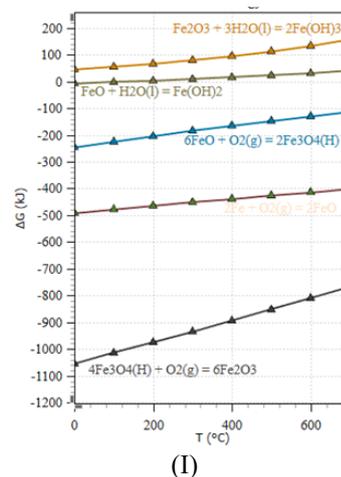
Считается, что реализации химических реакций в твердофазной области связана со взаимно расположенными компонентами в микрообъеме шихты. Таким образом, каждая частица имеет возможность реагировать только с непосредственно окружающими и контактирующими с ней частицами.

Диссоциация карбонатов шихты. Агломерационная шихта содержит флюсы в виде известняка ($CaCO_3$), а также доломита $CaMg(CO_3)_2$.

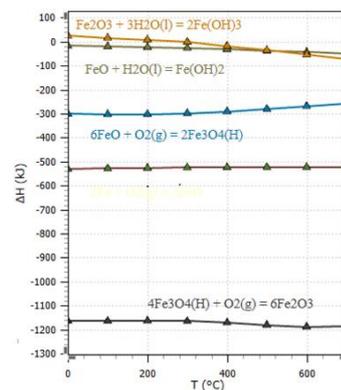
Диссоциация карбонатов начинается с разложения $FeCO_3$, который полностью завершается в твердофазной области (рисунок 4). Минералы доломита начинают диссоциировать выше 600°C . $CaCO_3$ диссоциирует при последующем нагреве около 900°C (в нижней зоне горения топлива).

Удаление вредных примесей. Вредные примеси S и P содержатся в компонентах шихты в виде минералов FeS_2 (дисульфида железа или пирротина в руде Кентобе),

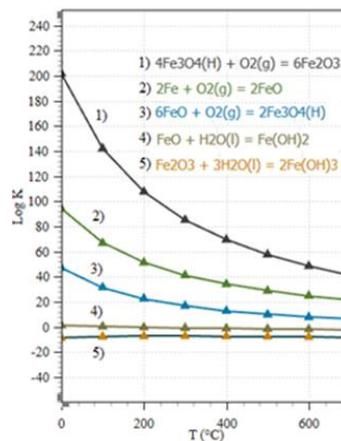
$CaSO_4$ (сульфата кальция в рудах Атасу, Атансор и др.), $BaSO_4$ (сульфата бария в Атасуйской руде) и $CaHPO_4$ (гидрофосфата кальция в ЛГМК). Гидрофосфат кальция $CaHPO_4$, содержащий фосфор, можно представить как структуру, образованную из структурных единиц CaO , H_2O и P_2O_5 . Поэтому в металлургических расчетах принимают P_2O_5 . Надо отметить, что структура сложных химических соединений, а следовательно, и $CaHPO_4$ является построение кристаллической решетки, образуемой одной из структурных единиц пустоты которой заполнены другими структурными единицами.



(I)



(II)



(III)

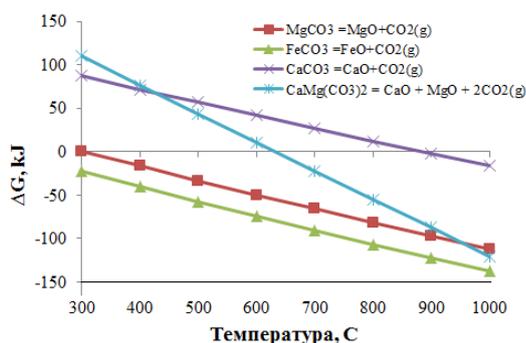
Рисунок 3. Изменение энергии Гиббса (ΔG^0) (I), энтальпии (ΔH^0) (II) и логарифма константы равновесия (Log K) (III) реакций окисления $Fe_{\text{мет}}$ и его окислов при температурах твердофазных превращений

Таблица 4. Изменение ΔG^0 и ΔH^0 с температурой реакций разложения карбонатов при агломерации (в числителе - ΔG^0 , в знаменателе - ΔH^0)

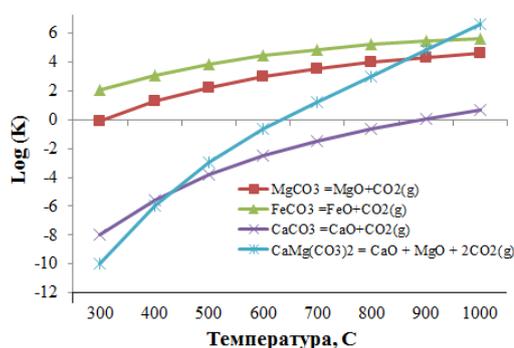
№ пп	Реакция	ΔG^0 кДж / ΔH^0 кДж при температурном интервале 300-1000 °С							
		300	400	500	600	700	800	900	1000
3.1	$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	87.13	71.78	56.64	41.70	26.95	12.4	-2.0	-16.2
		175.68	174.39	172.94	171.33	169.56	167.6	165.5	163.2
3.2	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2$	109.77	76.49	43.37	10.43	-22.28	-55.1	-87.3	-120.5
		300.093	300.03	293.76	297.08	294.92	291.01	288.75	285.14
3.3	$\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2$	0.72	-16.32	-33.11	-49.65	-65.90	-81.9	-97.5	-112.3
		98.98	97.58	95.77	93.53	90.82	87.6	84.0	20.8
3.4	$\text{FeCO}_3 = \text{FeO} + \text{CO}_2$	-21.62	-39.45	-56.99	-74.18	-90.96	-107.1	-122.7	-137.8
		81.24	79.69	77.36	74.20	70.17	63.0	57.2	50.4

Таблица 5. Изменение ΔG_T^0 (числитель) и ΔH_T^0 (знаменатель) в интервале температур от 600 до 1400°С

№ пп	Реакция	ΔG_T^0 кДж / ΔH_T^0 кДж при температуре °С								
		600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
4.1	$2\text{FeS}_2 = 2\text{FeS} + \text{S}_2(\text{g})$	40.6	12.8	-15.0	-42.8	-70.6	-98.4	-124.7	-156.9	-189.0
		284.1	283.6	283.1	282.9	283	283.8	350	349.3	348.5
4.2	$\text{S}_2(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) = \text{SO}_2(\text{g})$	-298.1	-290.8	-283.6	-276.3	-269.1	-261.9	-254.7	-247.6	-240.4
		-361.7	-361.6	-361.3	-361.1	-360.9	-360.7	-360.5	-360.3	-360.03
4.3	$3\text{FeS} + 5\text{O}_2(\text{g}) = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{SO}_2(\text{g})$	-1405.4	-1371.1	-1337.1	-1303.2	-1269.3	-1235.3	-1203.5	-1162.8	-1122.1
		-1706.8	-1703.4	-1701.4	-1700.7	-1701.2	-1702.9	-1803.1	-1802.9	-1802.6
4.4	$\text{SO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{H}_2\text{SO}_3(\text{a})$	96.4	121.2	147.7	175.9	205.5	236.5	268.8	302.3	336.9
		-111.5	-128.7	-146.0	-163.4	-180.8	-198.3	-215.8	-233.4	-251.0
4.5	$2\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g}) = 2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{l})$	-155.1	-125.5	-95.6	-65.5	-35.11	-4.51	26.31	57.35	88.60
		-411.9	-414.7	-417.5	-420.3	-423.3	-426.2	-429.4	-432.6	-436.0
4.6	$2\text{FeS}_2 + 5.5\text{O}_2(\text{g}) = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2(\text{g})$	-1531.8	-1517.1	-1502.8	-1488.5	-1474.3	-1460.2	-1446.1	-1432.0	-1418.0
		-1661.7	-1657.5	-1656.2	-1655.4	-1654.6	-1654.0	-1653.4	-1653.0	-1652.6
4.7	$\text{CaSO}_4 + \text{C} = \text{CaO} + \text{SO}_2(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$	74.55	39.11	4.01	-30.74	-65.15	-99.21	-132.9	-136.9	-198.8
		385.5	382.3	378.8	374.9	370.6	366.1	356.2	352.0	347.8
4.8	$2\text{BaSO}_4 = 2\text{BaO} + 2\text{SO}_2(\text{g}) + \text{O}_2$	729.7	675.4	621.9	569.1	517.1	465.8	416.0	367.4	319.2
		1206.7	1200.0	1192.4	1184.0	1174.7	1164.6	1154.4	1128.1	1121.7
4.9	$2\text{CaHPO}_4 + \text{CaO} = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-54.6	-56.9	-59.4	-61.7	-63.9	-66.1	-68.3	-70.6	-72.8
		-30.8	-32.2	-33.6	-34.8	-36.0	-37.1	-33.8	-35.5	-37.5
4.10	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	-88.8	-95.4	-101.5	-107.7	-113.9	-119.9	-125.9	-131.7	-137.5
		-29.6	-35.1	-35.1	-35.2	-36.2	-37.7	-39.2	-40.6	-41.7
4.11	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	-1.3	-2.7	-4.0	-5.3	-6.6	-8.1	-9.7	-11.3	-14.1
		12.4	10.2	9.7	10.0	11.1	12.5	14.2	15.8	89.8



(I)

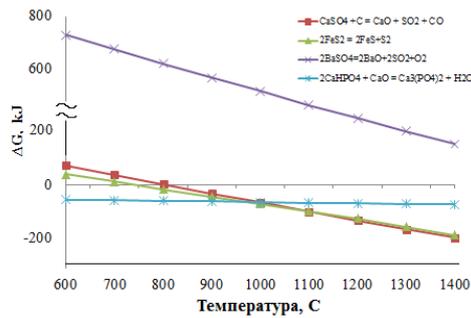


(II)

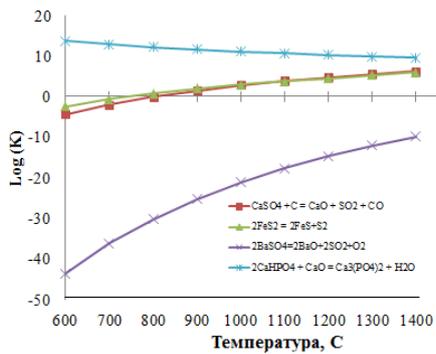
Рисунок 4. Изменение энергии Гиббса (ΔG_0) (I) и логарифма константы равновесия ($\text{Log } K$) (II) реакций разложения карбонатов в области твердофазных превращений

Реакции восстановления окислов. В состав ЖРЧ шихты могут входить окислы железа Fe_2O_3 , Fe_3O_4 которое претерпевает восстановление в этом интервале температуры. В таблице 5 приведены результаты термодинамических расчетов изменения энергии Гиббса (ΔG_T^0), эн-

тальпии (ΔH_T^0) в интервале температур от 600 до 1400°С для реакций, описывающих поведение вредных примесей и восстановление окислов железа.

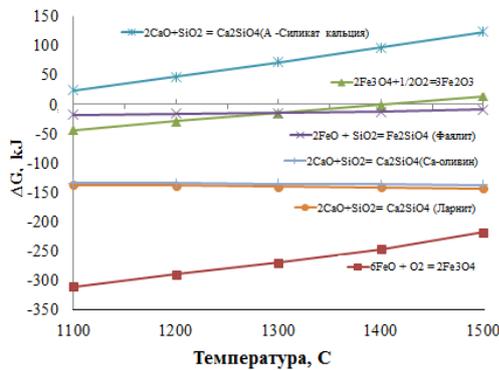


(I)

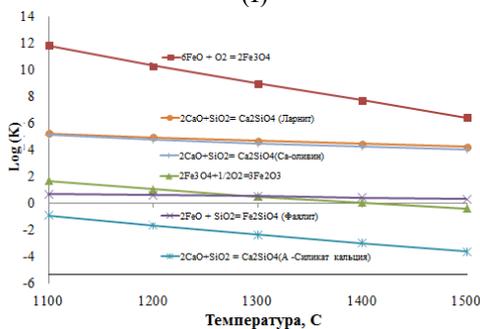


(II)

Рисунок 5. Зависимость изменения энергии Гиббса (I) и логарифма констант (II) равновесия от температуры процессов удаления вредных примесей



(I)



(II)

Рисунок 6. Зависимость изменения энергии Гиббса (I) и логарифма констант (II) равновесия реакций, протекающих при кристаллизации расплава

По данным [1] возможно часть серы, входящая в состав пирротина, удаляется по реакции (4.1) с выделением ее в парообразном состоянии не достигая 700°C, конденсируется в нижележащих холодных слоях шихты с последующим удалением по реакциям (4.2, 4.3).

Незначительное содержание пирита (до 2.8%), кусковатость руды Кентобе (0-10 мм), высокая зональная скорость нагрева не способствует удалению серы по реакции (4.6). Более вероятным механизмом удаления серы пирита представляется одновременно протекающие в одном объеме реакции (4.1, 4.2, 4.3) при температурах верхней части зоны подогрева и нижних зон горения топлива до образования расплава. Приведенный расчет (таблица 5) свидетельствуют, что температура реакция (4.1) соответствует - порядку 800°C.

Превращения при кристаллизации. Превращения при кристаллизации формируют макро- и микроструктуру агломерационного спека.

В таблице 6 приведены данные изменения ΔG_T^0 и ΔH_T^0 реакций возможных к реализации в температурной области кристаллизации расплава.

Таблица 6. Изменение энергии Гиббса и энтальпии реакций кристаллизации при агломерации

№ пп	Реакция	ΔG_T^0 , кдж / ΔH_T^0 , кдж при температуре °C			
		1100	1200	1300	1400
5.1	6FeO + O ₂ (g) = 2Fe ₃ O ₄ (Магнетит)	-310.4	-290.2	-269.8	-247.2
		-587.1	-589.4	-591.8	-738.8
5.2	2Fe ₃ O ₄ + 1/2O ₂ (g) = 3Fe ₂ O ₃ (Гематит)	-43.36	-28.88	-14.52	-0.28
		-243.3	-241.3	-239.4	-237.8
5.3	2FeO + SiO ₂ = Fe ₂ SiO ₄ (Фаялит)	-17.52	-16.17	-14.92	-1313
		-36.6	-35.3	-33.5	-79.4
5.4	2CaO + SiO ₂ = Ca ₂ SiO ₄ (а-Силикат кальция)	24.47	47.5	71.73	97.1
		-283.0	-300.7	-318.7	-336.7
5.5	2CaO + SiO ₂ = Ca ₂ SiO ₄ (Ларнит)	-137.2	-138.5	-140.0	-141.6
		-120.3	-118.0	-115.5	-112.6
5.6	2CaO + SiO ₂ = Ca ₂ SiO ₄ (Ca-оливин)	-134.4	-134.7	-135.3	-136.0
		-131.6	-128.7	-125.5	-121.8

Охлаждение спека. При охлаждении спека могут протекать реакции окисления, основные из которых 1.5 и 1.6 были рассмотрены ранее как протекающие в температурном интервале твердофазной области (таблица 2).

4. Выводы

Надо отметить, что даже на отвалах конвертерного шлака, составляющая микроструктуру скрапа $Fe_{мет}$ в виде королек не способно самопроизвольно окисляться кислородом воздуха во влажной среде, образуя окислы по вышеуказанным реакциям и ржавчину по реакции: $4Fe + 3O_2 + 6H_2O + 4Fe(OH)_3$. Так как крупные фракции конвертерного шлака представляет собой многокомпонентную [5] плотную систему, затрудняющую диффузии кислорода и влаги воздуха.

В зонах твердофазной области могут реализоваться процессы гидратации (гашения) остаточной извести, поступающей в шихту с окалиной по реакции $CaO_{ост} + H_2O = Ca(OH)_2$, а также, реакции карбонизация гидратов кальция $Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$, отходящим газом, просасываемым через слой сырой шихты [6].

При окомковании шихты с добавками диспергированной известью в твердой фазе окислы железа, кремнезема будут контактировать с CaO и имеют равные возможности ко взаимодействию. Как показал термодина-

мический расчет основных характерных реакций, приведенный в таблице 3 все, они могут реализоваться в твердофазной области.

Учитывая скоротечность смен зон, практически значимое при протекании твердофазных химических реакций должно иметь образование только первичных продуктов реакций CaSiO_3 , $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, FeSiO_3 и Fe_2SiO_4 независимо от количества тех или иных окислов в шихте [7].

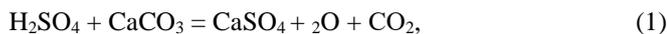
Несмотря на то, что продуктом разложения является образующийся газ CO_2 , диссоциация карбонатов извести и особенно доломита может не завершиться полностью при агломерации, если скорость перемещения зон не обеспечит завершение процесса.

В связи с этим должны предъявляться жесткие требования при подготовке комбинированного флюса по показателю содержания фракции крупнее 4 мм не более 5%, а также – к твердому топливу.

Наличие серы в виде сульфата бария и гидрофосфата кальция ограничивает номенклатуру выплавляемой стали.

В литературе есть данные, что отходящие газы SO_2 взаимодействуя с влагой шихты образуют по реакции 4.4 - H_2SO_3 [1]. Как показали расчеты (таблица 5) более благоприятны термодинамические параметры для взаимодействия отходящих газов по реакции (4.5) $2\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{SO}_4$.

Продукт реакции взаимодействуя с карбонатами образуют сульфаты:



Расчеты свидетельствуют, что сульфат кальция может разлагаться при температурах около 900°C , что касается серы сульфата бария она не удаляется при агломерации. Жидкий расплав представляет собой раствор, состоящий из структурных единиц, которые будут служить центрами образующихся при кристаллизации расплава минералов агломерата.

Таким образом, путем термодинамического анализа рассмотрена принципиальная возможность протекающих и формирующих структуру спека физико-химических превращений при агломерации разнородных компонентов шихты.

Литература / References

- [1] Frolov, Yu. A. (2016). Agglomeration. Technology. Heat engineering. Management. Ecology. M.: Metallurgizdat
- [2] Ageev, N.G., Naboychenko, S.S. (2016). Metallurgical calculations using the HSC Chemistry application package. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University
- [3] Frolov, Yu. A. (2017). A state and prospects of development of agglomerate production technology. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 10(1414), 40-53
- [4] Dantaeva, A.Z., Ibraev, M.B. & Sultamurat, G.I. (2020). Thermodynamic analysis of interactions between charge components in the process of obtaining metallurgical silicon. *News of Science of Kazakhstan*, №2(144), 98-117
- [5] Aitbaev, N.B., Kobegen, Ye., Skranzhevskaya, E.V. & Boranbaeva, B.M. (2021). Ways to solve problem of converter slag utilization in metallurgical processing. *Metallurgist*, (3), 88-96
- [6] Boranbayeva, B.M., Sultamurat, G.I. & Kobegen, E. (2021). Patterns of behavior of heterogeneous components of the charge during agglomeration in the zones of waterlogging and heating of the charge. *International scientific and practical online conference "Modern engineering innovations and technologies"*, Kokshetau: KU named after Sh.Ualikhanov, (1), 182-185
- [7] Korotich, V.I., Frolov, Yu.A. & Bezdezhsky, G.N. (2003). Agglomeration of ore materials. Scientific publication. Yekaterinburg: SEI HPE "USTU-UPI"

Әртекті компонентті шихтаны агломерациялау кезіндегі термодинамикалық функцияларды есептеу

Е. Көбеген¹, Д.А. Есенғалиев^{1*}, Б.М. Боранбаева², Н.Б. Айтбаев², Г.М. Койшина³

¹Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

²Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

³Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: dauralga@mail.ru

Андатпа. Агломерат домендік балқытудың шикізаты ретінде домендік процестің талаптарын барынша қанағаттандыратын қасиеттер кешеніне ие. Агломераттардың сапасы химиялық құрамы, механикалық және физико-химиялық қасиеттері бойынша бағаланады. Домнаны балқытуға арналған жоғары сапалы темір рудалы шикізат құрамында зиянды қоспалардың ең аз мөлшері бар, көлемі бойынша 40-тан астам және 5 мм-ден кем сыныптардың ең аз құрамы бар, жұмсарту және балку температураларының тар интервалы, жоғары қалпына келу және жоғары беріктігі бар темір мөлшері жоғары агломерат болып саналады. Агломерация кезінде гетерогенді темір рудалы материалдарды қалпына келтіру процесінің шартымен негізгі физико-химиялық процестер мен термодинамикалық жағдайларды ескеру қажет. Мақалада HSC Chemistry 5.10 бағдарламасын қолдана отырып, агломерация процесінде темір кені материалдарын термодинамикалық модельдеу нәтижелері келтірілген. Есептеулер «Reaction Equation» кіші бағдарламасында орындалды. Модельдеуді жүргізу кезінде шихтаның темір кені компоненттерін агломерациялаудың аймақтық технологиялық процестері ескерілді, өйткені әрбір аймаққа олардың температуралық аралықтарына сәйкес келетін физикалық-химиялық процестермен шартталған белгілі бір фазаның түзілуі сәйкес келеді. Белгілі болғандай,

темір кені материалдарының агломерациясының барлық негізгі физика-химиялық процестерін іске асыру кезінде нәтижесінде алынатын өнімнің сапасына оң әсер етуі тиіс. Нәтижесінде агломерация процесінде әртүрлі аймақтарда өтетін темір кені материалдарының химиялық реакциялары үшін 25-1500°C температура аралығындағы термодинамикалық функциялар анықталды.

Негізгі сөздер: агломерат, кесектелген шихта, аймақтық құрылымы, термодинамикалық модельдеу, қатты отынның жануы, қатты фазалар облысы.

Расчет термодинамических функции при агломерации разнородных компонентов шихты

Е. Кобеген¹, Д.А. Есенгалиев^{1*}, Б.М. Боранбаева², Н. Айтбаев², Г.М. Қойшина³

¹Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актюбе, Казахстан

²Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан

³Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: dauralga@mail.ru

Аннотация. Агломерат, как сырье доменной плавки, должен обладать таким комплексом свойств, который в максимальной степени удовлетворяет требованиям доменного процесса. Качество агломератов оценивают по химическому составу, механическим и физико-химическим свойствам. Высококачественным железорудным сырьем для доменной плавки считается агломерат с высоким содержанием железа при минимальном содержании вредных примесей, равномерный по крупности при минимальном содержании классов более 40 и менее 5 мм, узким интервалом температур размягчения и плавления, обладающий высокой восстановимостью и высокой прочностью. С условием процесса восстановимости разнородных железорудных материалов при агломерации необходимо учитывать основные физико-химические процессы и термодинамические условия. В статье приведены результаты термодинамического моделирования железорудных материалов при процессе агломерации с использованием программы HSC Chemistry 5.10. Расчеты выполнены подпрограммой «Reaction Equation». При проведении моделирования учтены зональные технологические процессы агломерации железорудных компонентов шихты, так как каждой зоне соответствует определенная фазаобразования, обусловленная физико-химическими процессами соответствующих их температурным интервалам. Как известно, при реализации всех основных физико-химических процессов агломерации железорудных материалов, в результате должны положительно повлиять на качество получаемого продукта. В результате были определены термодинамические функций в интервале температур 25-1500°C для химических реакций, протекающих в различных зонах железорудных материалах при процессе агломерации.

Ключевые слова: агломерат, окомкованная шихта, зональная структура, термодинамическое моделирование, горение твердого топлива, твердофазная область.

Orthogonal-contour geometrization of hydrogenetic ore mineralizations

A. Mendygaliyev^{1*}, Ya. Arshamov¹, E. Yazikov²

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

*Corresponding author: adilmslm@mail.ru

Abstract. The article presents an innovative approach to the geometrization of ore bodies during exploration work based on geophysical and/or core studies in wells for the purpose of areal and thickness delineation of hydrogenetic ore mineralization. The method makes it possible to obtain more accurate contours of ore bodies with a minimal increase in the number of wells constructed for this purpose. The method can be used in planning and conducting exploration work on hydrogenetic deposits. On the example of reservoir-infiltration uranium deposits of the Shu-Sarysu uranium ore province located in South Kazakhstan, shortcomings in the geometrization of ore bodies using the traditional method of placing of geological exploration wells are demonstrated, as well as the shortcomings of the proposed in literature methods of ore geometrization and the main advantages of the proposed innovative approach. The developed method solves a number of significant problems in the subsequent planning and implementation of mining and preparatory work at hydrogenetic deposits, contributes to a significant increase in the accuracy of the geometrization of ore bodies and calculation of reserves, and increases the reliability and investment attractiveness of explored hydrogenetic deposits. This method can also be used to save money by reducing the number of wells being constructed, if used for an inverse problem in order to discharge placement of exploration wells in middle part of ore bodies in hydrogenetic fields with a dense drilling grid.

Keywords: geometrization of ores, geological exploration, ore bodies delineation, well placement, hydrogenetic deposits, orthogonal geometrization.

1. Introduction

On the one hand, increasing the level of exploration of ore mineralization serves as the main factor in reducing the risks of possible non-confirmation of the obtained results and non-rational approach to nature management, as well as the primary way to create a more valuable and reliable asset in the subsurface. But, on the other hand, as costs increase, there is a risk of unjustified unnecessary exploration costs, as well as a reduction in the total number of studied ore objects due to the limited total amount of funds for exploration. Achieving an optimal balance between funds spent and time on the resulting detail and reliability of exploration work refers to the best solution when creating a mineral resource base and avoids subsequent unjustified expectations, as well as unforeseen and unnecessary costs for the preparation of its development.

Due to the fact that hydrogenous ore formation has a zonal nature of ore mineralization [1,2], its geometrization during exploration works is well amenable to systematization with little chance. For this reason, as an example, on hydrogenous uranium deposits in Kazakhstan at geometrization of ore bodies at the stage of detailed exploration to the category of C1 reserves, a geological exploration network of 200x50 m is used [3]. Small in power (from the first meters to the first tens of meters) and narrow in width (in average 200-1000 m), as well as long (from several to tens of km) ore bodies [4] are penetrated by a network of vertically drilled

holes with 50 m distance between holes across the movement of ore water and with 200 m distance between cross-sections (Figure 1) [5].

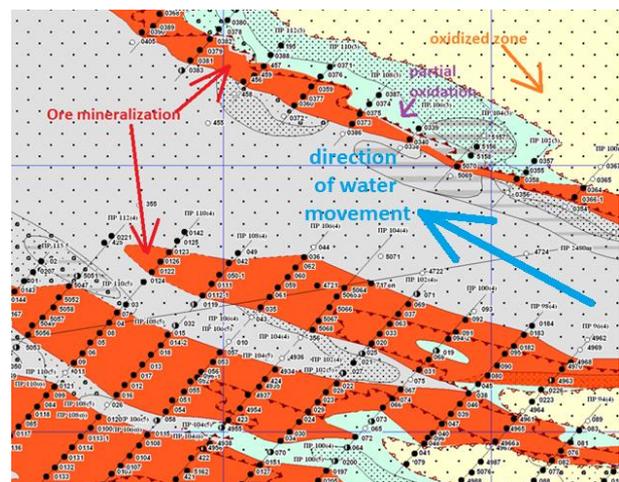


Figure 1. Example of a 200x50 m exploration network at a uranium deposit in the Shu-Sarysu uranium province

To perform geometrization of ores with this approach, boreholes are drilled along the ore profiles up to the exit from the ore bodies, and ore profiles are drilled as the zones advance up to the exit from the ore bodies by the width of the adjacent ore profiles (Figure 1).

Unfortunately, this approach does not allow to obtain the most accurate contours of ore bodies between profiles, the distance between which is 4 times or more than the distance between the wells. As a result, a part of profitable for mining ores turns out not to be covered by geological blocks and not considered on the balance sheet. Besides, during the mine-preparation planning and opening of ore bodies some part of technological holes appears out of the ore mineralization zone and some other part of delineating ore bodies occupy not advantageous position relatively to the edges of ore bodies. In literature [6] the most advantageous solution for a more accurate geometrization of ores is an orthogonal system, in which in addition to the transverse exploration profiles, longitudinal profiles are carried out perpendicularly to the same network. But this approach does not consider the true width of ore bodies and leads to unnecessary costs for geometrization in wide ore bands, and also does not justify itself in cases when the contour of ore bodies passes between longitudinal profiles.

The traditionally used 200x50 m exploration network ignores the literature recommendation based on mathematical modeling and turns the savings of exploration funds into a decrease in the quality of reserves calculation, the plan of mining operations and into an increase in the cost of mining preparation processes with a decrease in their quality. In order to improve the quality of geometrization of ore bodies without unjustified costs of their implementation, this paper proposes an innovative orthogonal-delineation approach for delineation ore bodies in plan. The orthogonal-delineation method will allow to obtain even more accurate results of geometrization of hydrogenous ore bodies than the literature recommended orthogonal, while using a smaller number of wells constructed for this purpose.

2. Materials and methods

To implement the orthogonal-delineation geometrization of ore bodies when drilling holes on the ore profile, the exit from the ore body from the last ore hole is also carried out in perpendicular directions (Figure 2). I.e. if an ore well is adjacent to a non-ore or an off-balance well on the geological exploration profile, then near such an ore well perpendicularly to the adjacent well at the same distance delineation wells are constructed. And then the delineation continues along the network of inter-well spacing according to the same rule until the complete delineation is completed.

Eventually 2 more perpendicularly neighboring wells are drilled near each well adjacent to a non-ore or off-balance well, and each well adjacent to two or three non-ore wells is always surrounded by neighboring wells on all four sides. I.e., when the orthogonal delineation geometrization of ore bodies with 200x50 m net drilling (distance between the exploration profiles of 200 m, and 50 wells in a row) at the boundary of ore bodies (at the exit of the ore body) is used a network 50x50m. Similarly, with a network of 400x50 m, 800x50 m, etc. Thus, to delineate the boundaries of the balance ore bodies, the minimum distance between the wells in the adopted exploration network along the entire boundary of the ore body in all four directions of the exploration network along and across the strike of the ore bodies is applied. In this case, the exit from the off-balance ore to the "waste" rocks is carried out in the usual way (along the profiles of the exploration network).

To visualize the result on the conditional ore body, similar to the real one, the construction of exploration wells by the conventional network of 200x50 m and orthogonal-delineation holes was simulated (Figure 2.), after that the geometrization of geological blocks was carried out by the traditionally accepted methodology (Figure 3). In geological blocking, the block boundary between ore and non-ore wells is drawn for a quarter of the network, as the average off-balance areas will be in the middle of the network, and the balance areas in this case will be on average limited to a quarter of the network. The areas of the simulated geological blocks are then compared with the contours of the conventional true ore bodies and the discrepancies are analyzed to compare the delineation methods.

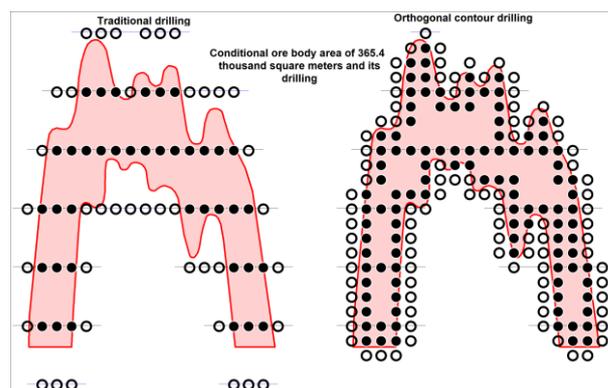


Figure 2. Example of orthogonal delineation geometrization

3. Results and discussion

The results of blocking are shown in Figure 3 and are clearly visible at a glance. With the traditional method of geometrization using a 200x50 m grid, a conditional balance ore body of 365.369 square meters was penetrated by 39 ore holes, delineated by 17 off-balance and 23 "empty" holes. The area of the geological block was 316.250 square meters. At the same time 64.137 square meters of the ore body (18%) were not covered by the geological block, and 15.018 square meters of the block (4.7%) were outside the ore body. Thus, the geometrization error was 79.155 square meters (21.7%). In the orthogonal delineation geometry, the same ore body was penetrated by 110 ore holes, delineated by 44 off-balance holes and 49 "empty" holes. The area of the geological block was 335.781 square meters. However, 40.397 square meters of the ore body (11%) were not covered by the geological block and 10.809 square meters of the block (3.4%) were outside the block.

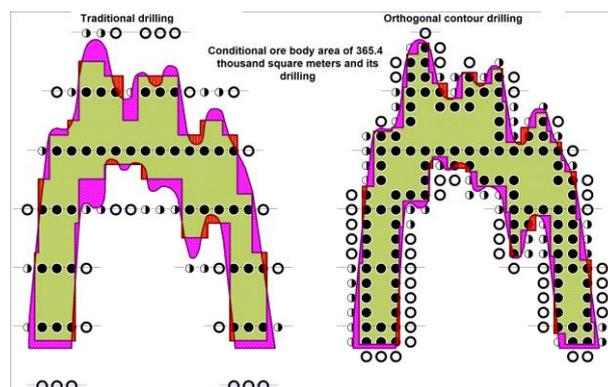


Figure 3. Geological blocking of the conventional ore body

Thus, the geometry error was 51.206 sq. m. (14%), which is 27.949 sq. m. (7.6% of the ore body) less than the traditional method. Thus, the geometry error was 51.206 sq. m. (14%), which is 27.949 sq. m. (7.6% of the ore body) less than the traditional method. In addition to refining the balance mineralization, the amount of data on off-balance grades has increased significantly, which will allow for more accurate blocking of off-balance blocks and facilitate mining planning. Moreover, additional data will necessarily clarify the geological structure of productive horizons, their lithologic-filtration and facies structure, and the morphology of ore bodies, increasing the reliability of the results and reducing the risks of incorrect correlation of bodies and horizons. Of the disadvantages, it should be noted the need to use exclusively independent of the uniformity of the network ways of calculating reserves (for example, by the method of Voronoi polygons [7] or three-dimensional block modeling, etc.), or to combine a large number of wells to create a uniformity of the network.

4. Findings

Despite the fact that to reduce the error from 79.155 sq. m. to 51.206 sq. m. (by 27.949 sq. m., which is 35.3% of the unconfirmed sum) it was necessary to drill 128 more wells (203 with the orthogonal delineation method vs. 79 with the traditional method), it is important to note a number of nuances in this situation. Firstly, it is impossible to obtain the same geometrization refinement by any other method with fewer wells. Secondly, the form of blocks itself has taken much more true form and significantly increased the understanding of profitability of individual sections, due to which the narrow parts can be transferred to the technological off-balance relative to the profitable network of geotechnological cells. Thirdly, expansion of technologically profitable zones and preparation of technologically profitable ores not considered earlier was carried out, which should instantly recoup the costs generated in the subsurface assets.

Fourthly, practically the whole part of orthogonal-delineation drilling is always carried out in problematic, narrow and not large in area ore parts, most of which would have been planned for mining works and penetrated by technological wells with approximately the same inter-well spacing, and then would have led to big problems. Fifth, this approach allowed a large number of wells with off-balance grades to be mapped with high accuracy (44 vs. 17), which will greatly improve the quality of further planning of mining operations and ore opening. Sixth, as an example of geological exploration of formation-infiltration uranium deposits, in contrast to prospecting and preliminary exploration, at the stage of detail is much cheaper, non-core drilling (delineation by geophysical survey data) and, therefore, without the implementation of core documentation, without sampling and without chemical-analytical studies.

If we consider that only a part of the deposit belongs to the demonstrated narrow ore bodies, orthogonal-delineation geometrization will not affect the total cost of exploration works so much, will increase the total cost of exploration works approximately by 5-10%, but will solve about 35% of problematic cases and give the above-described improvements and some other improvements.

5. Conclusions

Innovative approach of geometrization of ore bodies allowed on conditional ore body by means of conditionally drilled additional 128 orthogonal delineation holes to account for additional 23.740 sq.m. of ore body. For example, if average cost of a hole was 1.5 million tenge, additional 192 million tenge would have been required to construct them, but with average ore thickness of 6 m and average uranium content of 0.03%, increment of profitable ores would have been about 68.37 tons of uranium, total cost about 3.424 million tenge. Also, this approach prevented mining planning and uncovering of non-existing ores in an area of 4209 km. m (11 injection wells, thereby preventing errors in several planned technological cells) and brought a number of other improvements.

As a result, this method showed a number of advantages over the traditional and system of geometrization of ores proposed in literature. The cost of work on the example of layer-infiltration uranium deposits is projected at an acceptable and justifiable level. The increase in the number of involved market production facilities, funds and time is compensated by the reduction of involved facilities, funds and time for mining works. Under similar conditions the method is recommended for application.

References

- [1] Kislyakov, Ya.M., Shetochkin, V.N. (2000). Hydrogenetic ore formation. *Moscow: CJSC Geoinformmark*
- [2] Batulin, S.G., Grushevoy, G.V., Perelman, A.I. et al. (1980). Hydrogenetic deposits of uranium. Fundamentals of the Theory of Education. *Moscow: Atomizdat*
- [3] Instruction on the application of the classification of reserves to hydrogenetic uranium deposits (Addendum to the Instructions on the application of the classification of reserves to deposits of radioactive ores). (2008). *Committee of geology and subsoil use of the Ministry of energy and mineral resources of the Republic of Kazakhstan, State Commission on Mineral Reserves, Astana*
- [4] Report on deep geological mapping of the Mesozoic-Cenozoic cover of the Chu-Sarysu depression on a scale of 1: 200000 sheets L-42-XXII, XXVIII, XXXII(124), XXXIII, XXXIV, K-42 -III (5-B, 6-A, B, D), IV (7-8) for 1996-2001. (2002). *JSC "Volkovgeologia", Almaty*
- [5] Report on the results of detailed exploration of area 4 of the Inkai uranium deposit for the period 2006-2008 with the calculation of uranium and PPK reserves as of 01.07.2008. under Contract No. 1800 dated July 08, 2005. and Supplement 1 No.1830 dated September 15, 2005. (2008). *JSC "Volkovgeologiya", Almaty*
- [6] Brovin, K.G., Grabovnikov, V.A., Shumilin, M.V. & Yazikov, V.G. (1997). Forecast, prospecting, exploration and commercial evaluation of uranium deposits for mining by underground leaching. *Almaty: Gylim*
- [7] Mendygaliyev, A.A., Selezneva, V.Yu. & Yazikov, E.G. (2020). Development and innovative solutions to urgent problems of geological exploration of hydrogenous uranium deposits. *Scientific, Technical and Industrial Mining Journal of Kazakhstan*, 3(179)

Гидрогенді кенденулердің ортогоналды-контурлы геометриялануы

А. Мендығалиев^{1*}, Я. Аршамов¹, Е. Язиков²

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

*Корреспонденция үшін автор: adilmslm@mail.ru

Андатпа. Мақала материалы гидрогенді минералды жаралымдарды алаңдық және қалыңдық бойынша контурлау мақсатында ұңғымалардағы геофизикалық және/немесе керндік зерттеулерге негізделген геологиялық барлау жұмыстары кезінде кен денелерін геометриялаудың инновациялық тәсілін сипаттаудан тұрады. Бұл әдіс осы үшін салынған ұңғымалар санының минималды өсуімен кен денелерінің дәлірек контурларын алуға мүмкіндік береді. Бұл әдісті гидрогенді кенорындарында геологиялық барлау жұмыстарын жоспарлау және жүргізу кезінде қолдануға болады. Оңтүстік Қазақстанда орналасқан Шу-Сарысу уран кенді провинциясының қабаттық-инфильтрациялық уран кенорындары мысалында геологиялық барлау торабын орналастырудың дәстүрлі әдістемесін пайдалану кезінде кен денелерінің геометриялануындағы кемшіліктер көрсетілді, сондай-ақ кендерді геометриялаудың әдебиеттерде ұсынылған тәсілдерінің кемшіліктері және ұсынылатын инновациялық тәсілдің басты артықшылықтары түсіндірілді. Өзірленген әдіс гидрогенді кенорындарында тау-кен дайындық жұмыстарын кезекті жоспарлау мен жүзеге асырудың бірқатар маңызды мәселелерін шешеді, кен денелерінің геометриясы мен қорларды есептеу дәлдігінің едәуір артуына ықпал етеді, барланған гидрогенді кенорындарының сенімділігі мен инвестициялық тартымдылығын арттырады. Бұл әдісті, егер сіз оны бұрғылаудың тығыз торабы бар гидрогенді кенорындарындағы барлау ұңғымаларының ішкі контурлық торабын сирегірек жасау үшін кері тапсырма үшін қолдансаңыз, салынатын ұңғымалардың санын азайту арқылы шығындарды үнемдеу үшін де қолдануға болады.

Негізгі сөздер: кендерді геометриялау, геологиялық барлау, кен денелерін анықтау, ұңғымаларды орналастыру, гидрогенді кенорындар, ортогональды геометрияция.

Ортогонально-контурная геометрияция гидрогенных оруденений

А. Мендығалиев^{1*}, Я. Аршамов¹, Е. Язиков²

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Томский политехнический университет, Томск, Россия

*Автор для корреспонденции: adilmslm@mail.ru

Аннотация. Материал статьи представляет собой инновационный подход к геометрии рудных тел при геологоразведочных работах основанных на геофизических и/или керновых исследованиях в скважинах с целью площадного и мощностного оконтуривания гидрогенных минеральных образований. Метод позволяет получать более точные контуры рудных тел при минимальном увеличении количества сооружаемых для этого скважин. Метод может быть использован при планировании и проведении геологоразведочных работ на гидрогенных месторождениях. На примере пластово-инфильтрационных урановых месторождений Шу-Сарысуиской урановорудной провинции, расположенной в Южном Казахстане, продемонстрированы недостатки в геометрии рудных тел при использовании традиционной методики размещения геологоразведочной сети, а также объяснены недостатки литературно предложенных способов геометрии руд и главные преимущества предлагаемого инновационного подхода. Разработанный метод решает ряд значительных проблем последующего планирования и осуществления горно-подготовительных работ на гидрогенных месторождениях, способствует значительному повышению точности геометрии рудных тел и подсчета запасов, повышает достоверность и инвестиционную привлекательность разведанных гидрогенных месторождений. Данный метод также может быть использован для экономии средств путем уменьшения количества сооружаемых скважин, если использовать его для обратной задачи с целью разряжения внутриконтурной сети разведочных скважин на гидрогенных месторождениях с густой сетью бурения.

Ключевые слова: геометрияция руд, геологоразведка, оконтуривание руд, геологоразведочная сеть, гидрогенные месторождения, ортогональная геометрияция.

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i3.06>

Modern monitoring tools – effective way to ensure safety in subsoil use

K.B. Rysbekov¹, Dai Huayang², M.B. Nurpeisova^{1*}, V.H. Lozynskyi³, G.M. Kyrgyzbayeva¹, K. Kassymkanova¹, A.M. Abenov¹

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²China University of Mining and Technology, Beijing, China

³Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: marzhan-nurpeisova@rambler.ru

Abstract. Work aim is to carry out geomonitoring of rock mass state, which provides for comprehensive accounting and analysis of all natural and man-made factors, as well as use of methods and control tools developed by authors. Work uses complex method, including: study of mining and geological conditions, structural features of rocks of deposits and conduct of mine surveying observations in mines based on innovative methods and means of geomonitoring developed by the authors. Research materials of geomechanical processes at the mines of Akzhal, Saryoba Sayak and others are presented during projects implementation of «Development of innovative methods for predicting and assessment of rock mass state to prevent technogenic emergencies» and «Comprehensive monitoring of slow deformation processes of the earth's surface during large-scale development of ore deposits of Central Kazakhstan», and also used in the educational process of Satbayev University.

As a result of research: methodology for comprehensive assessment of rocks state has been developed, which makes it possible to consider features of geological structure of undermined strata and, thereby, improve quality of geomechanical support for mining operations; design of permanent forced centering point (FCP) for installation of high-precision instruments has been developed, which makes it possible to ensure speed and accuracy of centering, as well as to exclude use of tripods; scientifically substantiated possibility of predicting stress-strain state of rock mass in the studied deposits, i.e. it is possible to determine: tensile strength - σ_{co} ; clutch - K ; density - γ and strength of rocks - f according to the scale of M.M. Protodyakonov; composition of hardening solution from mining waste has been developed to increase stability of sections of ledges of quarry, which has high fluidity, adhesion to rocks and sufficient strength.

Keywords: ore deposits, rock fracturing, deformations, geomechanical monitoring, methods, tools, geodetic instruments, massif state assessment, cement mortar.

1. Введение

Одной из актуальных проблем при ведении крупномасштабных горных работ, особенно в массивах скальных пород, является техногенная сейсмичность, влекущая за собой не только катастрофические технико-экономические последствия (техногенные землетрясения, горные удары, оползни и др.), но и приводящая иногда к человеческим жертвам. Все это является прямым следствием изменения геодинамического режима геологической среды под влиянием крупномасштабных горных работ, что убедительно подтверждается результатами научных исследований, проводимых на рудных месторождениях Центрального Казахстана. Рудные месторождения Улытауской области являются мощными субъектами антропогенного воздействия на окружающую среду, представляющими большие возможности для исследования широкого спектра техногенных катастроф и снижения их риска.

Проблема техногенных катастроф остается актуальной в настоящее время во всех странах с развитой горнодобывающей промышленностью, что еще раз подтверждают материалы очередного 6-го Международного симпозиума по горным ударам и шахтной сейсмичности [1-3]. Управлению различными рисками повсеместно

уделяется большое внимание, о чем свидетельствует возросшее число публикации на эту тему [4-7].

Для месторождений твердых полезных ископаемых геомеханическое обеспечение безопасности горных работ, как правило, базируется на инженерных подходах, адаптированных к конкретным горно-геологическим условиям разработки. При подобном подходе не учитываются локальные особенности строения подработанных толщ, изменчивость физико-механических свойств пород и геомеханических характеристик геологической среды. А все это, безусловно, сказывается на достоверности геомеханических оценок реальных горнотехнических ситуаций. Возможности учета перечисленных физико-геологических факторов в геомеханических расчетах появляются за счет ведения и учета результатов геодезических наблюдений.

В последнее время при мониторинге техногенных процессов находят более широкое применение данные спутниковой радарной интерферометрии космического зондирования Земли. Основное преимущество данного метода состоит в возможности охвата значительных площадей. По инструкции наземные наблюдения проводятся два раз в год с интервалом 6 месяцев. За это время может развиваться обрушение, и его невозможно предска-

зять. Поэтому для решения целого ряда горнотехнических задач методы расчетов должны быть скорректированы для конкретных условий, и при этом следует учесть влияние природных и горнотехнических факторов, а также изменчивость значений прочностных свойств пород в пространстве и во времени и др. Несмотря на большое число исследовательских работ [6,7], вопрос прогнозирования и управления риском техногенных катастроф в виду сложности и большого разнообразия горно-геологических особенностей месторождения все еще полностью не решен.

Целью настоящей работы является осуществление геомониторинга состояния массива горных пород, предусматривающего комплексный учет и анализ всех природных и техногенных факторов, а также использование разработанных авторами методов и средств контроля.

2. Материалы и методы

Анализ состояния методики проведения маркшейдерских наблюдений и интерпретация полученных данных, прежде всего, связаны с отсутствием эффективных способов определения величин оседания земной поверхности (ОЗП), что обуславливает необходимость совершенствования методики маркшейдерско-геодезических наблюдений за деформациями горных пород с использованием современных электронных приборов для повышения достоверности, оперативности при определении параметров ОЗП для безопасного освоения недр и принятия мер охраны разрабатываемых объектов [8,9].

Кафедрой «Маркшейдерское дело и геодезия» Satbayev University уделяется повышенное внимание промышленной безопасности на рудниках. Это обусловлено тем, что большинство негативных явлений, приводящих к различного рода инцидентам при ведении горных работ, связаны с вопросами управления горным давлением. При этом основная роль отводится внедрению в практику современных технологий и средств контроля и мониторинга массива горных пород. Свидетельством этому является проводимые нами исследования по проектам «Разработка инновационных методов прогнозирования и оценки состояния массива горных пород для предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера» и «Комплексный мониторинг медленных деформационных процессов земной поверхности при крупномасштабном освоении рудных месторождений Центрального Казахстана» [10].

В целом геодезические наблюдения с использованием приборов нового поколения дают возможность выявить деформации массива, что существенно повышает оценку геодинамической ситуации в районе разработки месторождения. Но они не позволяют получить полную картину деформационных процессов во времени. Это возможно осуществить только с использованием комплексной методики изучения природно-технической системы, основанной на проведении геомеханического мониторинга, которая является оригинальным продуктом группы исследователей КазНУ и представляет собой эффективный инструмент, позволяющий обеспечить максимальную безопасность ведения горных работ на основе комплексности используемого подхода, который в общем виде может быть представлен следующим образом:

- на основе анализа геологии и тектоники района, экспериментальных оценок напряженного состояния и инструментальных наблюдений в массиве выделяются «энергонасыщенные» зоны, которые определяют границы зоны геодинамического мониторинга;

- далее организуется мониторинг опасной зоны, который включает в себя в основном контроль деформации и уровня структурной нарушенности массива [11];

- по результатам космических радарных наблюдений устанавливается ряд локальных очагов оседаний земной поверхности над участками подземной добычи. В настоящее время на этих участках местности ведутся наземные наблюдения;

- в дальнейшем вся информация о закономерности процесса сдвижения системы и параметры её критического состояния поступает в экспертную систему, где на основе интегрирования баз данных и комплексного анализа делается оценка состояния ПТС и обосновываются соответствующие решения по охране недр и земной поверхности [12].

В практике мониторинга деформированного состояния земной поверхности при разработке месторождения и подработке сооружений используются различные типы рабочих нивелирных реперов и опорных пунктов. Многолетние инструментальные наблюдения показали трудоемкость полевых работ, особенно перенос с одного пункта в другой комплекта приборов (сам прибор, штатив, рейки и др.). В этой связи, для установки приборов и увеличения скорости измерительных операций, в первую очередь, нами разработан постоянный пункт принудительного центрирования (ППЦ), устанавливаемый в опорном пункте при ведении геомеханического мониторинга (рисунок 1). Устройство относится к геодезическим центрам для установки новых приборов и сигналов. Цель изобретения – повысить точность центрирования, оперативность измерения при отсутствии штативов в пунктах стояния и наблюдения. Новое устройство позволяет обеспечить быстроту и точность центрирования, а также исключает применение штативов [13]. Преимущества: простота и высокая точность установки геодезического оборудования и ориентирования (без штатива). Пункт виден издалека и хорошо заметен для мониторинга больших площадей.



Рисунок 1. Спутниковые измерения GPS-приемниками, установленными ППЦ

При производстве полевых работ применялось три GPS-приемника швейцарской фирмы Leica GS16 – 2 приемника и один приемник GPS1200. Измерения производились в 3 сеанса спутниковых наблюдений. Продолжительность каждого сеанса не менее 5 часов, при этом за начало отсчета сеанса наблюдений бралось время включения последнего GPS-приемника. После завершения полевых работ по спутниковым измерениям полу-

ченные сырые данные, в камеральных условиях конвертировали в универсальный обменный формат Rinex. Камеральная пост-обработка сырых данных выполнялась в программном обеспечении Giodis фирмы Javad GNSS.

На месторождениях геодезические наблюдения ведутся два раза в год (весной и осенью) и проводятся также дополнительные сейсмологические измерения.

По каждой профильной линии составлены ведомости вертикальных и горизонтальных смещений реперов (рисунок 2, а), а также графики оседаний реперов (рисунок 2, б). На рисунке 2 (б) приведен график оседаний реперов по профильной линии I месторождения Акжал за 2019-2021 гг. [14].

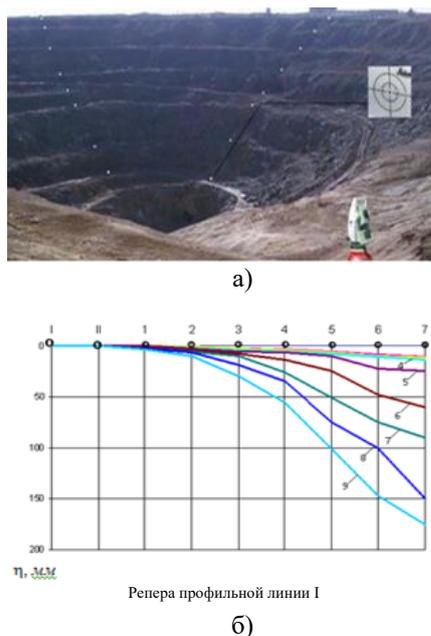
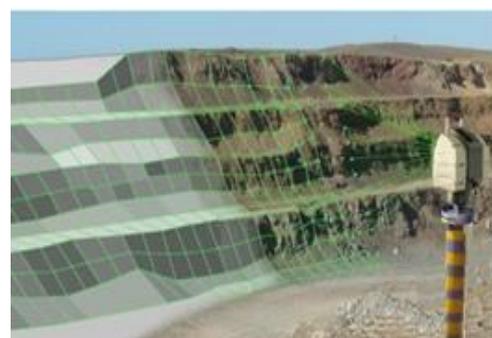


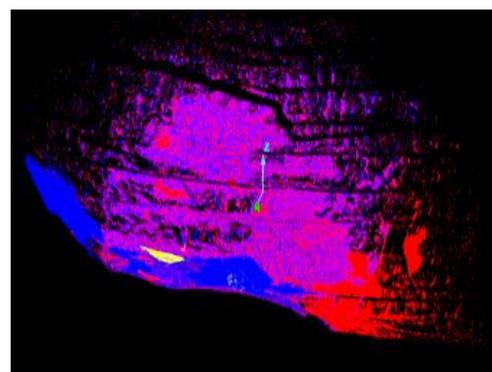
Рисунок 2: а) репера с марками на профильных линиях и б) график оседаний реперов по профильной линии I: наблюдения: 4-е осень 2019 г.; 5-е весна 2019 г.; 6-осень 2020 г.; 7-весна 2020 г.; 8- осень 2021 г. и 9 – осень 2021 г.

Значительным фактором в эффективном решении проблем современного карьера является изучение систем трещин и размеров структурных блоков. На сегодняшний день методы измерения трещиноватости горных пород сводятся, в основном, к непосредственным измерениям в обнажениях на поверхности, на откосах в карьерах, по стенкам шурфов и горных выработках, наблюдениям по кернам геологических скважин. На открытых разработках трещиноватость горных пород изучалась с помощью горного компаса, т.е. углы падения трещин и азимуты их простирания измерялись горным компасом.

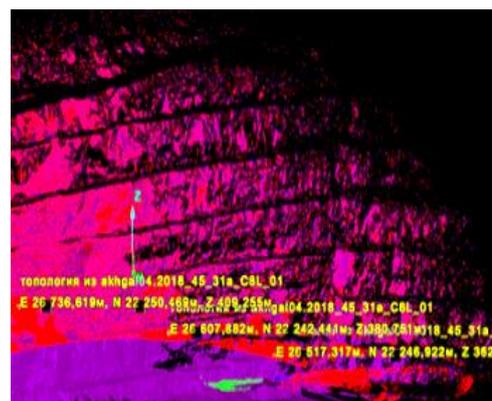
Использование результатов съемки лазерным сканером для получения элементов залегания трещин и размеров структурных блоков возможно при нахождении прибора от прибортового массива на расстоянии до 800 метров. При этом появляется уникальная возможность получения информации о положении прибортового массива без непосредственного контакта исполнителя [15,19]. При обработке результатов лазерного сканирования был использован программный комплекс «MarteKI-SiteStudio», где вычисляются значения элементов залегания трещин: азимута простирания, углов падения и размеров породных блоков (рисунок 3).



а)



б)



в)

Рисунок 3. Изучение трещиноватости горных пород: а) съемка структуры массива борта карьера лазерным сканером, установленного на ППЦ; б) цифровая модель борта; в-элементы залегания трещин на экране компьютера

3. Результаты исследований

Основной исходной информацией являются геологическая изученность месторождения, знание величин показателей физико-механических и прочностных свойств горных пород, а также элементов залегания структурно-тектонических особенностей горного массива и трещин горных пород, что позволяет определить напряженное состояние массива в процессе отработки. Отбор проб горных пород, в том числе и полезного ископаемого, производился с целью лабораторного определения показателей физико-механических свойств, существенно влияющих на процесс сдвижения. На практике, в основном, используется лабораторный способ исследований физико-механических свойств горных пород на

образцах, изготовленных из кернов геолого-разведочных скважин, а при наличии горных выработок (канавы, шурфы, стволы, квершлаги и т.д.) пробы отбирают из пород в виде монолитов. Для транспортировки проб в лабораторию их заворачивали в бумагу и помещали в мешочки.

Испытания физико-механических свойств горных пород проводились в лаборатории Satbayev University. Анализ результатов изучения ФМС пород позволил установить графо-аналитические зависимости прочностных свойств пород массива с глубиной их залегания и оперативно вносить изменения в погоризонтные расчеты устойчивости горных выработок (рисунок 4).

Кривые изменения свойств пород проведены по усредненным показателям по глубине через 50 м. Анализ данных также показывает, что прочностные свойства пород с глубиной их залегания заметно меняются.

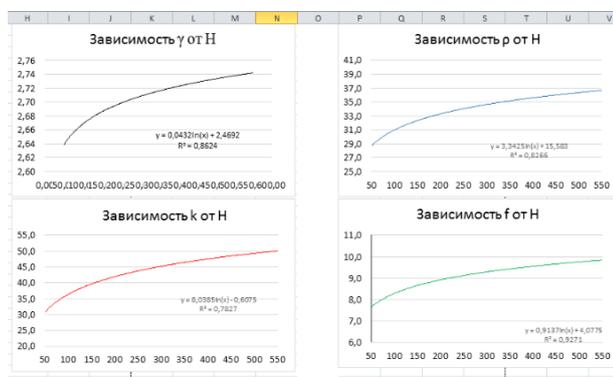


Рисунок 4. Зависимость прочностных свойств массивных известняков с глубиной их залегания

Такие же зависимости получены для месторождения Акжал; Сарыоба, Саяк и др. Для отыскания общих закономерностей изменчивости прочностных и структурных свойств пород, обобщены также данные ряда месторождений и установлены графоаналитические зависимости между средней плотностью, сцеплением, крепостью пород и глубиной их залегания (рисунок 5).

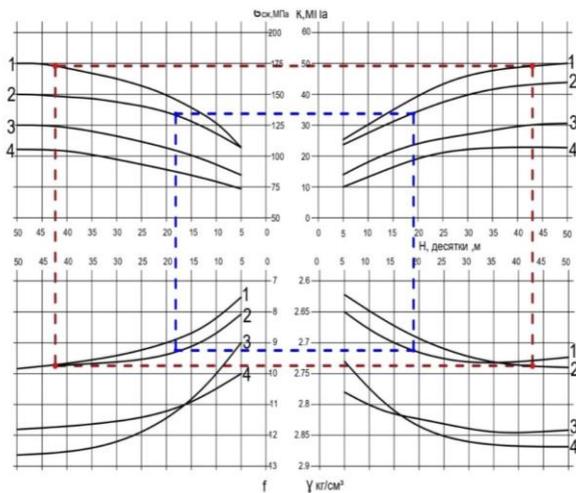


Рисунок 5. Взаимосвязи между свойствами пород и с глубиной их залегания: 1 – месторождение Сарыоба; 2- Акжалское месторождение; 3 -Саякское месторождение; 4 - Акбакайское месторождение

Оценка и надежность определения зависимостей произведены по формулам математической статистики:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{1}$$

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100, \% \tag{2}$$

$$m_v = \frac{V \cdot \sqrt{0,5 + \left(\frac{V}{100}\right)}}{\sqrt{n}} \tag{3}$$

где σ - стандарт; x_i - значение признака; \bar{x} - среднее арифметическое значение признака; n - число наблюдений; V - коэффициента вариации; m_v - надежность вычисления коэффициента вариации.

Если соблюдается условие $3 m_v < V$, то результаты можно считать надежными и число исходных данных для определения статистических средних достаточно.

Полученные графоаналитические зависимости позволяют дать качественную и количественную оценку изменения свойств горных пород. Между показателями существует устойчивая связь. При известных одних показателях представляется возможным, используя графики, определить другие, тем самым открываются пути прогнозирования свойств горных пород по месторождениям. Исходными данными для этого являются наименования пород, глубина их залегания и отдельные характеристики, как например, плотность пород и другие, для определения которых не требуется трудоемких лабораторных исследований [16,19].

На основе проведенных исследований получены количественные и качественные характеристик свойств пород ряда месторождений, в том числе месторождения Восточная Сарыоба. Эти характеристики будут использованы при решении ряда технических задач на карьерах и подземных рудниках: при оценке устойчивости уступов и бортов карьеров: расчетных целиков и предельных потолочин, для обобщения результатов инструментальных наблюдений и уяснения физической стороны процесса сдвижения.

Таким образом, методы математической статистики и корреляционного анализа дали возможность обобщить данные физико-механических свойств пород месторождения Восточная Сарыоба, Акжал, Саяк и др.

Прочность и устойчивость междукамерных опорных целиков, а также устойчивость прибортовых массивов определяются степенью их трещиноватости. Технология упрочнения трещиноватого массива должна обеспечить полное заполнение трещин в массиве различной композицией и надежно скрепить отдельные структурные блоки в единое целое [17]. Так, разработаны эффективные способы управления устойчивостью откосов, связанные с упрочнением массива горных пород и пылящих поверхностей. Создан раствор для укрепления трещиноватых горных пород, обладающий низкой стоимостью, достаточной текучестью для заполнения мелких трещин и адгезией к горным породам, высокой прочностью.

Раствор содержит цемент, наполнитель и воду. В качестве наполнителя использованы хвосты обогащенных фабрик горно-металлургических комплексов. Па-

раллельно был исследован и получен новый состав для укрепления арматуры опорных пунктов наблюдательной станции в скважинах, позволяющий также использовать отходы горного производства и повысить прочность и морозостойкость полученного материала.

Техническая новизна созданных растворов подтверждены патентами РК на изобретение [18].

4. Выводы

1. Разработана методика комплексной оценки состояния горных пород, позволяющая учесть особенности геологического строения подработанных толщ и, тем самым, повысить качество геомеханического обеспечения горных работ. В свою очередь, результаты геомеханических прогнозов дают возможность определить наиболее опасные участки, где требуется проведение режимных геофизических и геодезическо-маркшейдерских наблюдений с целью локализации зон техногенной нарушенности.

2. Разработана конструкция постоянного пункта принудительного центрирования (ППЦ) для установки высокоточных приборов, позволяющий повысить производительность и точность наблюдений.

3. Получены графоаналитические зависимости между физико-механических свойств (ФМС) пород горных пород и глубиной их залегания. Научно обоснована возможность прогнозирования напряженно-деформационного состояния массива горных пород на исследуемых месторождениях, т.е. можно определить: предел прочности - $\sigma_{сж}$; сцепление - K ; плотность - γ и крепость пород - f по шкале М.М. Протодьяконова.

4. С целью обеспечения промышленной безопасности, разработан состав для упрочнения трещиноватых горных массивов на карьере, а также нарушенных междукамерных целиков и потолочин в подземных выработках. В результате его применения будут утилизированы отходы горного производства (хвосты обогатительных фабрик), используемые для приготовления упрочняющей смеси.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК (Грант №AP08857097).

Литература / References

[1] Potvin, Y., Hudyma, M. (2005). Rockburst and seismicity in mines proceedings (6th edition). *Australia: Australian Centre for Geomechanics*

[2] John, V. Simmons. (2012). Geotechnical risk management in open pit coal mines. *Australian Center for Geomechanics Newsletter*, (22), 1-4

[3] Melnikov, N.N. (2010). Environmental problems in the XXI century and the development of subsoil. In the book "Development of the subsoil and environmental problems of the XXI century". *M.: IPKON RAN*, 26-45

[4] Trubetskoy, K.N. (2020). State and main directions of integrated development and conservation of resources of the earth's interior. Problems and prospects for integrated development and conservation of the earth's interior. *M.: IPKON RAS*, 5-11

[5] Mikhailova, N.N., Uzbekov, A.N. (2018). Tectonic and technogenic earthquakes in Central Kazakhstan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Engineering Sciences*, (3), 137-145

[6] Kozyrev, A.A., Panin, V.I. & Semenova, I.E. (2018). On the geodynamic safety of mining operations in shock-hazardous conditions on the example of the Khibiny apatite deposits. *FTPRPI*, (5), 33-44

[7] Mansurov, V.A., Satov, M.Zh. & Kantemirov, Yu.I. (2012). Space radar monitoring of displacements of the earth's surface and structures at the Zhezkazgan copper deposit (Republic of Kazakhstan). *Geomatics*, (1), 77-84

[8] Oparin, V.N. et al. (2016). Methods and systems of seismo-deformation monitoring of technogenic earthquakes and rock bursts (V.2). *Novosibirsk: Publishing house SO RAN*

[9] Nurpeisova, M.B., Bitimbayev, M.Zh., Rysbekov, K.B. & Bekbasarov, Sh. Sh. (2021). Forecast changes in the geodynamic regime of geological environment during large-scale subsoil development. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 5-10.

[10] Nurpeisova, M.B., Kyrgyzbaeva, G.M. & Bek, A.A. (2017). Geomechanical monitoring of technogenic systems (Monograph). *Lambert Academic Publishing*

[11] Kuldeev, E.I., Rysbekov, K.B., Donenbayeva, N.S. & Mietenko, N.A. (2021). Modern methods of geotechnic – effective way of providing industrial safety in mine. *Eurasian mining*, (2), 61–66. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.18>

[12] Aitkazinova, S., Soltabaeva, S., Kyrgyzbaeva, G., Rysbekov, K. & Nurpeisova, M. (2016). Methodology of assessment and prediction of critical condition of natural-technical systems. *Surveying Geology and Mining Ecology Management*, (2), 3-10. <https://doi.org/10.5593/sgem2016/b22/s09.001>

[13] Nurpeisova, M., Rysbekov, K., Aitkazinova, Sh., Donenbayeva, N., Nukarbekova, Zh. & Derbisov K. (2021). Ground permanent geodetic point of forced centering of devices. *Patent of the Republic of Kazakhstan § 2021/0160*

[14] Nurpeisova, M.B., Kyrgyzbaeva, G.M. & Bek, A.A. (2017). Geomechanical monitoring of technogenic systems (Monograph). *Lambert Academic Publishing*

[15] Nurpeisova, M., Kirgizbaeva, D. & Kopzhasaruly, K. (2016). Innovative ways to capture of solid violations and processing of result. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 5-18

[16] Kyrgyzbaeva, G.M., Nurpeisova, M.B. (2021). Method for predicting physical-mechanical properties of massif rocks. *Certificate of entry into state register of rights to objects protected by copyright §19300*

[17] Rysbekov, K.B., Nurpeisova, M.B. & Bek, A.A. (2021). Use of enrichment waste for obtaining building materials. 4th International Scientific and Technical Internet Conference "Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources". *Petroșani, Romania: Universitas Publishing*

[18] Nurpeisova, M.B., Kyrgyzbaeva, G.M. & Bek, A.A. Composition for strengthening fractured rocks. *Utility Model Patent of the Republic of Kazakhstan §1573*

[19] Bazaluk, O., Rysbekov, K., Nurpeisova, M., Lozynskyi, V., Kyrgyzbayeva, G. & Turumbetov, T. (2022). Integrated monitoring for the rock mass state during large-scale subsoil development. *Frontiers in Environmental Science*, (10), 852591. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.852591>

Мониторингтің заманауи құралдары - жер қойнауын пайдалануда қауіпсіздікті қамтамасыз етудің тиімді бағыты

К.Б. Рысбеков¹, Dai Huayang², М.Б. Нурпеисова^{1*}, В.Г. Лозинский³, Г.М. Кыргызбаева¹, Х-К.М. Касымханова¹, А.М.Абенов¹

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Қытай тау-кен технологиялық университеті, Бейжің, Қытай

³Днепропетровск ұлттық университеті, Днепр, Украина

*Корреспонденция үшін автор: marzhan-nurpeisova@rambler.ru

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты барлық табиғи және техногендік факторларды кешенді есепке алу мен талдауды, сондай-ақ авторлар әзірлеген бақылау әдістері мен құралдарын пайдалануды көздейтін тау жыныстары массиві жай-күйінің геомониторингін жүзеге асыру болып табылады. Жұмыста кен орындарының тау-кен геологиялық жағдайлары мен тау жыныстарының құрылымдық ерекшеліктерін зерттеуді және авторлар әзірлеген инновациялық тәсілдер мен геомониторинг құралдарының негізінде кеніштерде маркшейдерлік бақылаулар жүргізуді қамтитын кешенді әдіс қолданылды.

«Техногендік сипаттағы төтенше жағдайлардың алдын алу үшін тау жыныстары массивінің жай-күйін болжаудың және бағалаудың инновациялық әдістерін әзірлеу» және «Орталық Қазақстан кен орындарын кең ауқымды игеру кезінде жер бетінің баяу деформациялық процестерінің кешенді мониторингтеу» жобаларын орындау кезінде Ақжал, Сарыоба Саяқ және т. б. кеніштеріндегі геомеханикалық процестерді зерттеу материалдары ұсынылған. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде: игеріліп жатқан кен орындарының кен-геологиялық, құрылымдық ерекшеліктерін ескеруге және сол арқылы тау-кен жұмыстарын геомеханикалық қамтамасыз етудің сапасын арттыруға мүмкіндік беретін тау жыныстарының жағдайын кешенді бағалау әдістемесі әзірленді; центрлеудің жылдамдығы мен өлшеу дәлдігін қамтамасыз етуге, сондай-ақ штативсіз жұмыс атқаруға мүмкіндік беретін, дәлдігі жоғары аспаптарды орнату үшін мәжбүрлеп центрлеудің тұрақты пунктіннің (МЦП) конструкциясы әзірленді; зерттелетін кен орындарындағы тау жыныстары массивінің кернеулі-деформациялық күйін болжау, яғни: тау жыныстарының беріктік шегі $\sigma_{сжс}$; ілінісу - K ; тығыздығы - γ және М.М. Протодьяконов шкаласы беріктігі - f болжау мүмкіндігі ғылыми негізделді; карьер кемерлерінің орнықтылығын арттаруды қамтамыз ететін, тау-кен өндірісінің қалықтарынан жасалған аққыштығы жоғары, тау жыныстарына адгезиялық қарсылығы және жеткілікті беріктігі бар ерітіндінің құрамы әзірленді.

Негізгі сөздер: кен орындары, жыныстардың жарықшақтылығы, деформациялар, геомеханикалық мониторинг, әдістер, құралдар, геодезиялық аспаптар, массивтің жай-күйін бағалау, цемент ерітіндісі.

Современные средства мониторинга - эффективное направление обеспечения безопасности в недропользовании

К.Б. Рысбеков¹, Dai Huayang², М.Б. Нурпеисова^{1*}, В.Г. Лозинский³, Г.М. Кыргызбаева¹, Х-К.М. Касымханова¹, А.М.Абенов¹

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Китайский горно-технологический университет, Пекин, Китай

³Национальный технический университет, Днепр, Украина

*Автор для корреспонденции: marzhan-nurpeisova@rambler.ru

Аннотация. Целью работы является осуществление геомониторинга состояния массива горных пород, предусматривающего комплексный учет и анализ всех природных и техногенных факторов, а также использования разработанных авторами методов и средств контроля. В работе использован комплексный метод, включающий: изучение горно-геологических условий, структурных особенностей горных пород месторождений и проведение маркшейдерских наблюдений на рудниках на основе разработанных авторами инновационных способов и средств геомониторинга. Представлены материалы исследований геомеханических процессов на рудниках Ақжал, Сарыоба Саяқ и др. при выполнении проектов «Разработка инновационных методов прогнозирования и оценки состояния массива горных пород для предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера» и «Комплексный мониторинг медленных деформационных процессов земной поверхности при крупномасштабном освоении рудных месторождений Центрального Казахстана», а также использованы в учебном процессе Satbayev University.

В результате проведенных исследований: разработана методика комплексной оценки состояния горных пород, позволяющая учесть особенности геологического строения подработанных толщ и, тем самым, повысить качество геомеханического обеспечения горных работ; разработана конструкция постоянного пункта принудительного центри-

рования (ППЦ) для установки высокоточных приборов, позволяющий позволяющий обеспечить быстроту и точность центрирования, а также исключить применения штативов; научно обоснована возможность прогнозирования напряженно-деформационного состояния массива горных пород на исследуемых месторождениях, т.е. можно определить: предел прочности - $\sigma_{сж}$; сцепление - K ; плотность - γ и крепость пород - f по шкале М.М. Протодьяконова; разработан состав укрепляющего раствора из отходов горного производства для повышения устойчивости участков уступов карьера, обладающего высокой текучестью, адгезией к горным породам и достаточной прочностью.

Ключевые слова: *рудные месторождения, трещиноватость пород, деформации, геомеханический мониторинг, методы, средства, геодезические приборы, оценка состояния массива, цементный раствор.*

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i3.07>

Modeling of PVT properties within the Taisogan block on the example of the Uaz, Uaz East, Uaz North fields

G. Kokymbayeva*, E. Ermekov, R. Dosniyazov

«KMG Engineering» LLP, Atyrau, Kazakhstan

*Corresponding author: kokymbayeva.g@llpcmg.kz

Abstract. The availability of reliable data on the PVT properties of reservoir fluids plays a leading role in calculating the reserves of oil and gas reservoirs, estimating the oil recovery factor, well testing, numerical reservoir modeling and for making informed decisions in field development design. In practice, the results of field, laboratory and theoretical studies are used simultaneously to substantiate the properties of natural hydrocarbon mixtures. At each of the noted stages, specialists strive to increase the reliability of the data obtained and develop methods for their interpretation. Determining the properties of reservoir fluids of an oil field is a prerequisite for the effective use of various methods of influencing the bottomhole zone of wells, selection of equipment for well operation. The properties of reservoir fluids are determined by various thermobaric conditions and change depending on the current state of the reservoir and the characteristics of reservoir pressure changes. All known methods for determining the properties of formation fluids are divided into two groups: experimental and computational. Each of the groups has both advantages and certain disadvantages.

Keywords: field, experiment, PVT model.

1. Введение

Проблемам анализа и моделирования PVT-свойств пластовых флюидов нефти и газа посвящено множество научных работ как российских, так и зарубежных ученых. Современные методы PVT-моделирования базируются на использовании расчётных методов, основывающиеся на различных полуэмпирических или эмпирических соотношениях. Несмотря на некоторое количество известных расчётных методов, не все они получили одинаковое распространение в практике разработки нефтяных месторождений. В случае, когда надежные экспериментальные данные по PVT свойствам нефтей недоступны или вообще отсутствуют, для расчетов могут использоваться два подхода. Первый подход связан с использованием известных уравнений состояния, он требует точной информации о компонентах пластовых флюидов [1]. Второй подход связан с применением известных корреляционных взаимосвязей между свойствами флюидов. Большинство таких корреляций для нефтей представляется в виде линейных или нелинейных уравнений регрессии [2].

В данной работе рассмотрен опыт реализации и практического применения программного модуля для моделирования PVT свойств флюидов с помощью композиционной модели на примере месторождений месторождений Уаз, Уаз Восточный, Уаз Северный.

Исходной информацией для построения термодинамических моделей пластовых углеводородных смесей являются результаты исследования пластовых и поверхностных проб, а также промысловые данные. Главным критерием достоверности полученных данных по пробам является представительность отобранных образцов. Со-

ответственно образцы пластового флюида, отбор которых проведен согласно регламенту отбора представительных проб, дают возможность использования этих данных для создания флюидальной модели месторождения [3].

Первоначальные сведения о характере строения структуры Уаз получены в результате маршрутной гравиметрической съемки, проведенной в 1932 году. К глубокому бурению структура была подготовлена в 1997 году сейсмической съемкой МОГТ. Поисково-разведочное бурение проводилось в 1999-2000 гг. На Западном поле расположено основное месторождение Уаз, где начиная с 2006 г. в разработке находятся среднеюрские нефтяные залежи, а также установлена нефтеносность неокомских отложений.

На Восточном поле (месторождение Уаз Восточный) продуктивность установлена в 2012-2013 гг. в нижнемеловых, среднеюрских и триасовых отложениях. В разработке находятся: с 2014 г. - II неокомский горизонт, с 2015 г. - Ю-III горизонт. Следует отметить, что на Уазе Восточном выполненными сейсморазведочными работами 2011-2013 гг. выявлены структурно-седиментационные ловушки в отложениях верхнего и среднего триаса.

В сентябре 2017 г. и январе 2018 г. согласно Проекта оценочных работ на Северо-Восточном крыле площади Уаз пробурены 2 оценочные скважины (У-23, У-26) со вскрытием триасовых отложений. Обнаружение промышленных залежей нефти структурно-седиментационного типа в отложениях триаса послужило основанием для составления оперативного подсчета запасов нефти месторождения Уаз Северный.

задачу обоснования свойств пластового флюида. Как показывает практика, такие изменения свойств, и в первую очередь газосодержания, связаны с разгазированием проб в процессе пробоотбора. Этому способствуют два наиболее популярных фактора – насыщенное состояние пластового флюида и наличие в залежи тяжелой нефти. В первом случае любая депрессия на пласт, чтобы извлечь флюид в скважину и отобрать пробу пластовой нефти приведёт к разгазированию флюида. Во втором случае, затруднительно или даже невозможно использовать небольшие депрессии для обеспечения отбора однофазной нефти ввиду недостаточных усилий для извлечения вязкой нефти. Кроме того, в последнем случае, даже использование больших депрессий на кратковременной основе, приводит к отсутствию возможности провести очистку призабойной зоны скважины и отобрать качественную пробу за короткое время, которое отводится на отбор проб [4].

Ввиду вышесказанного, при наличии значительного диапазона вариации газосодержания по пробам, используется метод поиска и обоснования максимально насыщенной пробы. При наличии газовых шапок, такой метод является единственно верным. При наличии недонасыщенной нефти, данный метод более трудоёмок и требуется дополнительные критерии обоснования. Тем не менее он более достоверен, чем метод усреднения.

По результатам анализа и выявленной корреляции свойств, для расчетов использовались пробы со значением газосодержания на уровне $8.9-9.1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (таблица 1).

2.1.5. Анализ и обоснование свойств пластового флюида II объекта, включающего горизонты Ю-V, Ю-VI

Объединение продуктивных горизонтов Ю-V-VI в эксплуатационный объект II осуществлялся на основе сходства их геолого-физических характеристик, позволяющих вести совместную разработку и учёт добычи продукции, а также на основе технико-экономических показателей рентабельности их разработки.

Пластовая нефть II объекта охарактеризована 9 глубинными пробами, из них по горизонту Ю-V – 8 глубинных; по горизонту Ю-VI – 1 глубинная проба.

Выявлена единая корреляция свойств пластовой нефти по юрским отложениям (рисунки 1-3).

На рисунке 1 представлен график зависимости давления насыщения от газосодержания, где мы видим единую корреляцию и для I объекта, включающего в себя горизонты Ю-III-IV и для второго объекта горизонты Ю-IV-V, т.е. для всех пластов начиная с Ю-II по Ю-VI мы можем принять единую модель. По этому графику мы видим устойчивую корреляцию свойств, она достаточно хорошо прослеживается, и мы построили уравнение, которое описывает все эти свойства.

Несмотря на единую корреляцию свойств по I и II объекту, газосодержание начальной пластовой нефти согласно пробам и принимаемым значениям по этим объектам разное. Для объекта II газосодержание варьируется на уровне $10.9-11.7 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

На рисунке 2 представлена зависимость объёмного коэффициента от газосодержания пластовой нефти юрских отложений. Коэффициент корреляции этих свойств на графике не очень высок, хотя свойства дегазированной нефти, а также коэффициент растворимости газа в нефти (рисунок 1) едины по юрским пластам. Следова-

тельно, хаотичность замеров объёмного коэффициента на рисунке 2 связана с низким качеством лабораторных исследований.

Используя результаты лабораторных хроматографических анализов нефти и газа и полученные на их основе составы пластовой нефти, можно сделать достоверную оценку изменения объёмного коэффициента от газосодержания, используя уравнение фазового состояния. Расчёт свойств по уравнению состояния даёт как правило погрешность, связанную с невозможностью на современном уровне знаний идеально воспроизвести уравнением свойства пластового флюида на базе его состава. Современные уравнения дают отклонение расчёта от эксперимента в довольно узких пределах.

Для устранения этих отклонений параметры уравнения состояния требуют корректировки, для обеспечения полной сходимости расчёта и эксперимента. Согласно составам пластовой нефти юрских отложений, используя уравнение состояния была построена модель флюида юрских отложений. Выполнена корректировка параметров уравнения для сходимости расчётных данных с экспериментом (давление насыщения, газосодержание, плотность сепарированной нефти). Согласно проведённому моделированию по составу пластовой нефти юрских отложений стало очевидным, что значения объёмного коэффициента более 1.040 являются некачественными во всём диапазоне пластовых газосодержаний. Кроме того, рассчитана зависимость объёмного коэффициента от газосодержания, которая подтвердила результаты замеров объёмного коэффициента по 12-ти пробам. Данная зависимость напрямую связана с составом пластовой нефти и другими свойствами пластовой нефти юрских отложений [5].

Опираясь на выводы о корреляционной связи свойств пластовой нефти, сделанные по пластам юрского возраста, можно провести анализ результатов исследований пластового флюида мелового возраста. Пластовая нефть пласта II-не немного тяжелее (плотность дегазированной нефти $922 \text{ кг}/\text{м}^3$), чем нефть юрских отложений ($897 \text{ кг}/\text{м}^3$). Газосодержание II-не нефти находится на уровне $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а давление насыщения - 1.38 Мпа , данное соотношение близко линии растворимости на рисунке 1 для юрских отложений, в пределах погрешностей определения.

Следовательно, объёмный коэффициент пластовой нефти горизонта II-не также будет сопоставим со значениями объёмного коэффициента юрских отложений. Однако объёмный коэффициент для пластовой нефти мелового возраста определённый в лаборатории (1.058) резко отличается от соответствующего значения по линии на рисунке 2 (1.031), что указывает на проблемы в экспериментальной оценке этого параметра, так как значение должно быть скорее ниже кривой, чем выше, для более тяжелой нефти. Состав пластовой нефти мелового возраста также не подтверждает высокие значения объёмного коэффициента, согласно расчётам по уравнению состояния.

Ошибки в лаборатории при оценке объёмного коэффициента встречаются очень часто для тяжелой и вязкой нефти, коими являются нефти рассматриваемого месторождения. Это связано с низкой скоростью выделения газа из нефти у данного типа флюида.

На рисунке 3 представлен график зависимости плотности пластовой нефти от газосодержания, необходимо отметить, что на данном графике прослеживается та же неопределённость, что и на рисунке 2. Это говорит о том, что замеры объемного коэффициента были сделаны не верно. Об этом свидетельствует формула материального баланса, по которой рассчитывается плотность пластовой нефти, так как прямого замера плотности пластовой нефти в лабораторных условиях нет. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по II объекту горизонты Ю–V–VI представлены в таблице 1.

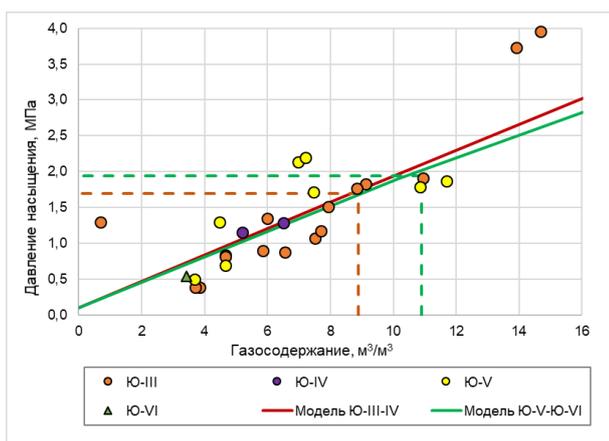


Рисунок 1. Зависимость давления насыщения от газосодержания

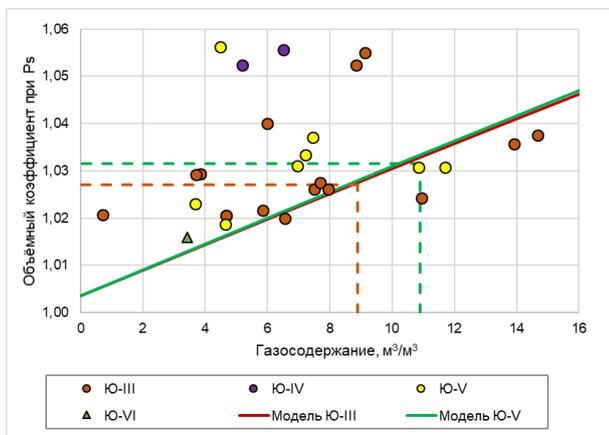


Рисунок 2. Зависимость объемного коэффициента от газосодержания

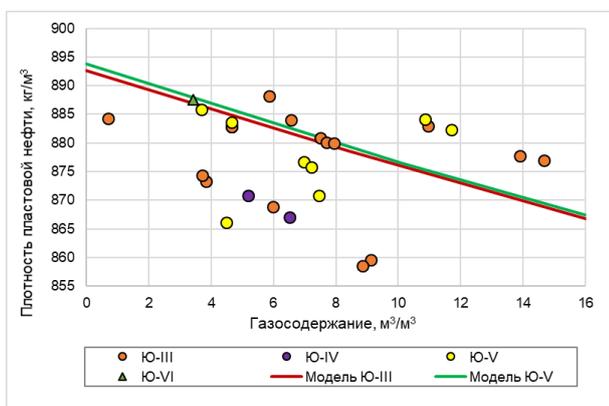


Рисунок 3. Зависимость плотности пластовой нефти от газосодержания

2.1.6. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонта Т

В 2019 г. по результатам бурения оценочной скважины была выявлена продуктивность в отложениях триаса.

По горизонту Т отобраны 5 проб пластоиспытателем с определенных глубин: 800 м, 857.2 м, 861.8 м (д.о.11-12.01.2020 г. и 01.02.2020 г.). По результатам анализа и выявленной корреляции свойств, для расчетов использовались пробы со значением газосодержания на уровне $48.0 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

В целом по горизонту наблюдается хорошая сходимость расчетов по модели и экспериментальных данных. Отклонения находятся в пределах погрешностей. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т в таблице 1.

Таблица 1. Результаты настройки PVT модели месторождения Уз

Горизонт	П-не	I объект Ю-III-IV	II объект Ю-V-VI	Т	
Параметры	Ед.изм	Расчеты по модели			
Пластовое давление	МПа	3	5	5,1	9.1
Пластовая температура	°С	20	25	25	33
Давление насыщения	МПа	1.5	1.6	1.9	8.4
Газосодержание	$\text{м}^3/\text{м}^3$	9.1	8.6	10.1	46.8
	$\text{м}^3/\text{т}$	9.9	9.6	11.3	56.7
Объемный коэффициент		1.023	1.02	1.024	1.111
Плотность пластовой нефти	$\text{г}/\text{см}^3$	0.908	0.884	0.883	0.781
Плотность сепарированной нефти	$\text{г}/\text{см}^3$	0.923	0.896	0.897	0.828
Вязкость пластовой нефти	$\text{мПа}\cdot\text{с}$	284	68.6	83.7	2.24

2.2. Обоснование свойств пластовой нефти месторождения Уз Северный

2.2.1. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонта Т-пласт 0

Горизонт Т-пласт 0 охарактеризован одной глубинной пробой. Плотность и вязкость пластовой нефти составляют $744 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $1.2 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ соответственно, давление насыщения нефти газом при термобарических условиях исследования пласта $T_{пл} = 35.3^\circ\text{C}$ и $R_{пл} = 10.07 \text{ МПа}$ находится на уровне - 5.45 МПа . Газосодержание составляет $66.96 \text{ м}^3/\text{т}$. Объемный коэффициент равен 1.156. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т-пласт 0 приведены в таблице 2.

2.2.2. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонта Т-пласт 1

Горизонт Т-пласт-1 исследован и охарактеризован тремя глубинными пробами.

Плотность и вязкость пластовой нефти составляют $717.7 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $0.92 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, соответственно. Давление насыщения нефти газом при термобарических условиях исследования пласта $T_{пл} = 34.7^\circ\text{C}$ и $R_{пл} = 9.5 \text{ МПа}$ находится на уровне - 7.7 МПа . Газосодержание составляет

104.5 м³/т. Объемный коэффициент равен 1.243, пересчетный коэффициент - 0.805. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т-пласт 1 приведены в таблице 2.

2.2.3. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонта Т-пласт 2

Горизонт Т-пласт-2 исследован девятью пробами. Плотность и вязкость пластовой нефти составляют 749.9 кг/м³, 1.07 мПа·с, соответственно. Давление насыщения нефти газом при термобарических условиях исследования пласта Тпл = 33.9°C и Рпл = 9.9 МПа находится на уровне - 5.4 МПа. Газосодержание составляет 72.4 м³/т. Объемный коэффициент равен 1.157, пересчетный коэффициент - 0.865. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т-пласт 2 приведены в таблице 2.

2.2.4. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонта Т-I

Горизонт Т-I исследован тремя пробами, две пробы некондиционные из-за низкого значения газосодержания.

Берем насыщенную пробу, исследованную в лаборатории Шлюмберже, так как по данному горизонту наблюдается газовая шапка (рисунок 4) и было принято решение взять пробу с высоким газосодержанием Rs и давлением насыщения Рнас.

Величина плотности пластовой нефти и вязкости составляет 755 кг/м³ и 1.61 мПа·с, соответственно. Давление насыщения нефти газом при термобарических условиях исследования пласта Тпл = 40.3°C и Рпл = 10.9 МПа находится на уровне - 10.6 МПа. Газосодержание составляет 96.1 м³/т. Объемный коэффициент равен 1.212, пересчетный коэффициент 0.825. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т-I приведены в таблице 2.

2.2.5. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонта Т-II

Горизонт Т-II исследован двумя пробами, одна проба некондиционная из-за низкого значения газосодержания.

Плотность пластовой нефти составляет 759 кг/м³, вязкость - 2.34 мПа·с. Давление насыщения нефти газом при термобарических условиях исследования пласта Тпл = 40.5°C и Рпл = 11.1 МПа находится на уровне - 9.2 МПа. Газосодержание составляет 94.0 м³/т. Объемный коэффициент равен 1.222, пересчетный коэффициент 0.818. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т-II приведены в таблице 2.

Горизонт Т-III исследован девятью пробами. Некоторые пробы отбракованы, так как пробы тяжелые и не вяжутся с пробами из близлежащих скважин, две пробы легкие – это говорит о проявления конденсата газовой шапки, что вызывает сомнения на достоверность. Одна проба отбракована из-за сильного низкого газосодержания и давления насыщения, скорее всего произошло разгазирование пробы.

По данному горизонту принятая величина плотности пластовой нефти и вязкости составляет 753.5 кг/м³ и 1.48 мПа·с, соответственно. Давление насыщения нефти газом при термобарических условиях исследования пласта Тпл = 37.9°C и Рпл = 11.1 МПа находится на уровне -

10.3 МПа. Газосодержание составляет 92.6 м³/т. Объемный коэффициент равен 1.232, пересчетный коэффициент 0.812. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т-III приведены в таблице 2.

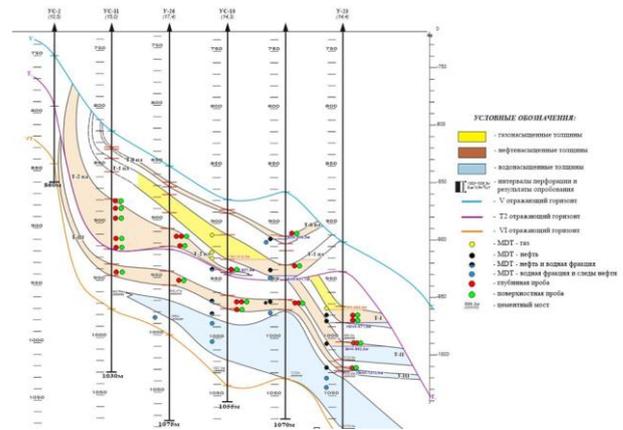


Рисунок 4. Схема обоснования ВНК и ГНК

Таблица 2. Результаты настройки PVT модели месторождения Уз Северный

Горизонт		Т-пласт 0	Т-пласт 1	Т-пласт 2	Т-I	Т-II	Т-III
Параметры	Ед.изм	Расчеты по модели					
Пластовое давление	МПа	10.7	10.1	10.1	109.0	11.1	11.4
Пластовая температура	°C	35.3	33.9	33.3	40.3	40.5	40.7
Давление насыщения	МПа	5.4	11.2	6.3	109.0	9.2	10.9
Газосодержание	м ³ /м ³	48.8	110.7	61.1	78.9	78.53	98.72
	м ³ /т	61.3	137.9	76.8	95.2	93.2	118.5
Объемный коэффициент		1.135	1.270	1.170	1.217	1.226	1.291
Плотность пластовой нефти	г/см ³	0.750	0.718	0.743	0.750	0.755	0.722
Плотность сепарированной нефти	г/см ³	0.795	0.803	0.796	0.829	0.843	0.833
Вязкость пластовой нефти	мПа·с	1.2	0.9	1.0	1.6	2.29	1.3

2.3. Обоснование свойств пластовой нефти месторождения Уз Восточный

На месторождении Уз Восточный исследовано 29 пластовых проб нефти, отобранные в разведочный период и в период промышленной разработки.

Для детального анализа была построена PVT модель пластового флюида для горизонтов I и II неоком, Ю-III, Т-пласт 1, Т-пласт 2. Моделирование выполнялось в программе Schlumberger PVTi. Адаптация модели к экспериментальным данным (давление насыщения, данные стандартной сепарации, вязкость) проводилась с помощью:

- бинарных коэффициентов взаимодействия компонентов пластовых флюидов;
- $T_{кр}$ и $R_{кр}$ для фракции C7+;
- шифт-параметр для коррекции плотности;
- параметр V_c и коэффициентов полинома LVC для вязкости.

Параметры пластовой нефти по новым пробам были сопоставлены с данными ранее отобранных проб, а также проверены по критериям отбраковки. Отбраковка некорректных лабораторных замеров проводилась по следующим принципам: по аномальному отклонению от основного направления взаимосвязи параметров пластовой нефти. Были построены графики зависимости: давление насыщения - газосодержание, плотность пластовой нефти - газосодержание, объемный коэффициент - газосодержание (рисунки 5-11).

2.3.1. Анализ и обоснование свойств пластового флюида I неокомского горизонта

Пластовая нефть продуктивного горизонта I - неоком охарактеризована двумя параллельно отобранными пробами в 2015 г.

Согласно исследованиям, газосодержание двух параллельных проб составило 12.18 и 12.04 м³/т, соответственно. Плотность нефти в стандартных условиях принята на уровне 0.906 г/см³, в пластовых условиях - 0.889 г/см³, объемный коэффициент 1.029.

Исследованные пробы пластовой нефти, являются качественными согласно контрольным параметрам ОСТ. В таблице 3 приведены результаты настройки PVT модели.

2.3.2. Анализ и обоснование свойств пластового флюида II неокомского горизонта

Пластовая нефть продуктивного горизонта II-неоком охарактеризована четырьмя параллельно отобранными пробами и 1 рекомбинированной пробой, которая была отбракована ввиду низкого газосодержания и других параметров относительно проб.

Параметры пластовой нефти II неокомского горизонта по 4 глубинным пробам меняется незначительно. Согласно исследованиям, газосодержание меняется от 21.4 до 24.7 м³/т, плотность нефти в стандартных условиях принята на уровне 0.900 г/см³, плотность нефти в пластовых условиях 0.874 г/см³, объемный коэффициент 1.046. По II неокомскому горизонту в целом наблюдается удовлетворительная сходимость расчетов по PVT модели и экспериментальных данных (таблица 3).

2.3.3. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонта Ю-III

По горизонту Ю-III проведено 18 исследований пластовых проб нефти.

Параметры пластовой нефти (объемный коэффициент, давление насыщения, плотность, вязкость) прямо связаны с газосодержанием, значения которых варьирует от 12.3 м³/т до 28.1 м³/т.

Дифференциация свойств пластовой нефти по горизонту, в первую очередь – газосодержания, указывает на проблемы с качеством отбора проб, которые связаны с потерей газа при отборе глубинных проб.

Также необходимо отметить, что по определенным глубинным пробам получены низкие значения газосодержания (12.3-13.4 м³/т), относительно начальных проб

(22.3-28.1 м³/т). При этом объемный коэффициент у этих проб остался таким же, как и по начальным пробам, с большим газосодержанием. Это является не физичным, так как упоминалось выше градиент растворимости у всех проб одинаковый. Низкое качество лабораторных данных, возможно связаны с потерей газа при отборе глубинных проб нефти. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Ю-III приведены в таблице 3.

Также были построены графики зависимости давления насыщения, объемного коэффициента и плотности пластовой нефти от газосодержания, по которым видно удовлетворительную корреляцию свойств, с хорошей воспроизводимостью экспериментальных замеров (рисунки 5-7).

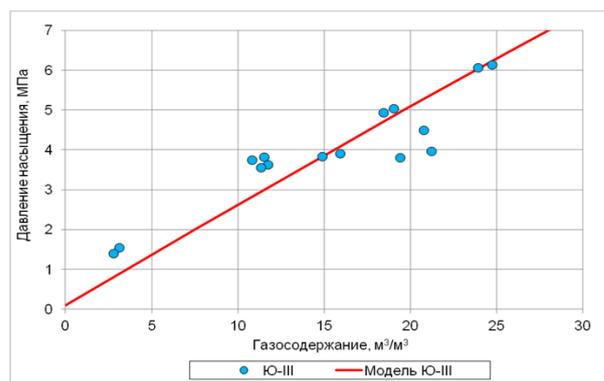


Рисунок 5. Зависимость давления насыщения от газосодержания

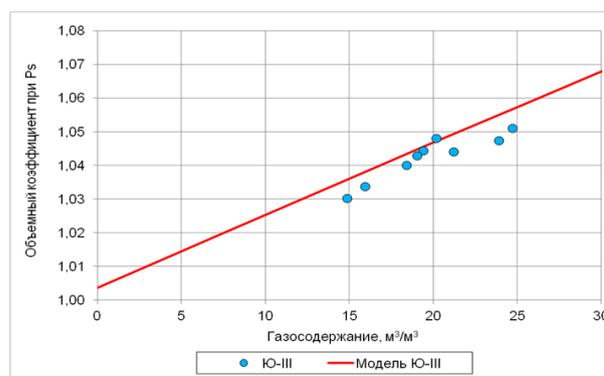


Рисунок 6. Зависимость объемного коэффициента от газосодержания

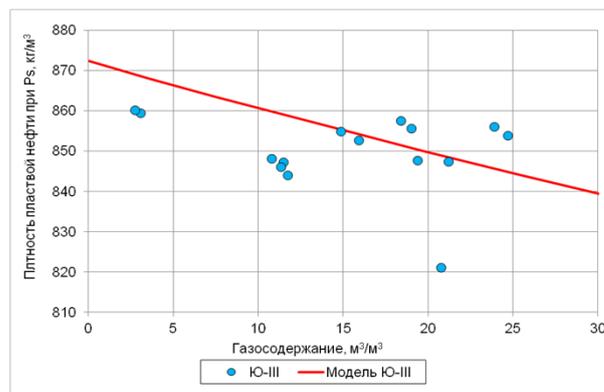


Рисунок 7. Зависимость плотности пластовой нефти от газосодержания

2.3.4. Анализ и обоснование свойств пластового флюида горизонтов Т-пласт 1, Т-пласт 2

Пластовая нефть верхнего триасового горизонта охарактеризована 4 глубинными пробами нефти, из пластов Т-пласт 1 и Т-пласт 2. Во всех глубинных пробах триасового горизонта зафиксировано низкие значения газосодержания и соответственно давление насыщения, что не характерно для нефтяной залежи с газовой шапкой.

Также при оценке свойств начальной пластовой нефти выявлены проблемы с оценкой пластового давления (Рпл 5-7 МПа), которое не соответствует глубине залегания пласта – 1000 м. Рассматриваемые пласты по другим участкам месторождения Уаз Восточный имеют пластовые давления, согласующиеся с гидростатическим на глубину залегания пласта. В связи с этим, за начальное пластовое давление для пластов Т-пласт 1 и Т-пласт 2 месторождения Уаз Восточный принято гидростатическое давление на глубину залегания. Это значение давления также было подтверждено в результате гидродинамических исследований месторождения Уаз Восточный (интервал перфорации 1064-1068, 1076-1079 м).

Для детального анализа проведены сравнения свойств пластовой нефти триасового горизонта месторождения Уаз Восточный с месторождением Уаз Северный. Были построены графики зависимости параметров пластовой нефти двух месторождений, по которым видно, что свойства пластового флюида двух месторождений имеют близкие взаимосвязи и значения параметров (рисунки 9 - 11).

В триасовом горизонте залегает пластовая нефть с газовой шапкой (рисунок 8), поэтому нефть на глубине ГНК должна находиться в насыщенном состоянии. Все пробы нефти в такой залежи будут подвержены процессам разгазирования при их отборе.

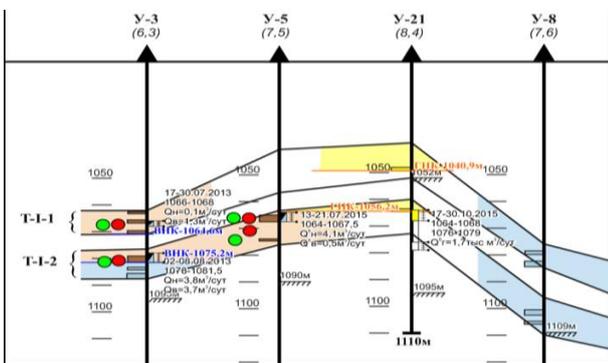


Рисунок 8. Схематичный рисунок корреляции части пласта триасового горизонт

Начальные свойства пластовой нефти, ввиду небольшой мощности триасового горизонта, должны приниматься согласно насыщенному состоянию флюида. Поэтому состав и свойства пластовой нефти были восстановлены с использованием выявленной взаимосвязи параметров флюида (рисунки 9-11). Давление насыщения принято равным начальному пластовому давлению – 10.1 МПа. Газосодержание определено из полученной зависимости давления насыщения от газосодержания на уровне 137.8 м³/т. Таким же образом, по зависимости объёмного коэффициента от газосодержания, проведена оценка объёмного коэффициента. Эти параметры использовались для настройки, созданной на основе математической рекомбинации состава насыщенного пласто-

вого флюида модели. Результаты настройки PVT модели на экспериментальные данные по горизонту Т-I пл.1, Т-I пл.2 приведены в таблице 3.

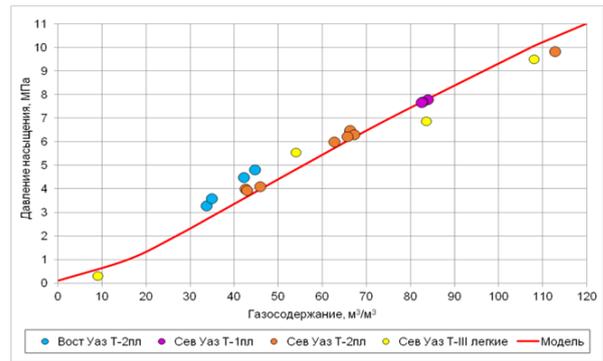


Рисунок 9. Зависимость давления насыщения от газосодержания

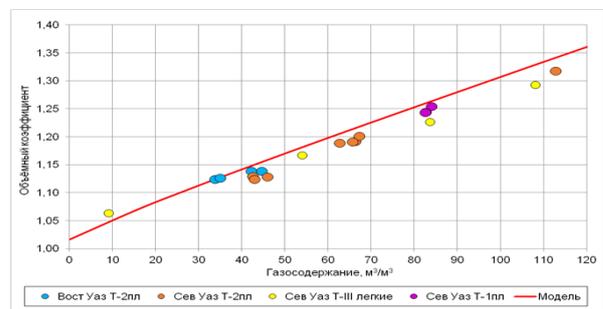


Рисунок 10. Зависимость объёмного коэффициента от газосодержания

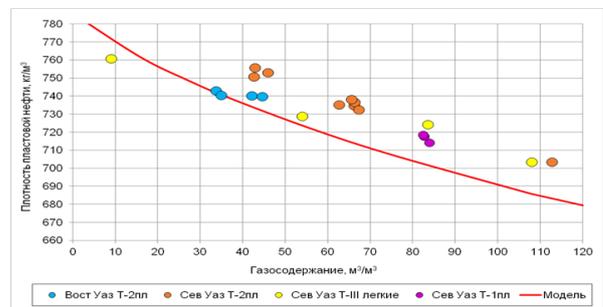


Рисунок 11. Зависимость плотности пластовой нефти от газосодержания

Следует отметить, что для залежей, имеющих значительную мощность продуктивных отложений, полученный состав пластовой нефти на ГНК (месторождение Уаз Северный (горизонт Т-I) и Уаз Восточный (горизонт Т-пласт 1, Т-пласт 2)) дает возможность проводить оценку изменения компонентного состава пластовой нефти, и следовательно, ее состав по разрезу пласта на основе моделирования гравитационного распределения. При наличии газовой шапки давление насыщения пластовой нефти в подгазовой части залежи должно быть близким к пластовому давлению. На газонефтяном контакте (ГНК), в соответствии с классическими физическими представлениями о термодинамическом равновесии сосуществующих газовой и жидкой фаз, давление насыщения пластовой нефти равно пластовому давлению (месторождение Уаз Восточный Рпл = 10.2 МПа, Рнас = 10.1 МПа; месторождение Уаз Северный Рпл = 109 МПа, Рнас = 109 МПа).

Таблица 3. Результаты настройки PVT модели месторождения Уаз Восточный

Горизонт		I-неоком	II-неоком	Ю-III	T-I пл.1, T-I пл.2
Параметры	Ед.изм	Расчеты по модели			
Пластовое давление	МПа	4.3	5.2	6.4	10.2
Пластовая температура	°C	22.3	22.8	28.2	37.7
Давление насыщения	МПа	3.0	4.6	5.0	10.1
Газосодержание	м ³ /м ³	10.9	19.3	19.7	108.4
	м ³ /т	12.0	21.4	22.5	135.7
Объемный коэффициент		1.026	1.052	1.046	1.330
Плотность пластовой нефти	г/см ³	0.892	0.876	0.850	0.756
Плотность сепарированной нефти	г/см ³	0.906	0.900	0.876	0.799
Вязкость пластовой нефти	мПа·с	55.0	34.4	11.8	0.7

Таким образом, на основании проделанной работы по построению PVT моделей трех месторождений Уаз, Уаз

Восточный, Уаз Северный показаны отличительные особенности реальных пластовых газонефтяных систем. PVT модель позволит с большей точностью выполнять прогнозирование показателей разработки, пересчета запасов месторождений и определять техническую эффективность различных методов увеличения нефтеотдачи.

Литература / References

- [1] Brusilovskij, A.I. (2002). Fazovye prevrashhenija pri razrabotke mestorozhdenij nefiti i gaza. *M.: Graal'*
 - [2] Wilson; G.M. (1969). A Modified Redlich — Kwong equation of state, Application to general physical data calculation. *Meeting, Cleveland*
 - [3] Pedersen, K.S., Christensen, P.L. (2007). Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids. *New York: CRC Press*
 - [4] Jushhenko, T.S, Brusilovskij, A.I. (2015). Jefferktiv-nij metod postroenija i adaptacii PVT-modelej plastovyh fljuidov gazokondensatnyh mestorozhdenij i gazovyh shapok neftegazokondensatnyh zalezhej. *Neftjanoe hozjajstvo, (1), 56–60*
- Rodriguez, I., Hamouda, A.A. (2006). An approach for characterization and lumping of plus fractions of heavy oil. *SPE, ID 117446*

Уаз, Уаз Шығыс, Уаз Солтүстік кен орындары мысалында Тайсоған блогындағы PVT қасиеттерін модельдеу

Г.Ж. Кокымбаева*, Э.В. Ермаков, Р.У. Досниязов

«КМГ Инжиниринг» ЖШС, Атырау, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: kokymbayeva.g@lpcmg.kz

Андатпа. Қабат сұйықтарының PVT қасиеттері туралы сенімді деректердің болуы мұнай және газ қабаттарының қорын есептеуде, мұнай беру коэффициентін бағалауда, ұңғымаларды сынауда, қабаттарды сандық модельдеуде және кен орнын игеру жобасында негізделген шешімдер қабылдауда жетекші рөл атқарады. Тәжірибеде табиғи көмірсутек қоспаларының қасиеттерін негіздеу үшін бір мезгілде далалық, зертханалық және теориялық зерттеулердің нәтижелері қолданылады. Белгіленген кезеңдердің әрқайсысында мамандар алынған деректердің сенімділігін арттыруға және оларды түсіндіру әдістерін әзірлеуге тырысады. Мұнай кен орнының қабаттық флюидтерінің қасиеттерін анықтау ұңғымалардың түптік аймағына әсер етудің әртүрлі әдістерін тиімді пайдаланудың, ұңғымаларды пайдалану үшін жабдықтарды таңдаудың алғы шарты болып табылады. Қабат сұйықтарының қасиеттері әртүрлі термобарлық жағдайлармен анықталады және қабаттың ағымдағы күйіне және қабат қысымының өзгеру сипаттамаларына байланысты өзгереді. Қабат сұйықтарының қасиеттерін анықтаудың барлық белгілі әдістері екі топқа бөлінеді: тәжірибелік және есептік. Топтардың әрқайсысының артықшылықтары да, белгілі бір кемшіліктері де бар.

Негізгі сөздер: дала, эксперимент, PVT моделі.

Моделирование PVT свойств в пределах блока Тайсоган на примере месторождений Уаз, Уаз Восточный, Уаз Северный

Г.Ж. Кокымбаева*, Э.В. Ермаков, Р.У. Досниязов

ОО «КМГ Инжиниринг», Атырау, Казахстан

*Автор для корреспонденции: kokymbayeva.g@lpcmg.kz

Аннотация. Наличие достоверных данных о PVT свойствах пластовых флюидов играет ведущую роль при подсчете запасов нефтяных и газовых залежей, оценке коэффициента извлечения нефти, исследовании скважин, численном моделировании коллекторов и для принятия обоснованных решений при проектировании разработки месторож-

дений. На практике результаты промысловых, лабораторных и теоретических исследований используются одновременно для обоснования свойств природных углеводородных смесей. На каждом из отмеченных этапов специалисты стремятся повысить достоверность получаемых данных и развить методы их интерпретации. Определение свойств пластовых флюидов нефтяного месторождения является обязательным условием эффективного применения различных методов воздействия на призабойную зону скважин, подбора оборудования для эксплуатации скважин. Свойства пластовых флюидов определяются различными термобарическими условиями и меняются в зависимости от текущего состояния пласта и характеристики изменения пластового давления. Все известные методы определения свойств пластовых флюидов делятся на две группы: экспериментальные и расчётные. Каждая из групп имеет как преимущества, так и определённые недостатки.

Ключевые слова: месторождение, эксперимент, модель PVT.

CONTENTS

<i>Dosmukhamedov N.K., Zholdasbay E.E., Egizekov M.G.</i> NEW OPPORTUNITIES FOR THE DEVELOPMENT OF THE COAL INDUSTRY: TECHNOLOGY OF WASTE GAS PURIFICATION FROM SO ₂ , NO _x , CO ₂	5
<i>Bussygin I.G., Kuldeyev Ye.I., Bondarenko I.V., Volkov A.V., Khayrutdinova D.D.</i> STUDY OF COMPLEX PROCESSING OF 10-160 MM GRADE CHROMIUM TAILINGS BY ENCAPSULATION IN GREENCRETE™ COMPOSITE SULFUR CONCRETE.....	11
<i>Gladyshev S.V., Rakhimova S.D., Imangalieva L.M., Kasymzhanova A.K.</i> DISPOSAL OF SOLUTIONS OF COPPER ELECTROFINING PROCESSING OF NON-FERROUS METAL SCRAP.....	16
<i>Kobegen Ye., Yessengaliyev D.A., Boranbaeva B.M., Aitbaev N.B., Koishina G.M.</i> CALCULATION OF THERMODYNAMIC FUNCTIONS DURING AGGLOMERATION OF HETEROGENEOUS CHARGE COMPONENTS.....	22
<i>Mendygaliyev A., Arshamov Ya., Yazikov E.</i> ORTHOGONAL-CONTOUR GEOMETRIZATION OF HYDROGENETIC ORE MINERALIZATIONS.....	30
<i>Rysbekov K.B., Dai Huayang, Nurpeisova M.B., Lozynskiy V.H. , Kyrgyzbayeva G.M., Kassymkanova K., Abenov A.M.</i> MODERN MONITORING TOOLS – EFFECTIVE WAY TO ENSURE SAFETY IN SUBSOIL USE	34
<i>Kokymbayeva G., Ermekov E., Dosniyazov R.</i> MODELING OF PVT PROPERTIES WITHIN THE TAISOGAN BLOCK ON THE EXAMPLE OF THE UAZ, UAZ EAST, UAZ NORTH FIELDS	41

МАЗМҰНЫ

<i>Досмұхамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Егизеков М.Г.</i> КӨМІР САЛАСЫН ДАМЫТУДЫҢ ЖАҢА МҮМКІНДІКТЕРІ: ШЫҒАТЫН ГАЗДАРДЫ SO ₂ , NO _x , CO ₂ ТАЗARTU ТЕХНОЛОГИЯСЫ.....	5
<i>Бусыгин И.В., Көлдеев Е.И., Бондаренко И.В., Волков А.В., Хайрутдинова Д.Д.</i> GreenCrete™ МАРКАЛЫ КОМПОЗИТТІК СЕРОБЕТОНҒА КАПСУЛАЛАУ ӘДІСІМЕН 10-160 мм КЛАСТЫ ХРОМ ШИКІЗАТЫН БАЙЫТУ ҚАЛДЫҚТАРЫН КЕШЕНДІ ҚАЙТА ӨҢДЕУДІ ЗЕРТТЕУ.....	11
<i>Гладышев С.В., Рахимова С.Д., Имангалиева Л.М., Касымжанова А.К.</i> ТҮСТІ МЕТАЛЛ СЫҢЫҚТАРЫН ҚАЙТА ӨҢДЕУ МЫСЫН ЭЛЕКТРОФИНДЕУ ЕРІТІНДІЛЕРІН КӘДЕГЕ ЖАРАТУ.....	16
<i>Көбеген Е., Есенгалиев Д.А., Боранбаева Б.М., Айтбаев Н.Б., Койшина Г.М.</i> ӨРТЕКТІ КОМПОНЕНТТІ ШИХТАНЫ АГЛОМЕРАЦИЯЛАУ КЕЗІНДЕГІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ФУНКЦИЯЛАРДЫ ЕСЕПТЕУ.....	22
<i>Мендығалиев А., Аршамов Я., Язиков Е.</i> ГИДРОГЕНДІ КЕНДЕНУЛЕРДІҢ ОРТОГОНАЛДЫ-КОНТУРЛЫ ГЕОМЕТРИЗАЦИЯЛАНУЫ	30
<i>Рысбеков К.Б., Ниуауанг Дай, Нурпеисова М.Б., Лозинский В.Г., Кыргызбаева Г.М., Касымханова Х-К.М., Абенев А.М.</i> МОНИТОРИНГТІҢ ЗАМАНАУИ ҚҰРАЛДАРЫ - ЖЕР ҚОЙНАУЫН ПАЙДАЛАНУДА ҚАУПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ ТИІМДІ БАҒЫТЫ.....	34
<i>Кокымбаева Г.Ж., Ермеков Э.В., Досниязов Р.У.</i> УАЗ, УАЗ ШЫҒЫС, УАЗ СОЛТҮСТІК КЕН ОРЫНДАРЫ МЫСАЛЫНДА ТАЙСОҒАН БЛОҒЫНДАҒЫ PVT ҚАСИЕТТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ.....	41

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Досмухамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Егизеков М.Г.</i> НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ: ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ОТ SO ₂ , NO _x , CO ₂	5
<i>Бусыгин И.В., Кульдеев Е.И., Бондаренко И.В., Волков А.В., Хайрутдинова Д.Д.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМОВОГО СЫРЬЯ КЛАССА 10-160 ММ МЕТОДОМ КАПСУЛИРОВАНИЯ В КОМПОЗИТНЫЙ СЕРОБЕТОН МАРКИ GreenCrete™.....	11
<i>Гладышев С.В., Рахимова С.Д., Имангалиева Л.М., Касымжанова А.К.</i> УТИЛИЗАЦИЯ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОРАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ ПЕРЕРАБОТКИ ЛОМА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	16
<i>Кобеген Е., Есенгалиев Д.А., Боранбаева Б.М., Айтбаев Н., Қойшина Г.М.</i> РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИИ ПРИ АГЛОМЕРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ.....	22
<i>Мендыгалиев А., Аршамов Я., Язиков Е.</i> ОРТОГОНАЛЬНО-КОНТУРНАЯ ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ ГИДРОГЕННЫХ ОРУДЕНЕНИЙ	30
<i>Рысбеков К.Б., Нуауанг Dai, Нурпеисова М.Б., Лозинский В.Г., Кыргызбаева Г.М., Касымханова Х-К.М., Абенов А.М.</i> СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА - ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ.....	34
<i>Кокымбаева Г.Ж., Ермеков Э.В., Досниязов Р.У.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ PVT СВОЙСТВ В ПРЕДЕЛАХ БЛОКА ТАЙСОГАН НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УАЗ, УАЗ ВОСТОЧЬЙ, УАЗ СЕВЕРНЫЙ.....	41

Учредитель:

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева

Регистрация:

Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан
№ KZ22VPY00030188 от 15.12.2020г.

Официальный сайт: <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/>

Основан в августе 1994 г. Выходит 6 раз в год

Адрес редакции:

г. Алматы, ул. Сатпаева,
22 тел.: 292-63-46