

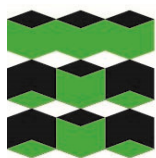


**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Том 335, № 4, 2024
Издается с 1903 г.**

**BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
GEO ASSETS ENGINEERING**

**Volume 335, no. 4, 2024
Published since 1903**



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on-line) – 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 335, № 4, 2024

Издательство
Томского политехнического университета
2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Остальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Контарович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мостовщиков А.В., д-р техн. наук (Россия)
Хакимьянов М.И., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2024

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

ISSN (print) – 2500_1019
ISSN (on_line) – 2413_1830

**BULLETIN
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 335, № 4, 2024

EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Belozerv V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Strokova L.A., Dr. Sc. (Russia)
Mazurov A.K., Dr. Sc. (Russia)
Mostovshchikov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Khakimyanov M.I., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is a peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communicationss).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets strategy includes:

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest two potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | | |
|---|---|--|
| <p>Опыт моделирования кривой образования асфальтенов и снижения интенсивности их образования путем оптимизации технологии добычи нефти
 Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В.</p> <p>Анализ результатов моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта
 Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У., Ямкин А.В.</p> <p>Искровое плазменное спекание объемных материалов на основе SiC из углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи
 Шаненков И.И., Никитин Д.С., Насырбаев А., Циммерман А.И., Шаненкова Ю.Л., Власов А.В., Пак А.Я., Сайгаш А.С.</p> <p>Получение комплексных титансодержащих коагулянтов из крупнотоннажных минеральных концентратов и их использование при очистке сточных вод
 Кузин Е.Н., Фадеев А.Б.</p> <p>Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства
 Рахмонов И.У., Ушаков В.Я., Нажимова А.М., Обидов К.К., Сулейманов С.Р.</p> <p>Comparative analysis of swelling mitigation in marl and clay soils: natural plant fibers (Alfa, jute, sisal) vs. polypropylene fiber with lime-pozzolana cement utilizing proctor compaction
 El Majid A., Baba Kh., Razzouk Ya.</p> <p>Механизм соосаждения америция на оксалате кальция
 Софронов В.Л., Селявский В.Ю.</p> <p>Формирование петрофизических взаимосвязей типа «кern–кern» для создания модели свойств коллекторов
 Коровин М.О., Алеева А.О.</p> <p>Численный анализ поля распределения давления и векторов скорости потока жидкости вблизи отверстий кумулятивной перфорации
 Попов С.Н., Чернышов С.Е.</p> <p>Энергопотребление электроцентробежных насосных установок при добыче высокообводненных нефтей
 Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Уразакон К.Р.</p> <p>Токсичность парогазовых потоков от техногенного вещества
 Бортникова С.Б., Мысик А.В., Еделева А.В., Хвачевская А.А.</p> <p>Твердотельный демпфер для снижения виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций
 Гаврилин А.Н., Дмитриев В.С., Ермаков Д.В., Дерусова Д.А.</p> | <p>7</p> <p>14</p> <p>22</p> <p>34</p> <p>43</p> <p>52</p> <p>64</p> <p>73</p> <p>80</p> <p>88</p> <p>95</p> <p>108</p> | <p>Experience in modeling an asphaltene depositions curve and reducing the intensity of their formation by optimizing oil production technology
 Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V.</p> <p>Analysis of the results of modeling fluid inflow to a hydraulic fracturing
 Yamkin M.A., Safiullina E.U., Yamkin A.V.</p> <p>Spark plasma sintering of SiC-based bulk materials from carbonaceous residue of rice husk thermal processing
 Shanenkov I.I., Nikitin D.S., Nassyrbayev A., Tsimmerman A.I., Shanenkova Yu.L., Vlasov A.V., Pak A.Ya., Saigash A.S.</p> <p>Preparation of complex titanium-containing coagulants from large-scale mineral concentrates and their use in wastewater treatment
 Kuzin E.N., Fadeev A.B.</p> <p>Mathematical modeling of minimization of electricity consumption by industrial enterprises with continuous production
 Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Najimova A.M., Obidov K.K., Suleimanov S.R.</p> <p>Сравнительный анализ снижения набухания мергельно-глинистых грунтов: натуральные растительные волокна (Альфа, джут, сизаль) против полипропиленовой фибры с известково-пуццолановым цементом при прокторном уплотнении
 Эль Маджид А., Баба Х., Раззук Я.</p> <p>Americium co-precipitation with calcium oxalate
 Sofronov V.L., Selyavskiy V.Yu.</p> <p>“Core–core” petrophysical relationships generation for reservoir modeling
 Korovin M.O., Aleeva A.O.</p> <p>Numerical analysis of a pressure distribution field and fluid flow velocity vectors near cumulative perforation holes
 Popov S.N., Chernyshov S.E.</p> <p>Power consumption of electric centrifugal pumping plants under extraction of highly watered oil
 Vakhitova R.I., Saracheva D.A., Urazakov K.R.</p> <p>Toxicity of vapor-gas flows from technogenic substance
 Bortnikova S.B., Mytsik A.V., Edelev A.V., Khvachevskaya A.A.</p> <p>Solid-state damper for reducing vibration activity of an electromechanical device of a life support system of oil and gas stations
 Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A.</p> |
|---|---|--|

- | | |
|---|--|
| <p>Характеристики горения капель водомазутной эмульсии со специализированными присадками
 Шлегель Н.Е., Клименко А.Ю.</p> <p>Оптимальные температуры измерения вязкости нефти для восстановления ее вязкостно-температурной зависимости по формулам Филонова–Рейнольдса, Вальтера и Фогеля–Фульчера–Таммана
 Валеев А.Р., Ташбулатов Р.Р., Барабанщикова Т.А.</p> <p>Алгоритм точного перемещения грузов на физической модели сортировочного транспортера
 Сарбасова Н.Д., Умурзакова А.Д., Гирник А.С., Кладиев С.Н.</p> <p>Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан)
 Сайитов С.С., Цой В.Д., Расулов Ш.М., Печерский Р.Д., Расулова А.В., Абдувайтов А.К., Асроров А.А.</p> <p>Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента
 Попова М.С.</p> <p>Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при совместной переработке вакуумного газойля и низкомаржинальных потоков нефтепереработки
 Назарова Г.Ю., Ивашкина Е.Н., Нафо Б.Д., Мальцев В.В., Шафран Т.А.</p> <p>Эффективность методики подбора роторно-управляемых систем на основе алгоритма машинного обучения Random Forest Classifier
 Никишин В.В., Блинов П.А., Терехин В.А.</p> <p>Power hardware-in-loop emulation of a battery for charging systems and grid applications
 Jassim H.M., Ziuzev A.M., Mudrov M.V.</p> | <p>118 Combustion characteristics of water-oil emulsion droplets with special additives
 Schlegel N.E., Klimenko A.Yu.</p> <p>131 Optimal temperatures for measuring oil viscosity to restore its viscosity-temperature dependence according to the Filonov–Reynolds, Walter and Vogel–Fulcher–Tamman formulas
 Valeev A.R., Tashbulatov R.R., Barabanshchikova T.A.</p> <p>139 Algorithm of accurate cargo movement on a physical model of a sorting conveyor
 Sarbassova N.D., Umurzakova A.D., Girnik A.S., Kladiev S.N.</p> <p>148 Material composition of copper slag of the Almalyk copper-smelting plant (Uzbekistan)
 Sayitov S.S., Tsoi V.D., Rasulov Sh.M., Pechersky R.D., Rasulova A.V., Abduvaitov A.K., Asrorov A.A.</p> <p>159 Hydrodynamic processes in designing diamond drilling tools
 Popova M.S.</p> <p>172 Prediction of catalytic cracking performance during co-processing of vacuum gas oil and low-margin oil refining streams
 Nazarova G.Y., Ivashkina E.N., Nafo B.J., Maltsev V.V., Shafran T.A.</p> <p>185 Effectiveness of the method for selecting rotary-steerable systems based on the machine learning algorithm Random Forest Classifier
 Nikishin V.V., Blinov P.A., Terekhin V.A.</p> <p>200 Программно-аппаратная эмуляция аккумуляторной батареи для систем зарядки и энергосистем
 Джассим Х.М., Зюзев А.М., Мудров М.В.</p> |
|---|--|

УДК 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4396

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Опыт моделирования кривой образования асфальтенов и снижения интенсивности их образования путем оптимизации технологии добычи нефти

П.Ю. Илюшин, К.А. Вяткин, А.В. Козлов✉

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉anton.kozlov@girngm.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости изучения образования асфальтеновых отложений в нефтедобывающих скважинах. Среди известных методов борьбы с данными осложнениями наибольший интерес вызывает оптимизация технологического процесса добычи нефти для предупреждения или снижения интенсивности образования данных отложений. **Цель:** изучить возможность построения кривой образования асфальтеновых отложений на лабораторной установке «Wax Flow Loop» и определить возможность оптимизации технологии добычи нефти с целью предупреждения образования данных отложений. **Методы:** лабораторные исследования на установке «Wax Flow Loop», моделирование на основании компонентного состава нефти в программном продукте «PVTsim», расчеты в программном продукте «Инженерный симулятор технологических процессов». **Результаты.** По результатам лабораторных исследований и численных расчетов построена кривая образования асфальтеновых отложений, корректность которой валидирована на фактических данных о закупоривании добывающей скважины. Выполненный расчет влияния установки электроцентробежного насоса и штуцирования скважины на кривую образования асфальтеновых отложений показал, что первая технология изменения процесса добычи нефти позволяет значительно снизить интенсивность образования асфальтеновых отложений за счет внесения дополнительной энергии. Вторая технология лишь незначительно смещает термобарические условия добычи жидкости, что не оказывает существенного влияния на интенсивность образования асфальтеновых отложений. **Выводы.** Лабораторная установка «Wax Flow Loop» позволяет корректно формировать кривую образования асфальтеновых отложений в лифтовой колонне нефтедобывающих скважин. При корректном моделировании и выполнении численных расчетов глубинно-насосного оборудования методы оптимизации технологии добычи нефти позволяют предупредить образование асфальтеновых отложений

Ключевые слова: асфальтеновые отложения, скважина, глубинно-насосное оборудование, оптимизация, лабораторные исследования

Благодарности: Работа выполнена в организации Головного исполнителя в рамках составной части НИКОТР, проводимой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2021-052 от 24 июня 2021 г.) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 (ПРОЕКТ 218). Головной исполнитель НИОКР – ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Для цитирования: Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В. Опыт моделирования кривой образования асфальтенов и снижения интенсивности их образования путем оптимизации технологии добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 7–13. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4396

UDC 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4396

Experience in modeling an asphaltene depositions curve and reducing the intensity of their formation by optimizing oil production technology

P.Yu. Ilyushin, K.A. Vyatkin, A.V. Kozlov✉

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉anton.kozlov@girngm.ru

Abstract. Relevance. The need to study the formation of asphaltene deposits in oil production wells. Among the known methods of combating these complications, the greatest interest is in optimizing oil production technology to prevent or reduce the intensity of the formation of these deposits. **Aim.** To study the possibility of constructing a curve for the formation of asphaltene deposits on the laboratory installation "Wax Flow Loop" and to determine the possibility of optimizing oil production technology to prevent the formation of these deposits. **Methods.** Laboratory studies on the "Wax Flow Loop" installation, modeling based on the component composition of oil in the "PVTSim" software product, calculations in the "Engineering Simulator of Technological Processes" software product. **Results.** Based on the results of laboratory studies and numerical calculations, it was possible to construct a curve for the formation of asphaltene deposits. The correctness of the curve was validated against actual data on plugging a production well. The calculation of the influence of installing an electric centrifugal pump and choke-fitting a well showed that the first technology for changing oil production can significantly reduce the intensity of the formation of asphaltene deposits by introducing additional energy. The second technology only slightly shifts the thermobaric conditions of liquid extraction, which does not significantly affect the intensity of the formation of asphaltene deposits. **Conclusions.** The laboratory installation "Wax Flow Loop" allows correctly forming the curve of asphaltene deposits formation in the production tubing of oil producing wells. Methods for optimizing oil production technology make it possible to prevent the formation of asphaltene deposits with correct modeling and numerical calculations and selection of downhole pumping equipment.

Keywords: asphaltene deposits, well, downhole pumping equipment, optimization, laboratory research

Acknowledgements: The work was carried out in the organization of the Lead Contractor as part of the R&D, with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement number 075-11-2021-052 of 24 June 2021) in accordance with the decree of the Government of the Russian Federation: 09.04.2010, number 218 (PROJECT 218). The main R&D contractor is the Perm National Research Polytechnic University.

For citation: Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Experience in modeling an asphaltene depositions curve and reducing the intensity of their formation by optimizing oil production technology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 7–13. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4396

Введение

Образование органических отложений в процессе добычи и транспортировки нефти является одной из наиболее распространенных проблем при эксплуатации нефтяных месторождений на территории всего мира [1, 2]. Одним из наиболее малоизученных и опасных осложнений при добыче нефти является образование асфальтеновых отложений [3]. В мировой литературе приводится множество свидетельств серьезных проблем как на начальных стадиях нефтедобычи, так и на поздних, причем образование данных отложений имеет место как в пластовых условиях, так и в поверхностных [4–6].

Асфальтены являются самым тяжелым и наиболее полярным компонентом сырой нефти, образующимся из гетероатомов, таких как кислород, сера, азот, и металлов, таких как железо, ванадий и ни-

кель. Их ядро состоит из нафтеновых групп и ароматических углеводородов, при этом они растворимы в ароматических растворителях, таких как пиридин, толуол и т. д. [7]. На стабильность сырой нефти влияет множество факторов, среди которых выделяется температура потока, давление, состав нефти [8]. Поскольку стабильность асфальтенов обеспечивается степенью растворимости в нефти (или другом флюиде), то применение в настоящее время различных химических соединений для увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов, таких как закачка углекислого газа, модифицированной воды, щелочных составов, может вызывать интенсивное выпадение асфальтеновых отложений в пластовых условиях [9–11].

Интенсивное осаждение асфальтенов ведет к снижению диаметра лифтовой колонны и сокраще-

нию дебита скважин или аварийной ситуации. Борьба с образованием данных отложений имеет два направления: удаление сформированных отложений или предупреждение. Поскольку удаление асфальтеновых отложений является крайне трудоемкой задачей ввиду их высокой плотности и твердости, большинство недропользователей внедряют механизмы предупреждения образования данных отложений [12]. Методы предупреждения образования асфальтеновых отложений зачастую включают в себя:

- непрерывное дозирование в поток химических реагентов-ингибиторов. Ингибиторы асфальтенов предотвращают агрегацию молекул асфальтенов и оказывают влияние на давление флокуляции асфальтенов, следовательно, осаждение асфальтенов в стволе скважины может быть перенесено в систему сбора [13, 14];
- непрерывное дозирование в поток химических реагентов-диспергаторов. Большинство диспергаторов представляют собой неполимерные поверхностно-активные вещества, используемые для уменьшения размера флокулированных асфальтеновых частиц. Они не влияют на точку флокуляции асфальтенов, но они диспергируют флокулированные частицы асфальтенов, удерживая их во взвешенном состоянии в нефти [15];
- обработка потока физическими полями. Воздействие физических полей может вызвать уменьшение размера частиц асфальтенов за счет создания новых центров кристаллизации. Применение ультразвуковых волн позволяет создавать турбулентность и кавитацию в потоке, за счет чего изменяется структура асфальтеновых отложений и снижается интенсивность их образования [16];
- добавление в поток флюида наночастиц. Применение наночастиц способно предупредить образование отложений за счет улавливания асфальтенов в потоке без засорения нефтепромыслового оборудования из-за малых размеров наночастиц (1–100 нм). Наночастицы адсорбируют асфальтены в их коллоидном состоянии, предотвращая их агрегацию, что обеспечивает эффективное предупреждение образования данных отложений [17, 18];
- изменение технологических параметров эксплуатации нефтедобывающей скважины, позволяющих сместить место образования асфальтеновых отложений в систему сбора.

Последний метод является наиболее предпочтительным, поскольку позволяет предупредить образование асфальтеновых отложений без значительных затрат. Для его реализации в мировой литературе разработан метод идентификации образования

асфальтеновых отложений в той или иной точке системы сбора. Для этого используется кривая образования асфальтенов (asphaltene phase envelope (APE)) [19, 20]. При снижении давления в процессе добычи нефти асфальтены дестабилизируются и выпадают в осадок [21]. По мере снижения пластового давления ниже начального количество формируемых асфальтеновых отложений увеличивается и достигает своего максимального значения, когда давление приближается к давлению насыщения. При дальнейшем падении давления интенсивность образования асфальтеновых отложений снижается.

В данной работе рассмотрен опыт построения кривой образования асфальтенов для осложненной нефтедобывающей скважины с разработкой рекомендаций по оптимизации технологических процессов добычи с целью предупреждения интенсивного образования отложений в стволе скважины.

Материалы и методы

Для выполнения лабораторных исследований использовалась проба нефти с одной из нефтедобывающих скважин рассматриваемого объекта. Плотность нефти в поверхностных условиях составляет 861 кг/м³, в пластовых условиях – 692 кг/м³. Содержание в нефти асфальтенов составляет 6,92 %, парафинов – 0,12 %, смол – 0,93 %, динамическая вязкость нефти при этом равна 0,37 мПа*с в пластовых условиях. Параметры работы целевой нефтедобывающей скважины представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры работы нефтедобывающей скважины

Table 1. Parameters of an oil well operation

Параметр Parameter	Размерность Dimension	Величина Value
Дебит скважины/Oil flow rate	м ³ /сут (m ³ /day)	445
Обводненность/Water cut	%	0
Давление Пластовое/Reservoir Pressure Устьевое/Annulus	МПа/MPa	44 10,7
Газовый фактор/Gas factor	м ³ /т (m ³ /t)	240
Давление насыщения Bubble point pressure	МПа/MPa	23,1
Продуктивность скважины Well productivity	м ³ /сут*МПа m ³ /day*MPa	200
Пластовая температура Reservoir temperature	°C	120
Глубина пласта/Reservoir depth	м/m	3230

Моделирование параметров работы нефтедобывающей скважины, а также подбор глубинно-насосного оборудования производились в программном обеспечении «Инженерный симулятор технологических процессов», в котором создана модель на основе реальной скважины.

Лабораторные исследования выполнялись на установке «Wax Flow Loop», подробно описанной в статье [22]. Для создания давления в установку подавался газообразный азот. Выполненные исследования заключались в определении нижней кривой образования асфальтеновых отложений.

Для выполнения расчетов верхней кривой образования асфальтеновых отложений и кривой изменения давления насыщения использован программный продукт PVTsim. Для этого использован компонентный состав флюида, представленный в табл. 2.

Таблица 2. Компонентный состав флюида
Table 2. Fluid component composition

Компонент Component	Молярная доля Molar frac- tion, %	Компонент Component	Молярная доля Molar frac- tion, %
N ₂	0,236	Деметилбензол et-Benzene	0,036
CO ₂	2,667	Параксилол p-Xylene	0,186
H ₂ S	1,568	Метаксилол m-Xylene	0,186
C ₁	38,648	Ортоксилол o-Xylene	0,183
C ₂	8,425	C ₇	2,58
C ₃	6,345	C ₈	2,325
iC ₄	1,094	C ₉	2,185
nC ₄	3,576	C ₁₀ -C ₁₂	5,892
iC ₅	1,467	C ₁₃ -C ₁₅	3,873
nC ₅	2,189	C ₁₆ -C ₁₈	2,765
cC ₅	0,137	C ₁₉ -C ₂₂	2,38
C ₆	2,981	C ₂₃ -C ₂₈	2,214
m-cC ₅	0,279	C ₂₉ -C ₃₅	1,505
Бензол/Benzene	0,123	C ₃₆ -C ₄₇	1,32
cC ₆	0,224	C ₄₈ -C ₆₁	0,952
m-cC ₆	0,33	C ₆₂ -C ₈₀	0,722
Толуол/Toluene	0,404		

Результаты расчета

В результате исследования пробы нефти на установке «Wax Flow Loop» получено изменение давления выпадения асфальтенов от температуры потока (рис. 1).

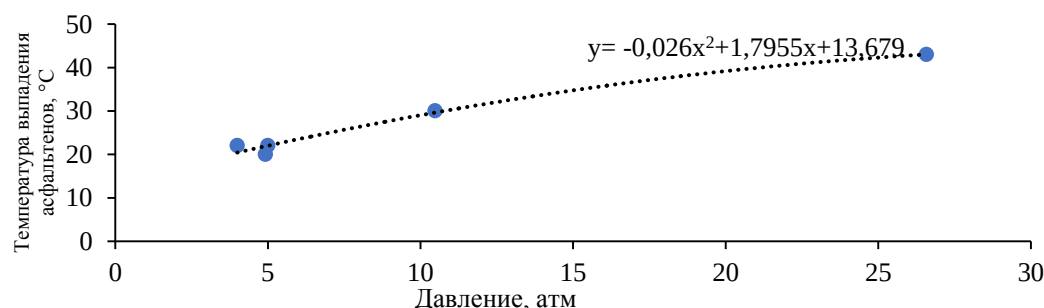


Рис. 1. Влияние температуры потока на давление выпадения асфальтенов
Fig. 1. Flow temperature influence on asphaltene precipitation pressure

На полученной зависимости отчетливо видно, что с ростом температуры давление выпадения отложений также увеличивается. Это происходит ввиду изменения растворимости асфальтеновых отложений в нефти в различных термобарических условиях. Так, для увеличения давления в сырьевую емкость установки подается азот, что и оказывает влияние на кривую. Полученная кривая является участком нижней кривой образования асфальтеновых отложений и границей стабилизации их в пластовом флюиде.

Далее на основании компонентного состава флюида в программном продукте PVTsim проведено моделирование верхней кривой образования отложений и изменения давления насыщения. Моделирование верхней кривой в лабораторных условиях невозможно, так как технологические возможности оборудования не позволяют создать давление более 40 МПа и температуру более 100 °С. В программном продукте «Инженерный симулятор технологических процессов» выполнено моделирование изменения термобарических условий движения пластового флюида по стволу добывающей скважины.

С целью предупреждения дальнейшего закупоривания добывающей скважины принято решение расчета методов оптимизации параметров добычи для смещения точки образования отложений в систему сбора и подготовки продукции. С этой целью в программном продукте «Инженерный симулятор технологических процессов» выполнен подбор электроцентробежного насоса (ЭЦН): ЭЦН5-320-1250 с частотой вращения двигателя 50 Гц. В результате расчетный напор установки составляет 1088 метров, КПД насоса – 48,0 %. Установка штуцера приводит к росту устьевого давления в рассматриваемой скважине, при этом увеличивается давление во всей системе, вследствие чего снижается ее дебит и температура транспортировки. В рамках работы рассмотрена установка штуцера диаметром 8 мм. Результаты расчетов, наложенные на график образования асфальтенов, представлены на рис. 2.

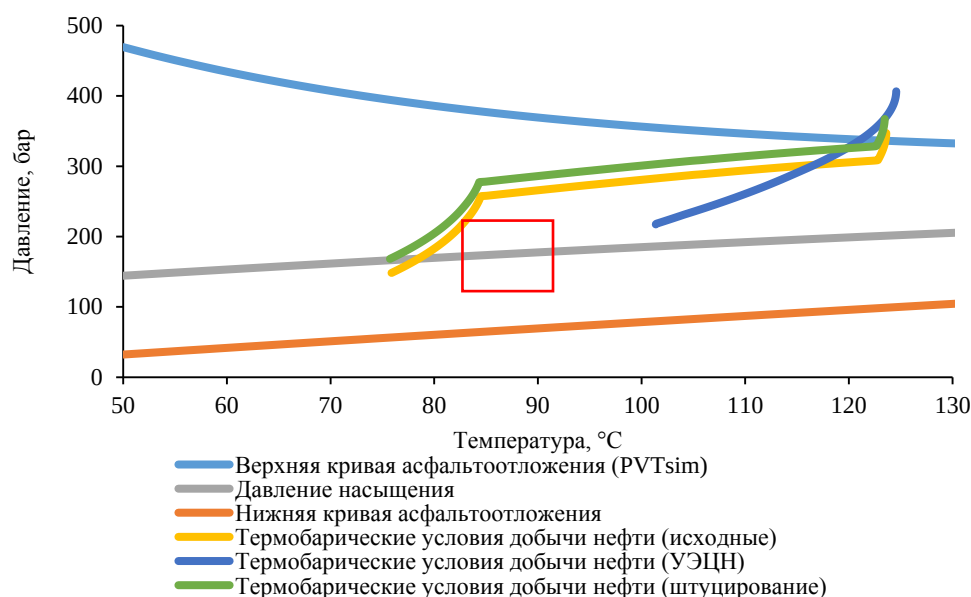


Рис. 2. Применение технологий оптимизации процесса добычи нефти на рассматриваемой целевой скважине
Fig. 2. Application of technologies to optimize oil production at the target well under consideration

Согласно теоретическим зависимостям можно отметить, что наибольшая интенсивность образования асфальтеновых отложений имеет место в момент достижения давления насыщения нефти попутным нефтяным газом. Причины этого процесса подробно рассмотрены в главе «Введение». Согласно фактическим данным, рассматриваемая целевая скважина закупорилась асфальтеновыми отложениями на расстоянии 200 м от устья, что подтверждается выполненным моделированием.

Рассматривая полученные данные, можно отметить, что установка в скважине ЭЦН позволяет увеличить давление в системе, при этом наблюдается лучшая динамика сохранения температуры потока, позволяющая увеличить температуру на устье на 20 °С. В случае регулирования устьевое сопротивление (установка штыцера) наблюдается увеличение давления при сохранении общей динамики изменения термобарических условий транспортировки жидкости. Можно сделать вывод, что установка ЭЦН позволит предупредить интенсивное образование асфальтеновых отложений в лиф-

товой колонне, смещая точку их выпадения в систему сбора продукции скважин.

Закключение

В работе представлен опыт моделирования кривой асфальтоотложения и применения методов оптимизации технологии добычи нефти для предупреждения интенсивного образования отложений в лифтовой колонне добывающих скважин. В рамках работы показано, что установка типа «Wax Flow Loop» способна корректно определить только нижнюю кривую образования асфальтенов, что является следствием технологических ограничений по давлению. Результаты PVT-моделирования позволяют построить верхнюю границу рассматриваемой зоны. Рассматривая применение методов предупреждения образования отложений, можно отметить, что установка глубинного электроцентробежного насоса позволяет изменить термобарические условия транспортировки жидкости и сместить точку интенсивного выделения асфальтенов в систему сбора и подготовки скважинной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vyatkin K., Ilushin P., Kozlov A. Forecasting the value of the linear pipeline cleaning interval based on the laboratory research // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15. – № 6. – P. 294–300.
2. Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В. Разработка интеллектуальных алгоритмов управления периферийным технологическим оборудованием куста скважин с помощью единой станции управления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 59–68.
3. Pore-scale imaging of asphaltene deposition with permeability reduction and wettability alteration / Y. Zhang, Q. Lin, A.Q. Raeini, Y. Onaka, H. Iwama, K. Takabayashi, M.J. Blunt, B. Bijeljic // Fuel. – 2022. – Vol. 316. – P. 123202.
4. On the evaluation of the performance of asphaltene dispersants / A.A. Melendez-Alvarez, M. Garcia-Bermudes, M. Tavakkoli, R.H. Doherty, S. Meng, D.S. Abdallah, F.M. Vargas // Fuel. – 2016. – Vol. 179. – P. 210–220.
5. Asphaltene content by the in-line filtration method / E. Rogel, C. Ovalles, J. Vien, M. Moir // Fuel. – 2016. – Vol. 171. – P. 203–209.

6. Asphaltene prevention and treatment by using nanomaterial: a comprehensive review / A. Talebi, M. Shafiei, Y. Kazemzadeh, M. Escrochi, M. Riazi // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. – Vol. 382. – P. 121891.
7. Hasanvand M.Z., Ahmadi M.A., Behbahani R.M. Solving asphaltene precipitation issue in vertical wells via redesigning of production facilities // *Petroleum*. – 2015. – Vol. 1. – № 2. – P. 139–145.
8. Bimuratkzy K., Sagindykov B. The review of flow assurance solutions with respect to wax and asphaltene // *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*. – 2016. – Vol. 10. – № 2. – P. 119–134.
9. Impacts of asphaltene deposition on oil recovery following a waterflood – a numerical simulation study / M. Carrera, M. Zarooni, O. Olayiwola, V. Nguyen, F. Boukadi // *SSRN*. – 2023. – Vol. 4508842.
10. Razavifar M., Qajar J., Riazi M. Experimental study on pore-scale mechanisms of ultrasonic-assisted heavy oil recovery with solvent effects // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 214. – P. 110553.
11. Effect of pressure on the optimal salinity point of the aqueous phase in emulsion formation / S. M. Shams, Y. Kazemzadeh, M. Riazi, F.B. Cortés // *Journal of Molecular Liquids*. – 2022. – Vol. 362. – P. 119783.
12. Asphaltene precipitation and deposition: a critical review / I. Mohammed, M. Mahmoud, D. Al Shehri, A. El-Husseiny, O. Alade // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 197. – P. 107956.
13. Ghamartale A., Zendejboudi S., Mohamadi-Baghmolaei M. Control of asphaltene deposition by chemical inhibitors in calcite pore: molecular dynamics approach // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2022. – Vol. 61. – № 31. – P. 11555–11567.
14. Asphaltene precipitation/deposition estimation and inhibition through nanotechnology: a comprehensive review / C.A. Guerrero-Martin, D. Montes-Pinzon, M. Meneses Motta da Silva, E. Montes-Paez, L.E. Guerrero-Martin, R. Salinas-Silva, S. Camacho-Galindo, E. Fernandes Lucas, A. Szklo // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 13. – P. 4859.
15. Characterizing asphaltene deposition in the presence of chemical dispersants in porous media micromodels / Y. Lin, P. He, M. Tavakkoli, N.T. Mathew, Y.Y. Fatt, J.C. Chai, A. Goharzadeh, F.M. Vargas, S.L. Biswal // *Energy & Fuels*. – 2017. – Vol. 31. – № 11. – P. 11660–11668.
16. Microwave-assisted petroporphyrin release from asphaltene aggregates in polar solvents / S. Fan, H. Liu, J. Wang, H. Chen, R. Bai, A. Guo, K. Chen, J. Huang, Z. Wang // *Energy & Fuels*. – 2020. – Vol. 34. – № 3. – P. 2683–2692.
17. Asphaltene prevention and treatment by using nanomaterial: a comprehensive review / A. Talebi, M. Shafiei, Y. Kazemzadeh, M. Escrochi, M. Riazi // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. – Vol. 382. – P. 121891.
18. Molecular dynamics simulation to investigate the effect of polythiophene-coated Fe₃O₄ nanoparticles on asphaltene precipitation / S. Tazikeh, J. Kondori, S. Zendejboudi, J.S. Amin, F. Khan // *Chemical Engineering Science*. – 2021. – Vol. 237. – P. 116417.
19. Mahmoudi B., Zare-Reisabadi M.R. Experimental study of temperature effect on onset pressure of asphaltene in live oil // *Petroleum & Coal*. – 2015. – Vol. 57. – № 4. – P. 346–352.
20. Experimental investigation and application of the asphaltene precipitation envelope / H. Lei, S. Yang, K. Qian, Y. Chen, Y. Li, Q. Ma // *Energy & Fuels*. – 2015. – Vol. 29. – № 11. – P. 6920–6927.
21. A review on methods of determining onset of asphaltene precipitation / A. Soleymanzadeh, M. Yousefi, S. Kord, O. Mohammadzadeh // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1375–1396.
22. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development and verification of a software module for predicting the distribution of wax deposition in an oil well based on laboratory studies // *Results in Engineering*. – 2022. – Vol. 16. – P. 100697.

Информация об авторах

Павел Юрьевич Илюшин, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. ilushin-pavel@yandex.ru

Кирилл Андреевич Вяткин, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. kirill.vyatkin@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3464-1493>

Антон Вадимович Козлов, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. anton.kozlov@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2350-2153>

Поступила в редакцию: 18.09.2023

Поступила после рецензирования: 28.10.2023

Принята к публикации: 06.11.2023

REFERENCES

1. Vyatkin K., Ilyushin P., Kozlov A. Forecasting the value of the linear pipeline cleaning interval based on the laboratory research. *International Review of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 294–300.
2. Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development of intelligent algorithms for controlling peripheral technological equipment of a well cluster using a single control station. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 59–68. (In Russ.)
3. Zhang Y., Lin Q., Raeini A.Q., Onaka Y., Iwama H., Takabayashi K., Blunt M.J., Bijeljic B. Pore-scale imaging of asphaltene deposition with permeability reduction and wettability alteration. *Fuel*, 2022, vol. 316, pp. 123202.
4. Melendez-Alvarez A.A., Garcia-Bermudes M., Tavakkoli M., Doherty R.H., Meng S., Abdallah D.S., Vargas F.M. On the evaluation of the performance of asphaltene dispersants. *Fuel*, 2016, vol. 179, pp. 210–220.
5. Rogel E., Ovalles C., Vien J., Moir M. Asphaltene content by the in-line filtration method. *Fuel*, 2016, vol. 171, pp. 203–209.

6. Talebi A., Shafiei M., Kazemzadeh Y., Escrochi M., Riazi M. Asphaltene prevention and treatment by using nanomaterial: a comprehensive review. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, vol. 382, pp. 121891.
7. Hasanvand M.Z., Ahmadi M.A., Behbahani R.M. Solving asphaltene precipitation issue in vertical wells via redesigning of production facilities. *Petroleum*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 139–145.
8. Bimuratkzy K., Sagindykov B. The review of flow assurance solutions with respect to wax and asphaltene. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 119–134.
9. Carrera M., Zarooni M., Olayiwola O., Nguyen V., Boukadi F. Impacts of asphaltene deposition on oil recovery following a waterflood – a numerical simulation study. *SSRN*, 2023, vol. 4508842.
10. Razavifar M., Qajar J., Riazi M. Experimental study on pore-scale mechanisms of ultrasonic-assisted heavy oil recovery with solvent effects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 214, pp. 110553.
11. Shams S.M., Kazemzadeh Y., Riazi M., Cortés F.B. Effect of pressure on the optimal salinity point of the aqueous phase in emulsion formation. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, vol. 362, pp. 119783.
12. Mohammed I., Mahmoud M., Al Shehri D., El-Husseiny A., Alade O. Asphaltene precipitation and deposition: a critical review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 197, pp. 107956.
13. Ghamartale A., Zendejboudi S., Mohamadi-Baghmolaei M. Control of asphaltene deposition by chemical inhibitors in calcite pore: molecular dynamics approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, vol. 61, no. 31, pp. 11555–11567.
14. Guerrero-Martin C.A., Montes-Pinzon D., Meneses Motta da Silva M., Montes-Paez E., Guerrero-Martin L.E., Salinas-Silva R., Camacho-Galindo S., Fernandes Lucas E., Szklo A. Asphaltene precipitation/deposition estimation and inhibition through nanotechnology: a comprehensive review. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 13, pp. 4859.
15. Lin Y., He P., Tavakkoli M., Mathew N.T., Fatt Y.Y., Chai J.C., Goharzadeh A., Vargas F.M., Biswal S.L. Characterizing asphaltene deposition in the presence of chemical dispersants in porous media micromodels. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31, no. 11, pp. 11660–11668.
16. Fan S., Liu H., Wang J., Chen H., Bai R., Guo A., Chen K., Huang J., Wang Z. Microwave-assisted petroporphyrin release from asphaltene aggregates in polar solvents. *Energy & Fuels*, 2020, vol. 34, no. 3, pp. 2683–2692.
17. Talebi A., Shafiei M., Kazemzadeh Y., Escrochi M., Riazi M. Asphaltene prevention and treatment by using nanomaterial: a comprehensive review. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, vol. 382, pp. 121891.
18. Tazikeh S., Kondori J., Zendejboudi S., Amin J.S., Khan F. Molecular dynamics simulation to investigate the effect of polythiophene-coated Fe₃O₄ nanoparticles on asphaltene precipitation. *Chemical Engineering Science*, 2021, vol. 237, pp. 116417.
19. Mahmoudi B., Zare-Reisabadi M.R. Experimental study of temperature effect on onset pressure of asphaltene in live oil. *Petroleum & Coal*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 346–352.
20. Lei H., Yang S., Qian K., Chen Y., Li Y., Ma Q. Experimental investigation and application of the asphaltene precipitation envelope. *Energy & Fuels*, 2015, vol. 29, no. 11, pp. 6920–6927.
21. Soleymanzadeh A., Yousefi M., Kord S., Mohammadzadeh O. A review on methods of determining onset of asphaltene precipitation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, pp. 1375–1396.
22. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development and verification of a software module for predicting the distribution of wax deposition in an oil well based on laboratory studies. *Results in Engineering*, 2022, vol. 16, pp. 100697.

Information about the authors

Pavel Yu. Ilyushin, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. ilushin-pavel@yandex.ru

Kirill A. Vyatkin, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. kirill.vyatkin@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3464-1493>

Anton V. Kozlov, Research Assistant, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. anton.kozlov@girngm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2350-2153>

Received: 18.09.2023

Revised: 28.10.2023

Accepted: 06.11.2023

УДК 622.276.66
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4372
Шифр специальности ВАК: 010201

Анализ результатов моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта

М.А. Ямкин^{1✉}, Е.У. Сафиуллина¹, А.В. Ямкин²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

² «ООО Газпром трансгаз Томск», Россия, г. Томск

✉ makson.yamkin@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена тем, что в настоящее время гидроразрыв пласта все чаще применяется в качестве метода интенсификации притока на «зрелых» месторождениях с высокой обводненностью скважин. Поэтому первоначальная эффективность гидроразрыва пласта, связанная с ростом добычи нефти, стремится к нулю, так как резко растет количество добываемой воды. При этом существуют скважины, в которых не наблюдался резкий рост обводненности после проведения гидроразрыва пласта, в связи с этим актуальной является проблема предсказания поведения величины обводненности скважины после проведения на ней гидроразрыва пласта. *Цель* данной работы заключается в создании модели, показывающей рост обводненности скважин при помощи функции Бакли–Лeverетта при известных параметрах гидроразрыва пласта в течение года после его проведения. *Объект:* модель роста величины обводненности скважины после проведения гидроразрыва пласта. *Методы:* моделирование обводненности скважин после проведения гидроразрыва пласта на языке программирования Python с использованием функции Бакли–Лeverетта с последующей оценкой сходимости смоделированных данных с фактическими данными, полученными с Ванкорского нефтегазового месторождения. *Результаты.* Показано, что в течение года обводненность плавно увеличивалась с 12 до 30 %. Сходимость смоделированных и фактических данных составила 98 %. *Заключение.* Создана модель для подсчета роста обводненности на скважине после проведения операции гидроразрыва пласта. Высокая сходимость смоделированных и фактических данных указывает на корректность применения функции Бакли–Лeverетта для подсчета роста обводненности на скважине после проведения операции гидроразрыва пласта.

Ключевые слова: приток нефти, гидроразрыв пласта, модель, обводненность, трещины гидроразрыва пласта

Для цитирования: Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У., Ямкин А.В. Анализ результатов моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 14–21. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4372

UDC 622.276.66
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4372

Analysis of the results of modeling fluid inflow to a hydraulic fracturing

M.A. Yamkin^{1✉}, E.U. Safiullina¹, A.V. Yamkin²

¹ St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

² «Gazprom transgaz Tomsk LLC», Tomsk, Russian Federation

✉ makson.yamkin@mail.ru

Abstract. Relevance. The fact that hydraulic fracturing is the efficient method for intensifying the inflow in "mature" fields. But, despite on its efficiency, it can cause unpredictable increase of water cut in a well. In this regard, the problem of predicting the behavior of the water cut in wells after hydraulic fracturing is topical. *Aim.* To create the model to predict the increase of water cut in well using the Buckley–Leverett function with known hydraulic fracturing parameters during the year after hydraulic fracturing. *Object.* Model of well water cut growth after hydraulic fracturing. *Methods.* Simulation of water cut in wells after hydraulic fracturing using the Python programming language, followed by an assessment of the convergence of the simulated data with actual data obtained from the Vankor oil and gas field. *Results.* It was shown that during the year the

water cut gradually increased from 10 to 31%. The convergence of the simulated and real data was 98%. **Conclusion.** A model has been created to predict the increase in water cut in a well after the hydraulic fracturing. The high convergence of the simulated and actual data indicates the correctness of the application of the Buckley–Leverett function to predict the increase in water cut in the well after the hydraulic fracturing.

Keywords: oil inflow, hydraulic fracturing, model, water cut, hydraulic fracturing fractures

For citation: Yamkin M.A., Safiullina E.U., Yamkin A.V. Analysis of the results of modeling fluid inflow to a hydraulic fracturing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 14–21. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4372

Введение

В настоящее время для увеличения нефтеотдачи часто используется гидроразрыв пласта (ГРП) [1–6]. Это связано с тем, что ГРП позволяет не только увеличить нефтеотдачу, но и интенсифицировать приток нефти. Это обеспечивает увеличение скорости добычи нефти и, как следствие, экономической эффективности месторождения [7]. При этом после проведения ГРП обводненность скважин может резко возрастать с 1 до 84 % либо плавно увеличиваться [1, 8]. В связи этим применение ГРП требует создания инструментов для прогнозирования обводненности после проведения данной операции [8–10]. Одним из таких инструментов является моделирование обводненности скважин. Целью настоящей работы являлось создание модели, показывающей рост обводненности скважин при помощи функции Бакли–Лeverетта, а также верификация разработанной модели путем сравнения результатов моделирования с фактическими данными роста обводненности после проведения ГРП, полученных с Ванкорского нефтегазового месторождения.

Актуальность

Ванкорское нефтегазовое месторождение находится в разработке с 2006 г. [2]. На данный момент на месторождении добывается нефть из нескольких эксплуатационных объектов: Дл I–III, Як I–VII, Сд IX, Нх-I, Нх-III–IX [2]. В связи с тем, что месторождение находится на третьей стадии разработки, на нем применяются различные методики увеличения нефтеотдачи для сохранения добычи нефти. В данной статье рассматривается применение технологии ГРП в качестве метода увеличения нефтеотдачи на Ванкорском месторождении. Данная технология по большей части применяется на эксплуатационном объекте Нх-I [2], поэтому в дальнейшем в статье будет рассматриваться только данный объект.

Как уже обозначалось выше, Ванкорское месторождение находится на третьей стадии разработки. Так как данная стадия характеризуется ростом обводненности, применение операции ГРП влечет за собой резкий рост доли добычи воды в общем газожидкостном потоке из-за неправильного дизайна ГРП и попадания трещины в водоносный горизонт. Поэтому для исследуемого пласта является акту-

альной задача прогнозирования кривой обводненности после проведения операции ГРП.

Основные геологические свойства и показатели разработки объекта Нх-I для обоснования возможности проведения операции ГРП на нем приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные геологические свойства и показатели разработки [1, 3]

Table 1. Main geological properties and development indicators [1, 3]

Параметр/Parameter	Значение/Value
Пористость/Porosity, %	19
Проницаемость, мкм ² Permeability, mcm ²	0,001
Расчлененность Dismemberment	3,6
Горная порода Rock	Алевролит и аргиллит с глинистыми прослойками Siltstone and mudstone with clay interlayers
Текущая обводненность Current water cut, %	13,02

Анализируя табл. 1, можно сделать следующие выводы по эксплуатационному объекту:

1. Объект обладает низкой проницаемостью, поэтому необходимо применение методов увеличения нефтеотдачи, которые будут улучшать проницаемость объекта. С учетом работы [1] наиболее подходящими представляются технологии ГРП, а также обработка призабойной зоны пласта кислотой.
2. Невысокое значение обводненности делает возможным применение технологии ГРП [7].
3. Наличие глинистых пропластков, затрудняющих разработку месторождения, в силу отсутствия единой гидродинамической связи, также делает применение технологии ГРП наиболее подходящим методом для увеличения нефтеотдачи.

С учетом обозначенных выше факторов применение ГРП как метода увеличения нефтеотдачи на данном эксплуатационном объекте является оптимальным.

Однако проведение технологии ГРП сопряжено с высокими операционными затратами, поэтому необходим точный расчет данной операции. В него входит оценка экономической эффективности данной процедуры. В соответствии с работами [11, 12] сразу после проведения ГРП резко возрастает дебит нефти при правильном дизайне трещины. Однако со временем эффективность проведенной операции может снижаться из-за многих факторов, в том числе из-за резкого роста обводненности. Поэтому для правильной оценки экономической эффективности данного метода необходимо прогнозирование кривой обводненности.

Существует несколько моделей расчета добычи нефти на месторождении, которые описаны в работах [13, 14]. В данной статье рассматривается расчет добычи нефти на год после проведения операции ГРП, а из него расчет обводненности добываемой продукции с допущением того, что общий дебит добываемой жидкости не меняется с момента проведения операции ГРП. Этот расчет будет производиться при помощи методики Баклея–Левретта [15, 16]. Далее авторами приводится краткое описание модели расчета движения жидкости по Баклею–Левретту.

Методика Баклея–Левретта описывает фильтрацию двух несмешивающихся жидкостей (вода и нефть) с помощью системы дифференциальных уравнений, выражающих закон сохранения массы [16]. Согласно данной модели делается допущение, что в системе двух жидкостей и горной породы отсутствуют капиллярные силы. Указанное допущение можно сделать для данного месторождения, поскольку рассматриваемый эксплуатационный объект обладает большой пористостью, согласно классификации П.П. Авдусина и М.А. Цветковой [17]. Кроме этого, методика Баклея–Левретта предполагает следующие допущения [16]:

- постоянная пористость пласта;
- постоянная плотность рассматриваемых жидкостей;
- постоянная вязкость рассматриваемых жидкостей;
- пористая среда плоская и не деформируемая.

Методы исследования

Профиль добываемой жидкости после проведения операции ГРП рассчитывался при помощи методики Баклея–Левретта. Подробно данная методика описана в [16, 18], поэтому в данной статье оно не приводится. Допущения, которые делаются при использовании данной модели, описаны выше.

Для моделирования была выбрана скважина № 119 с одностадийным ГРП на Ванкорском месторождении. Анализируемая скважина была вы-

брана по причине наиболее полных доступных по ней данных. Данные, необходимые для расчета профиля добычи по методике Баклея–Левретта, представлены в табл. 2 и на рис. 1.

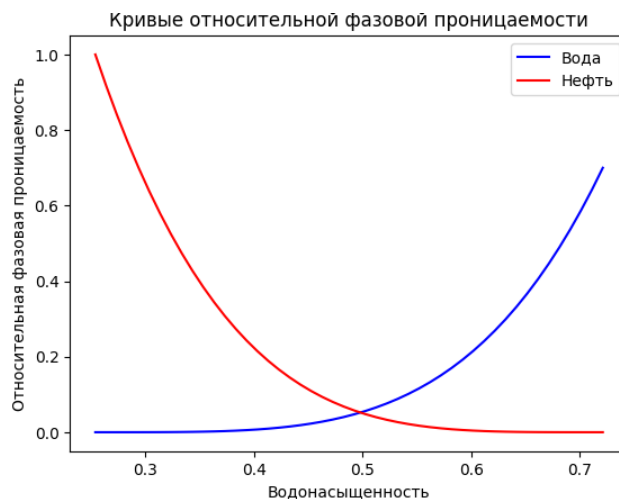


Рис. 1. Кривые относительной фазовой проницаемости
Fig. 1. Relative permeability curves

Данные для построения кривых относительной фазовой проницаемости были сгенерированы при помощи программного комплекса tNavigator с использованием корреляции Кори в соответствии с работами [19–21]. Далее численные данные были экспортированы в MS Excel и анализировались при помощи средств языка программирования Python.

Таблица 2. Входные данные для прогнозирования обводненности после ГРП [1, 3]

Table 2. Input data for predicting water cut after hydraulic fracturing [1, 3]

Параметр Parameter	Значение Value
Расстояние между скважинами, м Distance between wells, m	500,000
Вязкость нефти, мПа*с/Oil viscosity, mPa*s	0,700
Вязкость воды, мПа*с/Water viscosity, mPa*s	0,570
Коэффициент охвата/Coverage ratio	0,852
Пористость, д.ед./Porosity, units	0,190
Эффективная толщина пласта, м Effective formation thickness, m	6,900

Вычисление производилось по формулам, представленным в работе [15].

На первом этапе производилось построение функции Баклея–Левретта в соответствии с формулой (1):

$$f(S) = \frac{K_B(S)}{K_B(S) + \frac{\mu_B}{\mu_H} K_H(S)}, \quad (1)$$

где $f(S)$ – функция Баклея–Левретта; $K_b(S)$ – зависимость относительной проницаемости по воде от водонасыщенности; $K_n(S)$ – зависимость относительной проницаемости по нефти от водонасыщенности; μ_b – вязкость воды, мПа·с; μ_n – вязкость нефти, мПа·с; S – водонасыщенность, д. ед.

Для построения функции Баклея–Левретта зависимости $K_b(S)$ и $K_n(S)$ были аппроксимированы уравнениями 3 и 4 степени. Численные значения относительной проницаемости, которые аппроксимировались, как уже было описано выше, были получены при помощи корреляции Кори. После этого полученные уравнения были подставлены в уравнение (1) и построена кривая, представленная на рис. 2.

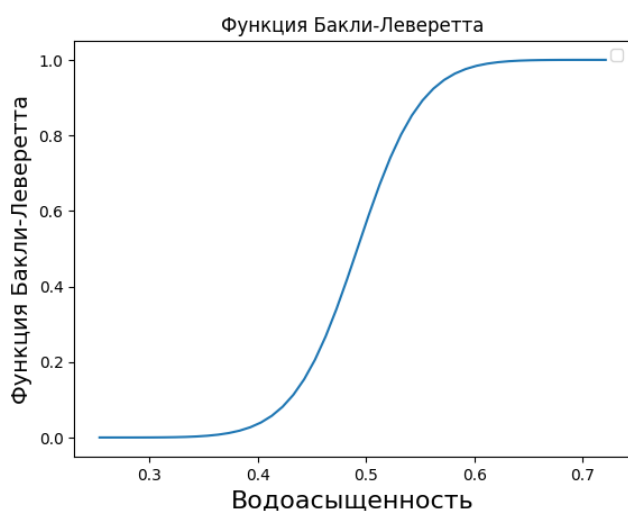


Рис. 2. Функция Баклея–Левретта
Fig. 2. Buckley–Leverett function

Далее к построенной кривой проводилась касательная из точки, соответствующей значению насыщенности связанной воды. Поиск точки касания производился методами Ньютона в соответствии с работой [22] и половинного деления отрезков в соответствии с работой [23].

Далее производился расчет времени добычи нефти, за которое обводненность не будет менять свое значение, в соответствии с работой [15] по формуле (2):

$$t^* = \frac{V_{\text{п}}}{q \cdot f'(S_b)} = \frac{m \cdot \pi \cdot h \cdot r_k^2}{q \cdot f'(S_b)}, \quad (2)$$

где t^* – время безводного периода добычи нефти, сут; $V_{\text{п}}$ – объем пор пласта, охваченных заводнением, м³; m – пористость, д. ед.; h – охваченная заводнением толщина пласта, м; r_k – радиус контура питания, м; $f'(S_b)$ – значение производной функции Бакли–Левретта в точке водонасыщенности на фронте вытеснения водой; q – дебит нефти после проведения ГРП, т/сут.

Далее производился расчет следующих показателей: обводненность продукции, суточная добыча нефти и воды.

Расчет обводненности производился в соответствии с работой [15] по формуле (3):

$$\frac{f'(S)}{f'(S_b)} = \frac{t^*}{t}, \quad (3)$$

где $f'(S)$ – значение производной функции Баклея–Левретта в момент времени t , сут.

Далее задавался период времени t , который в данной статье составил год. Затем это время было разделено на равные промежутки, и по этим значениям находились значения производной $f'(S)$, далее находились значения водонасыщенности в этих точках. По ним определялись значения функции Баклея–Левретта, показывающие обводненность продукции.

Далее, в соответствии с работой [15], находилась суточная добыча нефти по формуле (4):

$$q_n = q \cdot (1 - \beta). \quad (4)$$

Затем, в соответствии с работой [12], находилась суточная добыча воды по формуле (5):

$$q_b = q \cdot \beta. \quad (5)$$

Сходимость полученных результатов оценивалась в соответствии с работой [23] по формуле (6):

$$x = \left(1 - \frac{\beta_{\text{реальн}} - \beta_{\text{расч}}}{\beta_{\text{реальн}}}\right) * 100\%, \quad (6)$$

где x – сходимость практических и смоделированных значений, %; $\beta_{\text{реальн}}$ – реальная обводненность, д. ед.; $\beta_{\text{расч}}$ – расчетная обводненность по всем скважинам, д. ед.

Результаты

В табл. 3 представлены значения, необходимые для дальнейших расчетов показателей обводненности, безводного периода добычи нефти, добычи нефти и воды элемента по суткам. Данные значения были получены графо-аналитическим способом.

Таблица 3. Расчет показателей для решения задачи прогнозирования обводненности

Table 3. Calculation of indicators for solving the problem of forecasting water cut

Параметр Parameter	Значение Value
Значение функции Бакли–Левретта в точке водонасыщенности на фронте Value of the Buckley–Leverett function at the water saturation point at the front	0,43
Водонасыщенность на фронте вытеснения водой Water saturation at the water displacement front	0,48
Значение производной функции Бакли–Левретта в точке водонасыщенности на фронте Value of the derivative of the Buckley–Leverett function at the water saturation point at the front	1,89

По формуле (2) рассчитывалось значение t^* , которое составило 25 суток. Далее производился расчет обводненности на следующий год. График обводненности на данный период представлен на рис. 3.

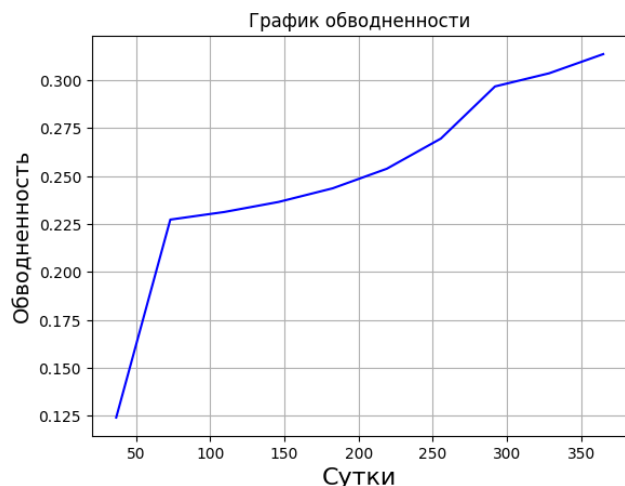


Рис. 3. Обводненность после проведения ГРП

Fig. 3. Water cut after hydraulic fracturing

Графики суточной добычи нефти и воды после проведения ГРП представлены на рис. 4, 5.

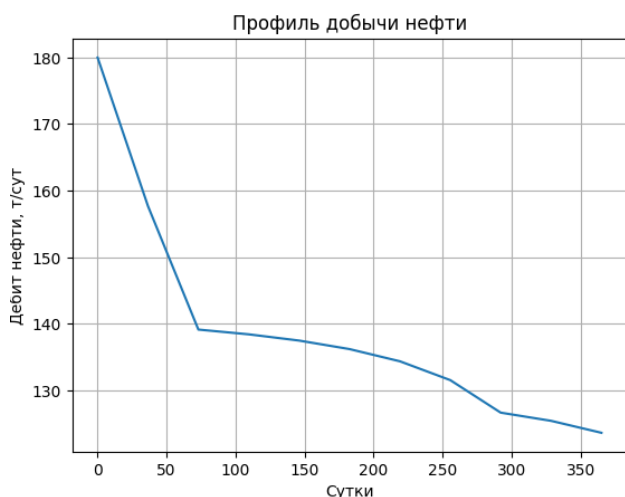


Рис. 4. График добычи нефти после проведения ГРП

Fig. 4. Oil production schedule after hydraulic fracturing

Также в данной работе суммированием добычи нефти элемента за промежутки времени, на которые был разделен год, было рассчитано, сколько тонн нефти будет добыто из скважины после проведения ГРП. Эта величина составила 1358 т за исследуемый промежуток времени. Расчет не приводится.

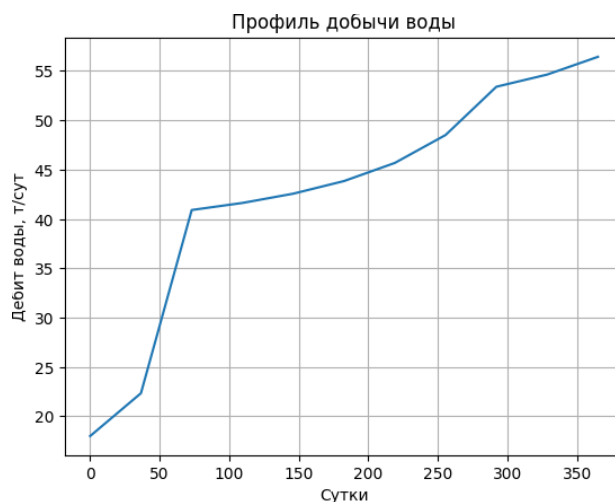


Рис. 5. График добычи воды после проведения ГРП

Fig. 5. Water production schedule after hydraulic fracturing

Обсуждение

В данной работе рассматривалась применимость оценки обводненности добываемой жидкости после проведения ГРП при помощи метода Баклея–Лeverетта. Применимость оценивалась при помощи сравнения данных, полученных прогнозированием обводненности при помощи метода Баклея–Лeverетта, и данных с Ванкорского месторождения.

В табл. 4 представлены фактические данные по обводненности добываемой жидкости после проведения ГРП, полученные с 119 скважины [2], данные, которые были получены при помощи модели, созданной авторами, а также сходимость данных, рассчитанная по формуле (6).

Таблица 4. Сравнение расчетных и практических показателей обводненности [2]

Table 4. Comparison of calculated and practical indicators of water cut [2]

Сутки Days	Фактические данные Real data	Данные, полученные моделированием Simulation data	Сходимость Convergence
0	0,12	0,12	100,00
36,5	0,12	0,13	98,87
73	0,23	0,19	95,42
109,5	0,23	0,22	98,53
146	0,24	0,24	99,61
182,5	0,24	0,25	98,57
219	0,25	0,27	98,33
255,5	0,27	0,28	99,15
292	0,30	0,28	98,21
328,5	0,30	0,29	98,22
365	0,31	0,30	97,67

В табл. 4 показано, что максимальное расхождение построенной модели и реальных данных видно на 73 сутках. Также необходимо отметить, что если сравнивать общую добычу за год, то сходимость расчетной и реальной обводненности составила 98 %. Таким образом, несмотря на допущения, которые в себя включает методика Баклея–Лeverетта, она показывает высокую сходимость с фактическими данными. Для более точной оценки построенной модели планируется смоделировать и сравнить большее количество скважин, что является темой дальнейших исследований. Необходимо отметить, что для некоторых месторождений и эксплуатационных объектов допущения, которые включает в себя данная модель, могут быть неприменимы. Например, в соответствии с работой [13], для эксплуатационных объектов с низкой проницаемостью, в которых капиллярные силы будут оказывать большое влияние на движение жидкости, модель может показывать более низкую сходимость. По мнению авторов, для решения данной проблемы целесообразно использовать более общие подходы, которые не зависят от коллекторских свойств эксплуатационного объекта [24, 25]. В частности, в соответствии с работой [26] можно использовать методики машинного обучения для предсказания обводненности через определенный промежуток времени. Данная задача является задачей предсказания временных рядов [26].

Однако, несмотря на то, что разработанная авторами модель показывает высокую сходимость не на всех эксплуатационных объектах, данная модель может применяться для приблизительной оценки обводненности скважин. Кроме этого, разработанная модель показывает высокую сходимость на тех эксплуатационных объектах, фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) которых похожи на ФЕС рассматриваемого объекта [1, 3]. В связи с этим разработанная модель может использоваться для точного прогнозирования обводненности на объектах, коллекторские свойства которых совпадают с теми, которыми обладает рассматриваемый объект, а также для приблизительной оценки обводненности для объектов, коллекторские свойства которых сильно отличаются от тех, которыми обладает рассматриваемый объект.

Заключение

Построенная модель прогнозирования обводненности после проведения ГРП обладает хорошей сходимостью, которая составляет 98 %, и является применимой для прогнозирования обводненности на объектах со схожими эксплуатационными свойствами Нх-І Ванкорского месторождения, приведенными в работе [1, 3]. Кроме этого, полученные результаты указывают на то, что методика Баклея–Лeverетта является применимой для оценки обводненности после проведения ГРП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безверхая Е.В., Носов С.А. Повышение продуктивности скважин на примере Ванкорского месторождения (Красноярский край). – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2003. – 76 с.
2. Архитектура цифровых решений управления режимами эксплуатации скважин в задачах эффективной разработки зрелых месторождений нефти / Л.С. Бриллиант, М.Р. Дулкарнаев, М.Ю. Данько, А.О. Елишева, О.В. Цинкевич // Недропользование XXI век. – 2020. – № 4 (87). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43940057> (дата обращения 28.08.2023).
3. Арестов А.А. Пути оптимизации разработки месторождений на поздней стадии эксплуатационного цикла // Проблемы геологии и освоения недр: Материалы XXVII Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященного 160-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 140-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. – Томск: ТПУ, 2022. – С. 34–35.
4. Возможности учета трещиноватости каширно-верейских карбонатных объектов при планировании пропантного гидроразрыва пласта / А.С. Вотинов, В.В. Середин, И.Ю. Колычев, С.В. Галкин // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 861–871.
5. Григорьев Г.С., Салищев М.В., Сенчина Н.П. О применимости способа электромагнитного мониторинга гидроразрыва пласта // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 492–500.
6. Босиков И.И., Ключев Р.В., Майер А.В. Комплексная оценка эффективности технологии гидравлического разрыва пласта для проведения скважин при добыче углеводородов // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 1018–1025.
7. Анализ и перспективы эффективной разработки Ванкорского месторождения / Т.В. Всеволодов, М.В. Липаев, Р.Р. Мукуминов, М.С. Сасина, Е.В. Егорова // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Астрахань: АГТУ, 2021. – С. 11–16.
8. Соловьева В.Н., Усольцев А.Г., Соловьев И.Б. Необходимый дополнительный критерий выбора объекта для проведения ГРП // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2009. – № 6. – С. 26–29.
9. Gabdrakhmanova K.F., Izmaylova G.R., Samigullina L.Z. Probabilistic statistical model for predicting the effectiveness of hydraulic fracturing // International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons. Materials: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tyumen: IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 952. – P. 1–7.
10. Karpikov A.V., Aliev R.I., Babyr N.V. An analysis of the effectiveness of hydraulic fracturing at YS1 of the Northern field // International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons. Materials: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Irkutsk: IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 952. – P. 1–6.

11. A review of hydraulic fracturing simulation / B. Chen, B. Ramos Barboza, Ya. Sun, Jie Bai, R.Th. Hywel, M. Dutko, M. Cottre, Ch. Li // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2022. – № 29. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-021-09653-z> (дата обращения 28.08.2023).
12. Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У. Оценка соответствия результатов компьютерного моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта реальным данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 210–217.
13. Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network model / Yongfei Yang, Ke Wang, Lei Zhang, Hai Sun, Kai Zhang, Jingsheng Ma // Fuel. – 2019. – Vol. 251. – P. 683–692.
14. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с.
15. Максютин А.В. Подземная гидромеханика: методические указания к выполнению курсовой работы. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. – 90 с.
16. Ахметзянов А.В., Кушнер А.Г., Лычагин В.В. Оптимальное управление разработкой нефтяных месторождений в модели Бакли–Левретта // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 4. – С. 75–91.
17. Колеанов В.И. Об изучении и квалификаций коллекторов // Геология нефти и газа. – 1957. – № 2. – С. 26–40.
18. Mamedov I.J. Development of approximate methods for determination of stability in displaced and displacing systems with different rheophysical properties // Series of Physical-technical and mathematical sciences. – 2021. – № 41 (8). URL: <https://transmech.imm.az/volumes/44> (дата обращения 29.08.2023).
19. Lomeland F., Ebeltoft E., Wibeke Hammervold Th. A new versatile relative permeability correlation // Conference: SCA Symposium. – Toronto: ResearchGate, 2005. – Vol. SCA2005-32.
20. Farshid Torabi, Nader Mosavat, Ostap Zarivnyu. Predicting heavy oil/water relative permeability using modified Corey-based correlations // Fuel. – 2016. – Vol. 163. – P. 196–204.
21. Plokhonnikov S.P., Eliseenkov V.V. Hydrodynamic calculations of layered seams on the basis of modified relative permeabilities // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2001. – Vol. 42. – P. 833–838.
22. Господариков А.П. Разработка нелинейных математических моделей и численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Записки Горного института. – 2016. – Т. 219. – С. 382–386.
23. Сушков Д.Р. Программная реализация численного решения нелинейных уравнений методом половинного деления. – М.: Инновационные технологии в математическом образовании: молодежная парадигма, 2022. – 175 с.
24. Efficient use of data analytics in optimization of hydraulic fracturing in unconventional reservoirs / C. Temizel, S. Purwar, A. Abdullayev, K. Urrutia, A. Tiwari // International Petroleum Exhibition and Conference. – Abu Dhabi: OnePetro, 2015. – № SPE-177549-MS.
25. Numerical study on erosion behavior of sliding sleeve ball seat for hydraulic fracturing based on experimental data / Xuan-Li Zhou, Yan-Bao Guo, Qiu-Ju Xie, De-Guo Wang, Hyun C. Yoon // Petroleum Science. – 2023. – Vol. 20. – P. 515–525.
26. Real-time hydraulic fracturing pressure prediction with machine learning / Y. Ben, M. Perrotte, M. Ezzatabadipour, I. Ali, S. Sankaran, C. Harlin, D. Cao // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. – Texas: OnePetro, 2020. – № SPE-199699-MS.

Информация об авторах

Максим Александрович Ямкин, студент, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я лин. В.О., 2. makson.yamkin@mail.ru

Елена Улубековна Сафиуллина, кандидат технических наук, доцент, кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я лин. В.О., 2. safiullinaeu@yandex.ru

Александр Владимирович Ямкин, заместитель начальника технического отдела «ООО Газпром транс-газ Томск», Россия, 634029, г. Томск, пр. Фрунзе, 9. A.Yamkin@gtt.gazprom.ru

Поступила в редакцию: 14.09.2023

Поступила после рецензирования: 28.09.2023

Принята к публикации: 14.02.2024

REFERENCES

1. Bezverkhaya E.V., Nosov S.A. *Increasing well productivity on the example of the Vankor field (Krasnoyarsk Territory)*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2016. 76 p. (In Russ.)
2. Brilliant L.S., Dulkarnayev M.R., Danko M.Yu., Elisheva A.O., Tsinkevich O.V. Architecture of digital solutions for controlling well operation modes in efficient development of mature oil fields. *Nedropolzovanie XXI vek*, 2020, no. 4 (87). (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43940057> (accessed 28 August 2023).
3. Arestov A.A. Ways to optimize field development at the late stage of the operational cycle. *Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXVII International Youth Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov, dedicated to the 160th anniversary of the birth of Academician V.A. Obruchev and the 140th anniversary of Academician M.A. Usov, the founders of the Siberian Mining and Geological School*. Tomsk, TPU Publ., 2022. pp. 34–35. (In Russ.)
4. Votinov A.S., Seredin V.V., Kolychev I.Yu., Galkin S.V. Possibilities of taking into account the fracturing of Kashirno-Vereya carbonate objects in the planning of proppant hydraulic fracturing. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 252, pp. 861–871. (In Russ.)

5. Grigoriev G.S., Salishchev M.V., Senchina N.P. About the applicability of the method of electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 492–500. (In Russ.)
6. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Mayer A.V. Comprehensive assessment of the effectiveness of hydraulic fracturing technology for drilling wells in the production of hydrocarbons. *Notes of the Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 1018–1025. (In Russ.)
7. Vsevolodov T.V., Lipaev M.V., Mukminov R.R., Sasina M.S., Egorova E.V. Analysis and prospects for the effective development of the Vankor field. *The latest technologies for the development of hydrocarbon deposits and ensuring the safety of the ecosystems of the Caspian shelf. Proc. of the XII International Scientific and Practical Conference*. Astrakhan, AGTU Publ., 2021. pp. 11–16. (In Russ.)
8. Solovieva V.N., Usoltsev A.G., Solovyov I.B. Necessary additional criterion for selecting an object for hydraulic fracturing. *Construction of oil and gas wells onshore and offshore*, 2009, no. 6, pp. 26–29. (In Russ.)
9. Gabdrakhmanova K.F., Izmaylova G.R., Samigullina L.Z. Probabilistic statistical model for predicting the effectiveness of hydraulic fracturing. *International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons. Proc. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tyumen, IOP Publishing Ltd., 2020. Vol. 952, pp. 1–7.
10. Karpikov A.V., Aliev R.I., Babyr N.V. An analysis of the effectiveness of hydraulic fracturing at YS1 of the Northern field. *International Conference on Extraction, Transport, Storage and Processing of Hydrocarbons. Proc. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Irkutsk, IOP Publishing Ltd., 2020. Vol. 952, pp. 1–6.
11. Chen B., Ramos Barboza B., Sun Y., Bai J., Hywel R.Th., Dutko M., Cottre M., Li Ch. A review of hydraulic fracturing simulation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, no. 29. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-021-09653-z> (accessed 28 August 2023).
12. Yamkin M.A., Safiullina E.U. Estimation of compliance of the results of computer simulation of fluid inflow to the fracture of hydraulic fracturing with real data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 210–217. (In Russ.)
13. Yongfei Yang, Ke Wang, Lei Zhang, Hai Sun, Kai Zhang, Jingsheng Ma. Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network. *Fuel*, 2019, vol. 251, pp. 683–692.
14. Mishchenko I.T. *Well oil production*. Moscow, «Neft i gaz» RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2003. 816 p. (In Russ.)
15. Maksyutin A.V. *Underground hydromechanics: guidelines for course work*. St. Petersburg, National Mineral Resources University «Gornyy» Publ., 2016. 90 p. (In Russ.)
16. Akhmetzyanov A.V., Kushner A.G., Lychagin V.V. Optimal control of oil field development in the Buckley–Leverett model. *Automation and telemechanics*, 2018, no. 4, pp. 75–91. (In Russ.)
17. Koleanov V.I. About the study and qualifications of collectors. *Geology of oil and gas*, 1957, no. 2, pp. 26–40. (In Russ.)
18. Mamedov I.J. Development of approximate methods for determination of stability in displaced and displacing systems with different rheophysical properties. *Series of Physical-technical and mathematical sciences*, 2021, no. 41 (8). Available at: <https://transmech.imm.az/volumes/44> (accessed 29 August 2023).
19. Lomeland F., Ebeltoft E., Wibeke Hammervold Th. A new versatile relative permeability correlation. *Conference: SCA Symposium*. Toronto, ResearchGate Publ., 2005. Vol. SCA2005-32.
20. Farshid Torabi, Nader Mosavat, Ostap Zarivnyy. Predicting heavy oil/water relative permeability using modified Corey-based correlations. *Fuel*, 2016, vol. 163, pp. 196–204.
21. Plokhonnikov S.P., Eliseenkov V.V. Hydrodynamic calculations of layered seams on the basis of modified relative permeabilities. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, pp. 833–838.
22. Gospodarikov A.P. Development of nonlinear mathematical models and numerical modeling of the prediction of the stress-strain state of a rock mass. *Notes of the Mining Institute*, 2016, vol. 219, pp. 382–386. (In Russ.)
23. Sushkov D.R. *Software implementation of the numerical solution of nonlinear equations by the bisection method*. Moscow, Innovative Technologies in Mathematical Education: Youth Paradigm Publ., 2022. 175 p. (In Russ.)
24. Temizel S., Purwar A., Abdullayev K., Urrutia Aditya Tiwari. Efficient use of data analytics in optimization of hydraulic fracturing in unconventional reservoirs. *SPE International Petroleum Exhibition and Conference*. Abu Dhabi, OnePetro Publ., 2015. No. SPE-177549-MS.
25. Xuan-Li Zhou, Yan-Bao Guo, Qiu-Ju Xie, De-Guo Wang, Hyun C. Yoon. Numerical study on erosion behavior of sliding sleeve ball seat for hydraulic fracturing based on experimental data. *Petroleum Science*, 2023, vol. 20, pp. 515–525.
26. Ben Yu., Perrotte M., Ezzatabadipour M., Ali I., Sankaran S., Harlin C., Cao D. Real-time hydraulic fracturing pressure prediction with machine learning. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*. Texas, OnePetro Publ., 2020. No. SPE-199699-MS.

Information about the authors

Maxim A. Yamkin, Student, St. Petersburg Mining University, 2, V.O. 21st line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. makson.yamkin@mail.ru

Elena U. Safiullina, Cand. Sc., Associate Professor, St. Petersburg Mining University, 2, V.O. 21st line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. safiullinaeu@yandex.ru

Alexander V. Yamkin, Deputy Head of Technical Department, «Gazprom transgaz Tomsk LLC», 9, Frunze avenue, Tomsk, 634029, Russian Federation. A.Yamkin@gtt.gazprom.ru

Received: 14.09.2023

Revised: 28.09.2023

Accepted: 14.02.2024

УДК 661.665.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4513
Шифр специальности ВАК: 2.4.4

Искровое плазменное спекание объемных материалов на основе SiC из углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи

И.И. Шаненков^{1,2}, Д.С. Никитин², А. Насырбаев², А.И. Циммерман²✉,
Ю.Л. Шаненкова², А.В. Власов², А.Я. Пак², А.С. Сайгаш²

¹ Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ alextsimmer@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования связана с поиском путем полезного использования углеродистых остатков термической переработки рисовой шелухи, которые из-за высокого содержания кремния в неорганической части потенциально могут быть применены для получения карбида кремния – важного функционального материала для различных областей науки и техники. Полезная утилизация такого рода отходов позволит не только решить экологическую проблему, связанную с их неэффективным использованием и захоронением, но и получить полезные продукты в виде объемных керамических изделий на основе карбида кремния. *Цель:* получить объемные изделия на основе SiC из углеродистых остатков термической переработки рисовой шелухи методом искрового плазменного спекания с минимальным количеством дополнительных этапов обработки исходного сырья. *Объекты:* объемные изделия на основе SiC, полученные с использованием углеродистых остатков термической переработки рисовой шелухи. Образцы получены методом искрового плазменного спекания при температуре 1800 °С, давлении 60 МПа и времени выдержки 10 минут. *Методы:* искровое плазменное спекание; рентгеновская дифрактометрия (рентгенофазовый анализ); сканирующая электронная микроскопия; безвакуумный электродуговой метод синтеза. *Результаты.* Проведены экспериментальные исследования по оценке возможности прямого использования углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи в качестве прекурсора для синтеза карбида кремния в объемном (керамика) и дисперсном (порошок) виде. Реализована серия экспериментов по искровому плазменному спеканию углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи в исходном и размолотом виде, с добавками кварцевого песка SiO₂, а также с использованием порошков на основе карбида кремния, синтезированных из углеродистого остатка безвакуумным электродуговым методом. Последний осуществляется в ходе одностадийного быстропотекающего процесса в воздушной среде и не требует применения системы вакуумирования. С его помощью получены дисперсные продукты с содержанием карбида кремния свыше 60 мас. %. Предварительные результаты продемонстрировали возможность получения объемных изделий и дисперсных порошков на основе карбида кремния с содержанием не менее 50 и 60 мас. %, соответственно, и свидетельствуют о перспективах дальнейшего повышения фазовой чистоты за счет оптимизации процессов искрового плазменного спекания и безвакуумного электродугового синтеза.

Ключевые слова: карбид кремния, искровое плазменное спекание, объемные материалы, углеродистый остаток, дуговой плазменный разряд, безвакуумный синтез

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0011). В работе применялось оборудование ЦКП НМНТ ТПУ.

Для цитирования: Искровое плазменное спекание объемных материалов на основе SiC из углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи / И.И. Шаненков, Д.С. Никитин, А. Насырбаев, А.И. Циммерман, Ю.Л. Шаненкова, А.В. Власов, А.Я. Пак, А.С. Сайгаш // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 22–33. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4513

UDC 661.665.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4513

Spark plasma sintering of SiC-based bulk materials from carbonaceous residue of rice husk thermal processing

I.I. Shanenkov^{1,2}, D.S. Nikitin², A. Nassyrbayev², A.I. Tsimmerman²✉,
Yu.L. Shanenkova², A.V. Vlasov², A.Ya. Pak², A.S. Saigash²

¹ Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉alextsimmer@yandex.ru

Abstract. Relevance. The search for a useful application of carbonaceous residues of rice husks thermal processing. These residues due to high silicon content in the inorganic part can potentially be used to produce silicon carbide – an important functional material for various fields of science and technology. Useful utilization of this waste will allow not only solving the environmental problem associated with their inefficient application and formal disposal, but also obtaining value-added products in the form of SiC-based ceramics. **Aim.** To obtain SiC-based bulk products from carbonaceous residues of rice husk thermal processing by spark plasma sintering with a minimum number of additional stages of feedstock processing. **Objects.** SiC-based bulk products obtained using carbonaceous residues of rice husk thermal processing. The samples were obtained by spark plasma sintering at 1800°C, pressure of 60 MPa and holding time of 10 minutes. **Methods.** Spark plasma sintering; X-ray diffractometry (X-ray phase analysis); scanning electron microscopy; vacuumless arc discharge synthesis method. **Results.** The authors have carried out the experimental studies to assess the possibility of applying carbonaceous residue of rice husk thermal processing as a precursor for the synthesis of silicon carbide in bulk (ceramics) and dispersed (powder) forms. A series of experiments on spark plasma sintering of carbonaceous residue from rice husk thermal processing in the initial and milled form, with SiO₂ silica sand additives, as well as with the use of silicon carbide powders synthesized from carbonaceous residue by vacuumless arc discharge method were implemented. The latter is performed within a one-stage fast-flowing process in an air environment and does not require the use of a vacuum system. Preliminary results demonstrated the possibility of obtaining bulk products and dispersed powders based on silicon carbide with a content of at least 50 and 60 wt %, respectively, and indicate the prospects of further increasing phase purity by optimizing spark plasma sintering and vacuumless arc discharge synthesis.

Keywords: silicon carbide, spark plasma sintering, bulk materials, carbonaceous residue, arc discharge plasma, vacuumless synthesis

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSWW- 2023-0011). The research was carried out using the equipment of the CSU NMNT TPU.

For citation: Shanenkov I.I., Nikitin D.S., Nassyrbayev A., Tsimmerman A.I., Shanenkova Yu.L., Vlasov A.V., Pak A.Ya., Saigash A.S. Spark plasma sintering of SiC-based bulk materials from carbonaceous residue of rice husk thermal processing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 22–33. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4513

Введение

Керамические материалы в виде оксидов, карбидов, боридов и нитридов зарекомендовали себя в многочисленных сферах промышленности, в особенности при работе в экстремальных условиях эксплуатации, при повышенных температурах, механическом, химическом и радиационном воздействии [1–3]. Среди ряда керамических материалов выделяется карбид кремния (SiC), который обладает совокупностью таких выдающихся свойств, как высокая твердость, низкая плотность, хорошая износостойкость, химическая стабильность при высоких температурах, высокая температура плавления и теплопроводность, а также низкий коэффи-

циент теплового расширения [4]. По этой причине SiC на протяжении многих лет привлекает внимание исследователей и используется в различных областях производства, от абразивных материалов, износостойкой и жаростойкой керамики до радиационностойких композитов и различных видов биоматериалов и биокерамики [5–7]. Кроме того, карбид кремния является перспективным полупроводниковым материалом, на основе которого возможно изготовление устройств силовой и высоко-температурной электроники [8].

Различные структуры SiC привлекли большое внимание благодаря своим превосходным характеристикам и большому потенциалу применения [9].

Микро- и наноразмерные частицы SiC применяются в качестве армирующего компонента для керамических, металлических и композиционных материалов для улучшения износостойкости, твердости, прочности и ударной вязкости изделий [10, 11]. Кроме того, известно, что структуры на основе SiC активно используются в каталитических приложениях, например, в качестве материала-носителя для электрокатализаторов в прямых метанольных топливных элементах [12, 13].

В силу актуальности применения различных структур карбида кремния в многочисленных областях науки и техники используются разнообразные техники и подходы. Для синтеза частиц SiC сегодня задействованы такие методы, как высокоэнергетический помол в шаровой мельнице [14], химическое травление [15], синтез в процессе горения [16], карботермическое восстановление [17], золь-гель метод [18], импульсная лазерная абляция [19], химическое осаждение из паровой среды [20], плазмохимические методы [21, 22]. При всем обилии разнообразных техник для синтеза карбида кремния существует проблема полноценного использования уникальной совокупности физических характеристик SiC вследствие сложности получения качественных нано- и микроструктур, загрязнений и грубой дисперсности получаемого продукта, энергозатратности и многостадийности используемых методик [23]. В связи с этим фундаментальной научной задачей является разработка новых подходов для получения карбида кремния [24].

Среди представленных выше подходов выделяются методы, направленные на получение частиц карбида кремния при использовании в качестве прекурсоров отходов различных областей промышленности, в том числе электронной промышленности, сельского хозяйства и т. д., в силу экологичности данного подхода. Многие подходы основаны на использовании различных сельскохозяйственных и биологических отходов для синтеза SiC в основном методом карботермического восстановления [24]. Преимущество использования для синтеза карбида кремния растительной биомассы заключается в том, что она содержит углерод и зачастую кремнезем (например, шелуха, солома злаковых культур), обеспечивая почти идеальный исходный материал для синтеза кристаллов карбида кремния [25], а также ее доступность, поскольку ежегодно в мире производится миллионы тонн биомассы сельскохозяйственных отходов [26]. За счет равномерного проникновения диоксида кремния в различные органы растений в виде ортокремниевой кислоты в процессе роста минеральная компонента растительной биомассы представлена в виде частиц аморфного диоксида кремния размером несколько нм, равномерно распределенных в

лигноцеллюлозной матрице [27–29]. Это позволяет потенциально рассматривать растительную биомассу как природный наноккомпозит, содержащий минеральную фазу и пригодный для дальнейшего использования в качестве прекурсора получения неорганических соединений.

В то же время использование растительной биомассы помимо преимуществ, связанных с ее составом и структурой, также актуально ввиду проблемы переработки отходов, поскольку сегодня в основном такие отходы утилизируют путем захоронения, либо производят на их основе удобрения и корма [30], а около 30 % от их общей массы остается без какого бы то ни было дальнейшего использования [31]. В качестве исходных материалов для получения карбида кремния, в том числе в наноразмерном виде, используют разнообразное сырье растительного происхождения: рисовую шелуху [32, 33], листья бамбука [34], древесную массу [35], ореховую скорлупу [36] и др.

Таким образом, использование в качестве исходных материалов для получения карбида кремния различных видов вторичного сырья не только позволяет получать востребованный дисперсный продукт, но и решает задачу утилизации отходов. По этой причине сегодня чрезвычайно актуальны исследования, позволяющие создать единую ресурсоэффективную технологию по получению SiC и разнообразных изделий на его основе.

В настоящем исследовании демонстрируется возможность прямого использования углеродистого остатка (УО) термической переработки рисовой шелухи в качестве прекурсора для синтеза карбида кремния в объемном и дисперсном виде. Проведены экспериментальные исследования по искровому плазменному спеканию углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи в исходном и размолотом виде, с добавками кварцевого песка SiO_2 . Кроме того, получен порошок на основе карбида кремния из углеродистого остатка безвакуумным электродуговым методом, который осуществляется в ходе одностадийного быстропотекающего процесса в воздушной среде и не требует применения системы вакуумирования. С его помощью получены дисперсные продукты с содержанием карбида кремния свыше 60 мас. %, которые впоследствии также были компактированы искровым плазменным спеканием.

Экспериментальная часть

В качестве основного метода компактирования был выбран метод искрового плазменного спекания (Spark Plasma Sintering – SPS), который использовался для получения объемных образцов. Для реализации процесса компактирования применялась система искрового плазменного спекания GT Advances Technologies SPS10-4. Исходную шихту,

которая представляла собой или измельченный углеродистый остаток термической переработки рисовой шелухи, или его смесь с кварцевым песком SiO_2 , или переработанный безвакуумным электродуговым методом порошок оборачивали графитовой бумагой и помещали в объем, образованный внутренним диаметром пресс-формы (12,7 мм) и верхним и нижним графитовыми пуансонами такого же диаметра. Применение графитовых пресс-формы и пуансонов позволяет осуществлять прямое прессование шихты и создаёт канал для протекания тока в обход порошка, обеспечивая термическое воздействие за счёт Джоулева нагрева. Температура пресс-формы изменяется программно и регистрируется высокотемпературным пирометром.

Основные параметры процесса спекания выбирались в соответствии с ранее проведенными исследованиями по получению керамики на основе карбида кремния [37, 38] и были следующими: давление прессования – 60 МПа, температура спекания – 1800 °С, время выдержки при максимальной температуре – 10 минут и скорость нагрева – 100 °С/мин. Весь процесс от начала нагрева до выемки конечного образца занимает не более 30 минут. При выбранных параметрах процесса величина тока составляет около 1 кА, что соответствует потребляемой мощности 12,5 кВт. При отмеченной длительности спекания величина потребленной электроэнергии равна 6 кВт·ч, что в конечном итоге и составляет общую величину энергозатрат на 1 объемный образец SiC, полученный методом SPS (или в пересчете на граммы при массе образца для нашего конкретного случая 2 г – 3 кВт·ч/г).

В качестве объекта исследования использовался углеродистый остаток термической переработки рисовой шелухи. Обоснованием для возможности применения данного материала в качестве прекурсора получения карбида кремния является высокое содержание кремния в неорганической части. В основной своей массе он представлен в виде диоксида кремния, о чем можно судить по данным рентгенофлуоресцентной волнодисперсионной спектроскопии (X-ray Fluorescence – XRF), которая была выполнена с использованием спектрометра XRF-1800: Si – 52,1 мас. %; O – 39,6 мас. %; K – 8,3 мас. %. Высокое содержание кремния в неорганической части и углерода в составе органики делают данный материал потенциально применимым как для прямого реакционного спекания, так и для дополнительных процедур обработки.

В качестве одного из способов предварительной обработки углеродистого остатка и получения дисперсного продукта на основе карбида кремния использовался метод безвакуумного электродугового синтеза [37]. В основе процесса лежит подведение

электрической энергии к двум токопроводящим графитовым электродам, что вызывает нагрев окружающей среды и протекание реакций карбидообразования. Возможность работы в атмосферных условиях обуславливает эффект экранирования зоны реакции за счет генерации газовой смеси из монооксида углерода CO и диоксида углерода CO_2 . Для оценки возможности получения карбида кремния в дисперсном виде из исходного углеродистого материала был реализован предварительный эксперимент с использованием описанной выше системы. Основные параметры процесса перечислены далее: система с трубчатыми коаксиально расположенными графитовыми элементами, постоянный ток процесса – 450 А, длительность воздействия – 210 сек, подведенная энергия – 913 кДж.

Стоит отметить, что предложенный способ получения дисперсных материалов отличается низкими энергозатратами. При указанных энергетических параметрах и текущем конструктивном исполнении лабораторной установки загрузка шихты достигает 15 г. Энергопотребление установки составляет 0,31 кВт·ч за один рабочий цикл. Таким образом, энергоемкость процесса составляет не более 0,021 кВт·ч/г. Текущее исполнение позволяет производить за один час не более трех экспериментов (с ручной пересборкой системы). Таким образом, производительность по исходному сырью в настоящее время составляет примерно до 50 г в час. Однако отсутствие системы вакуумирования и относительно низкие энергозатраты выгодно выделяют представленный способ получения дисперсного карбида кремния.

Стоит отметить, что используемый для спекания и безвакуумного электродугового синтеза материал, представляющий собой углеродистый остаток термической переработки рисовой шелухи, предварительно измельчался в шаровой мельнице SPEX, с использованием стаканов и помольных шаров из нитрида кремния Si_3N_4 . Процедура помола позволяла повысить дисперсность и насыпную плотность. Морфологические особенности характерных объектов углеродистого остатка до и после помола представлены на рис. 1.

Как и исходный углеродистый остаток, все полученные в дальнейшем дисперсные и объемные материалы исследовались методом растровой электронной микроскопии (Hitachi TM3000, Япония). Фазовый состав материалов исследовался методом рентгеновской дифракции (Shimadzu XRD-7000, $\text{CuK}\alpha_1$ -излучение, $\lambda_1=1,5406 \text{ \AA}$, $2\theta=10\text{--}90^\circ$), качественный анализ осуществлялся с помощью программы Crystallographica Search-Match и базы структурных данных PDF4+.

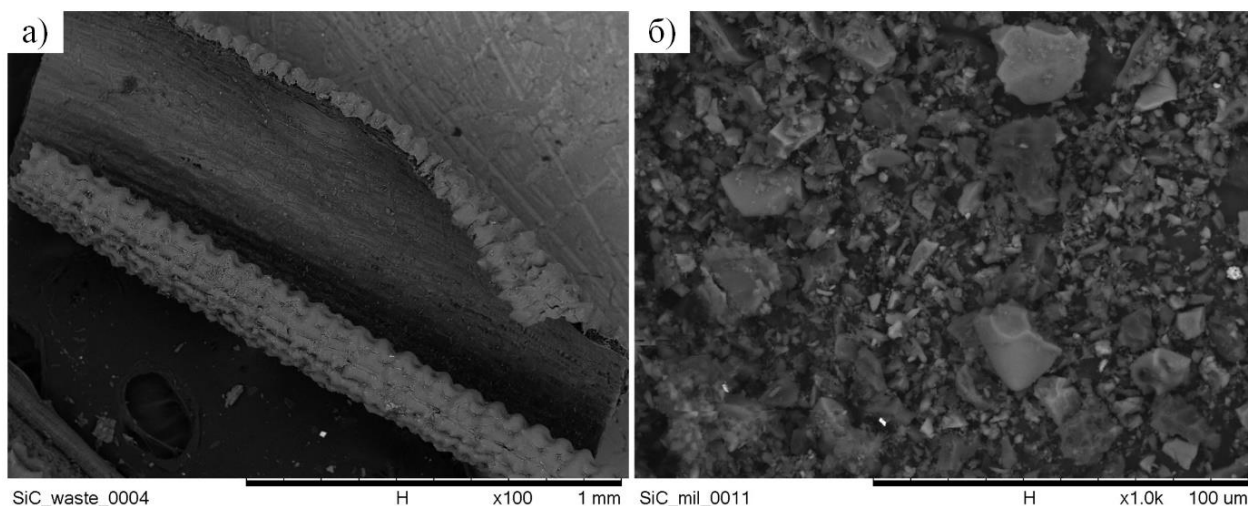


Рис. 1. Снимки растровой электронной микроскопии для характерных объектов в составе углеродистых остатков термической переработки рисовой шелухи: а) исходный УО; б) измельченный УО

Fig. 1. Scanning electron microscopy images for characteristic objects in the composition of carbonaceous residues (CR) of rice husk thermal processing: а) initial CR; б) shredded CR

Результаты и обсуждение

Как видно из представленных микроснимков на рис. 1, прямое применение частиц углеродистого остатка в установке искрового плазменного спекания не представлялось возможным ввиду низкой насыпной плотности и потенциальной опасности нарушения экспериментального процесса и его выхода из-под контроля из-за неуправляемой усадки пуансонов гидравлической системы прессования. В этой связи предварительно осуществлялся помол исходного прекурсора для уменьшения среднего размера частиц и повышения насыпной плотности. Ожидается, такой помол привел к разрушению исходных частиц с их измельчением и переходом в микронный диапазон размеров. Степень измельчения в конечном итоге зависит от времени помола: чем оно дольше, тем меньше средний размер. В данной экспериментальной серии для задач исследования был выбран диапазон, равный 30 минутам.

На первоначальном этапе было предложено оценить возможность прямого реакционного спекания кремния и углерода, в избытке присутствующих в составе углеродистого остатка. Для этого предварительно измельченный порошок спекался в соответствии с методикой, подробно описанной в [37, 38]. Реализация процесса искрового плазменного спекания при указанных в разделе «Экспериментальная часть» параметрах позволила осуществить компактирование дисперсных материалов с формированием объемных изделий. Фазовый состав исходной шихты (измельченный углеродистый остаток) и полученного объемного изделия исследовался методами рентгеновской дифрактометрии. Соответствующие картины рентгеновской дифракции приведены на рис. 2.

Полученные данные свидетельствуют о том, что исходный молотый углеродистый остаток представляет собой рентгеноаморфный материал, преимущественно состоящий из диоксида кремния SiO_2 с присутствием аморфного углерода. Содержание фаз в данном образце не поддается оценке методами рентгеновской дифракции. При спекании данного образца в отмеченных условиях в системе SPS наблюдаются фазовые превращения с формированием преимущественно двух компонентов: графитоподобного углерода (gC) и карбида кремния (SiC) тригональной сингонии. При этом содержание последнего по данным количественной оценки не превышает 15 мас. %.

Тем не менее этот результат можно считать положительным ввиду обнаруженной возможности формирования SiC в результате реакционного спекания без добавок каких-либо компонентов, что потенциально может быть перспективно для создания максимально простого технологического процесса при варьировании содержания свободного углерода в углеродистом остатке.

На рис. 3 приведены фотография полученного объемного материала и РЭМ снимок его поверхности. Поверхность характеризуется естественной шероховатостью, наличием пор и трещин. Это может быть следствием значительного количества несвязанного углерода в составе исходной смеси, который охрупчивает конечное изделие. Тем не менее получение такого рода объемного образца из исходной шихты само по себе является интересным научным результатом в связи с известными особенностями и трудностями при спекании карбидокремниевой керамики [39].

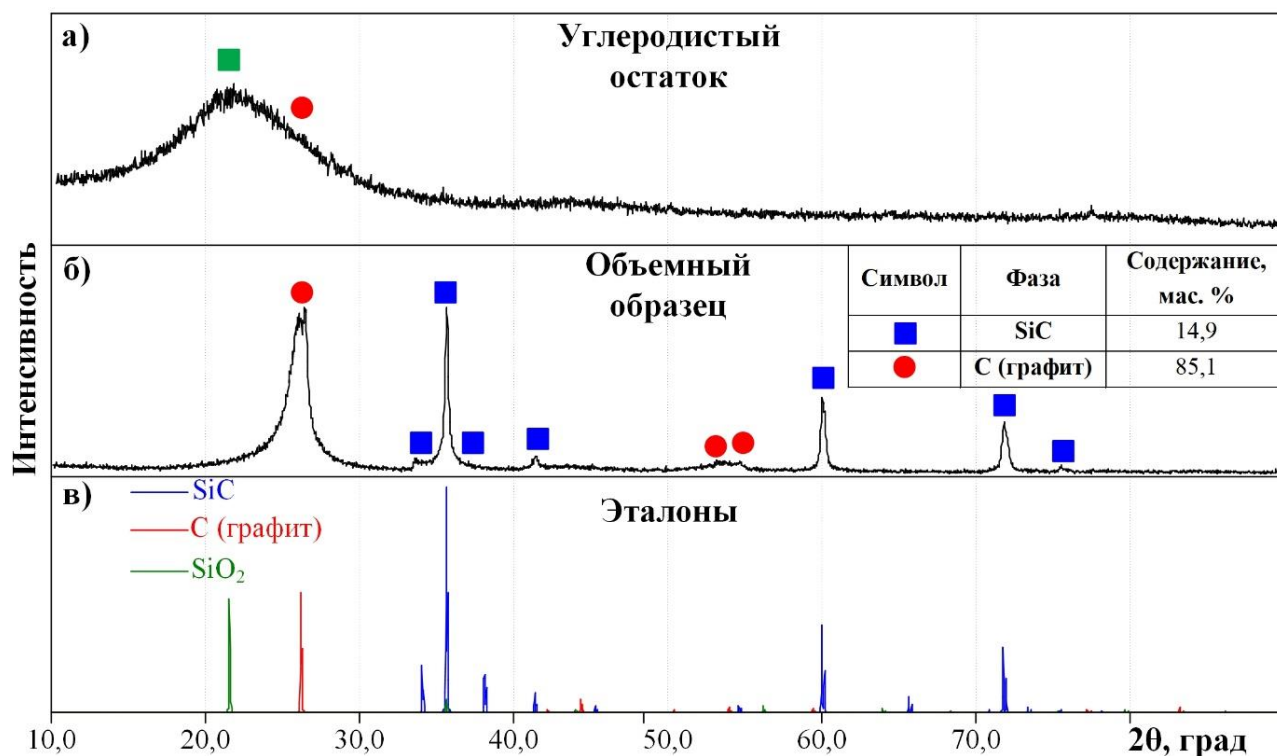


Рис. 2. Картины рентгеновской дифракции исходного молотого образца углеродистого остатка (а), объемного компактированного образца (б) в сравнении с эталонными карточками из базы данных PDF4+ (в)

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the initial ground carbonaceous residue sample (a), bulk compacted sample (б) in comparison with reference cards from the PDF4+ database (в)

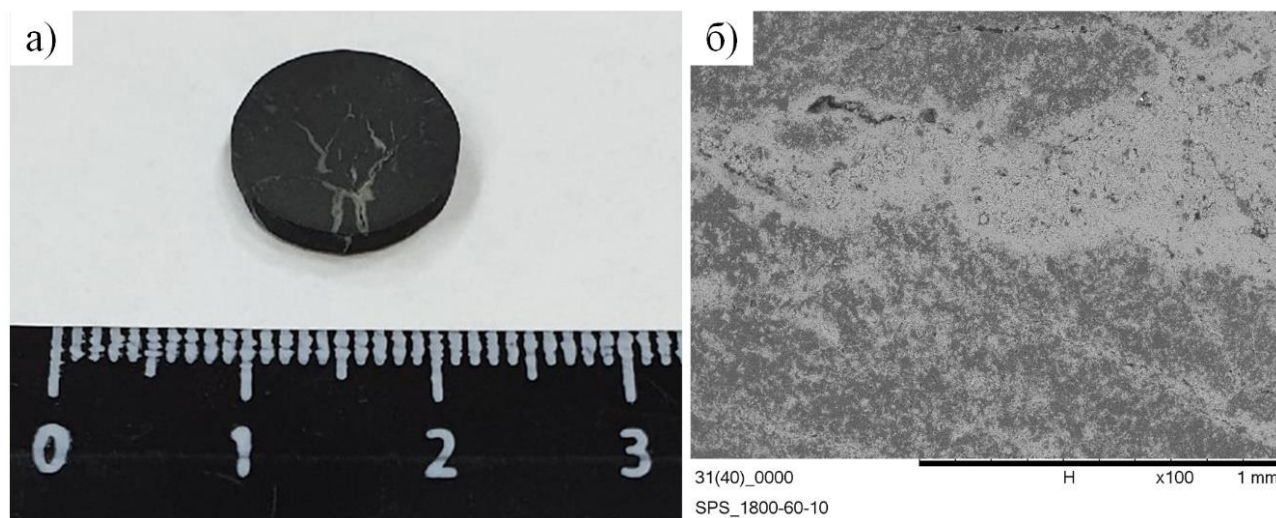


Рис. 3. Фотография внешнего вида объемного образца (а) и РЭМ-снимок поверхности при увеличении $\times 100$ (б)

Fig. 3. Photograph of the bulk sample appearance (a) and SEM image of the surface at $\times 100$ magnification (б)

В связи с обнаруженными особенностями полученного объемного образца, а именно низким массовым выходом карбида кремния и низкой относительной плотностью, было предложено модернизировать методику спекания за счёт добавки к исходному УО широко распространенного кварцевого песка (SiO_2). В качестве такого сырья был выбран

кварцевый песок, соответствующий характеристикам ГОСТ 9428-73. Реакционное спекание такой смеси должно приводить к удалению части излишнего углерода за счёт его реакции с высвобождающимся при нагреве кислородом, а кремний должен вступать в реакцию с другой частью углерода с образованием SiC. Поэтому в качестве демонстрации

онных работ были исследованы режимы спекания УО с добавками кварцевого песка в массовом соотношении УО:кварц=1:1 и УО:кварц=3:1. Несомненным преимуществом использования такого подхода является повсеместная распространенность кварцевого песка и его низкая стоимость.

При идентичных условиях спекания (давления, температуре, времени выдержки и скорости нагрева) методом SPS были получены объемные образцы из смесевых составов УО+кварц. На рис. 4 приведены рентгеновские дифрактограммы полученных материалов в сравнении с эталонными данными и образцом из измельченного углеродистого остатка. Также приведены данные количественного рентгенофазового анализа в виде таблиц.

Как видно, введение дополнительного компонента (кварцевого песка) существенно влияет на конечный фазовый состав, что выражается в принципиально разном характере картин рентгеновской дифракции. При незначительной добавке кварца (рис. 4, а) наблюдается снижение относительной интенсивности графитовых максимумов (~ 26 град.)

в сравнении с образцом из исходного УО (рис. 4, в) и возрастание максимумов, соответствующих фазе SiC. В конечном итоге это выражается в трехкратном повышении количественного выхода SiC до 53,5 мас. % в составе объемного изделия.

Подготовка смесового состава с равными массовыми долями УО и кварцевого песка, как видно из представленных данных, негативно сказывается на фазовом составе конечного продукта. Отсутствуют максимумы карбида кремния как такового, а вместо этого возрастает доля SiO₂ и углерода. Таким образом, можно сделать вывод, что существует некая оптимальная точка по массовой добавке кварца, которая позволяет достичь максимального выхода SiC в составе получаемых объемных изделий. Превышение этого оптимума приводит к необратимым изменениям протекающих химических реакций и изменению фазового состава в негативную (для поставленной задачи) сторону. Несмотря на это, такой подход к получению объемных изделий на основе карбида кремния может рассматриваться как перспективный и требует проведения дополнительных исследований.

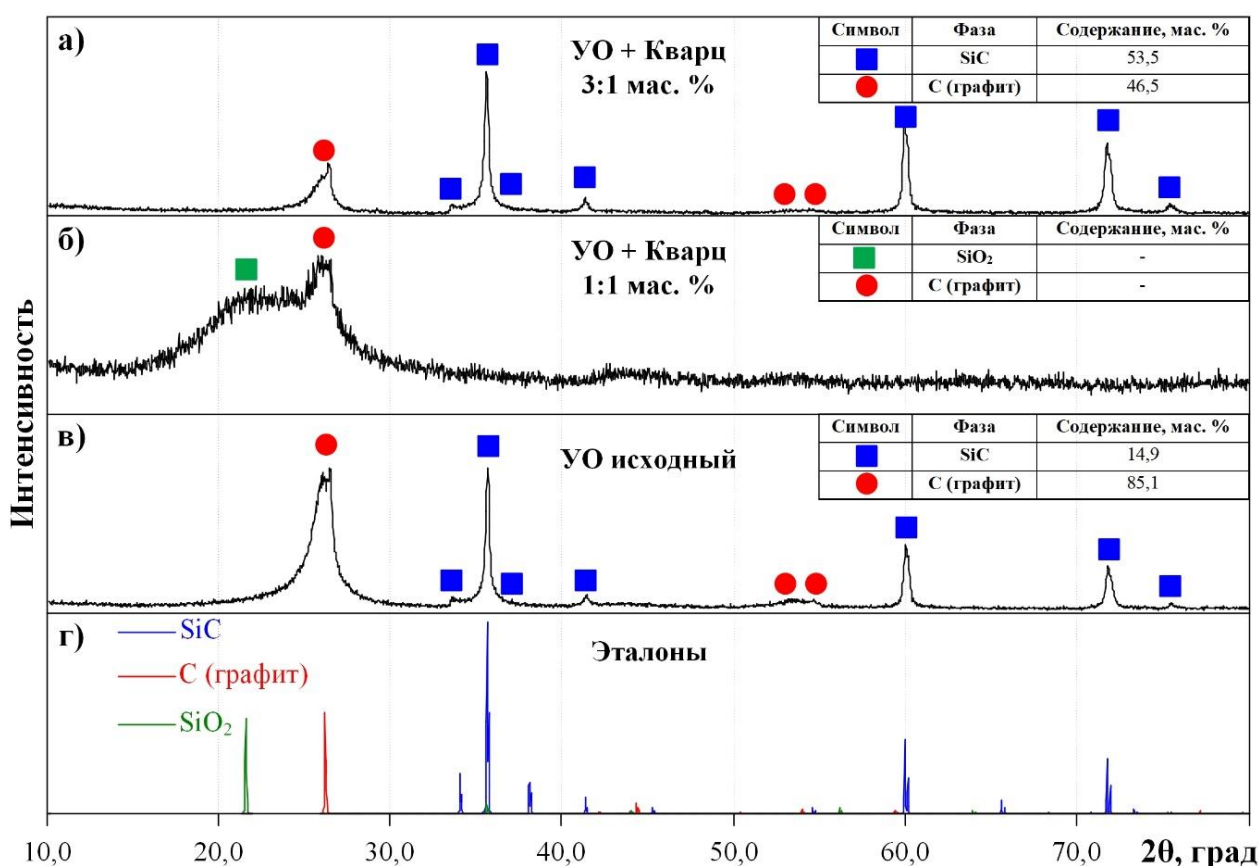


Рис. 4. Картины рентгеновской дифракции объемных образцов, полученных из смесевых составов УО и кварцевого песка (кварц) в массовом соотношении 3:1 (а), 1:1 (б), из исходного молотого УО (в) в сравнении с эталонными данными (г)

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of bulk samples obtained from mixed compositions of CR and quartz sand (quartz) in mass ratio 3:1 (a), 1:1 (б), from initial ground CR (в) in comparison with reference data (г)

Альтернативным вариантом получения объемных изделий из углеродистого остатка является его предварительная переработка с формированием порошка карбида кремния, который в дальнейшем можно использовать как шихту для искрового плазменного спекания. Для реализации такого подхода был использован безвакуумный электродуговой синтез, который представляет собой уникальный авторский способ получения карбидных материалов в атмосферных условиях без необходимости использования дорогостоящих вакуумных систем и сопутствующей газовой оснастки. Для оценки возможности получения карбида кремния в дисперсном виде из исходного углеродистого остатка был реализован предварительный эксперимент с использованием описанной системы.

Реализация указанного способа синтеза карбида кремния позволила получить из исходного молотого углеродистого остатка порошок $\text{SiC}_{\text{эксп}}$, фазовый состав которого также оценивался методом рентгеновской дифрактометрии. Результаты данного анализа приведены на рис. 5, а. Как видно из представленных данных, карбид кремния является доминирующим компонентом, о чем можно судить по соотношению максимумов SiC и C. Расчет фазово-

го состава позволил установить, что содержание SiC в полученном продукте практически достигает 70 мас. %. Этот результат является весьма обнадеживающим с позиции возможной дальнейшей оптимизации процесса для повышения фазовой чистоты.

На рис. 6 приведены снимки растровой электронной микроскопии полученных дисперсных материалов (а–в) с проставленными размерами и микроснимок поверхности керамического образца (г). Как видно из приведенных изображений, дисперсный продукт характеризуется наличием двух основных типов частиц: более темных по контрасту – частиц углерода, и более светлых – частиц карбида кремния SiC. Возможность фазовой идентификации по контрасту обусловлена особенностями метода и разной плотностью исследуемых материалов. Материал с большей плотностью характеризуется более ярким свечением при взаимодействии с электронным пучком. Путем прямых измерений установлено, что частицы полученного SiC характеризуются размерами частиц от единиц микрометров до ~50 мкм. При этом наблюдается формирование агломератов, состоящих из более мелкой наноразмерной фракции, что отчетливо видно на рис. 6, в.

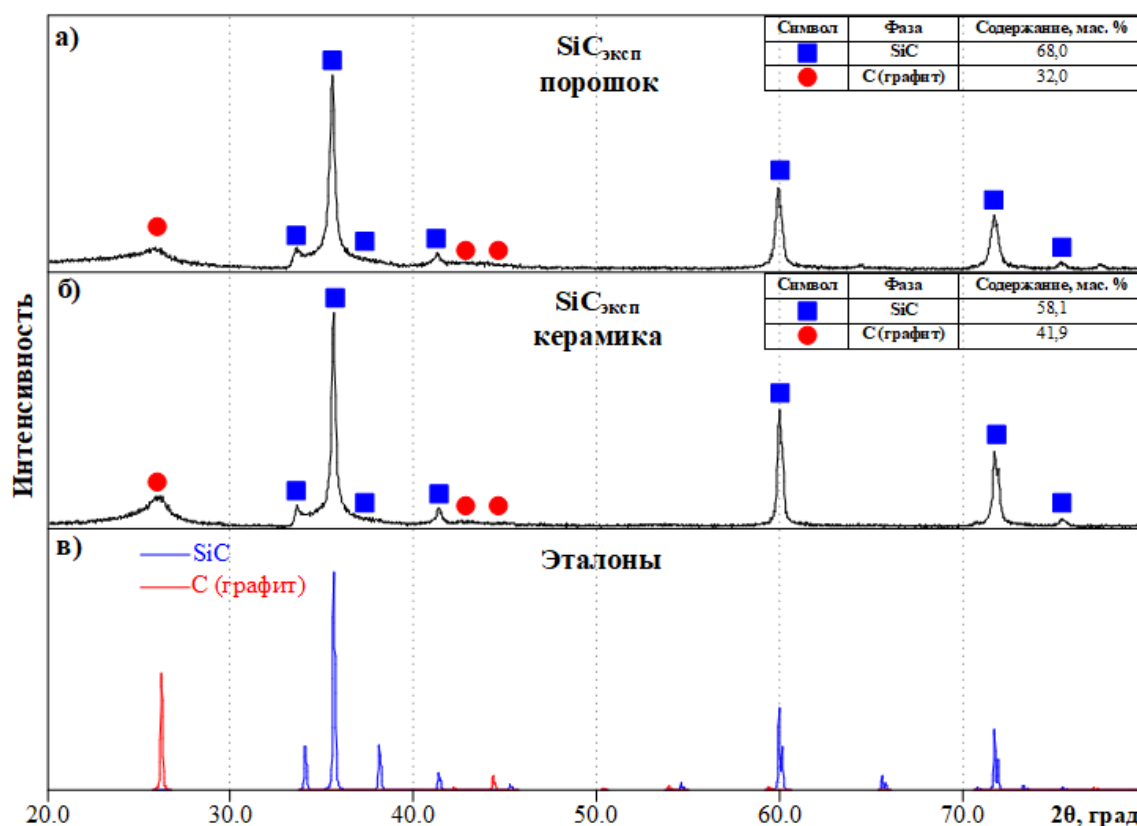


Рис. 5. Картины рентгеновской дифракции синтезированного порошка на основе карбида кремния (а), объемного материала, полученного методом SPS при его спекании (б), и эталонные данные для отмеченных фаз из базы данных PDF4+ (в)

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of synthesized silicon carbide powder (a), bulk material obtained by SPS sintering (б), and reference data for the marked phases from the PDF4+ database (в)

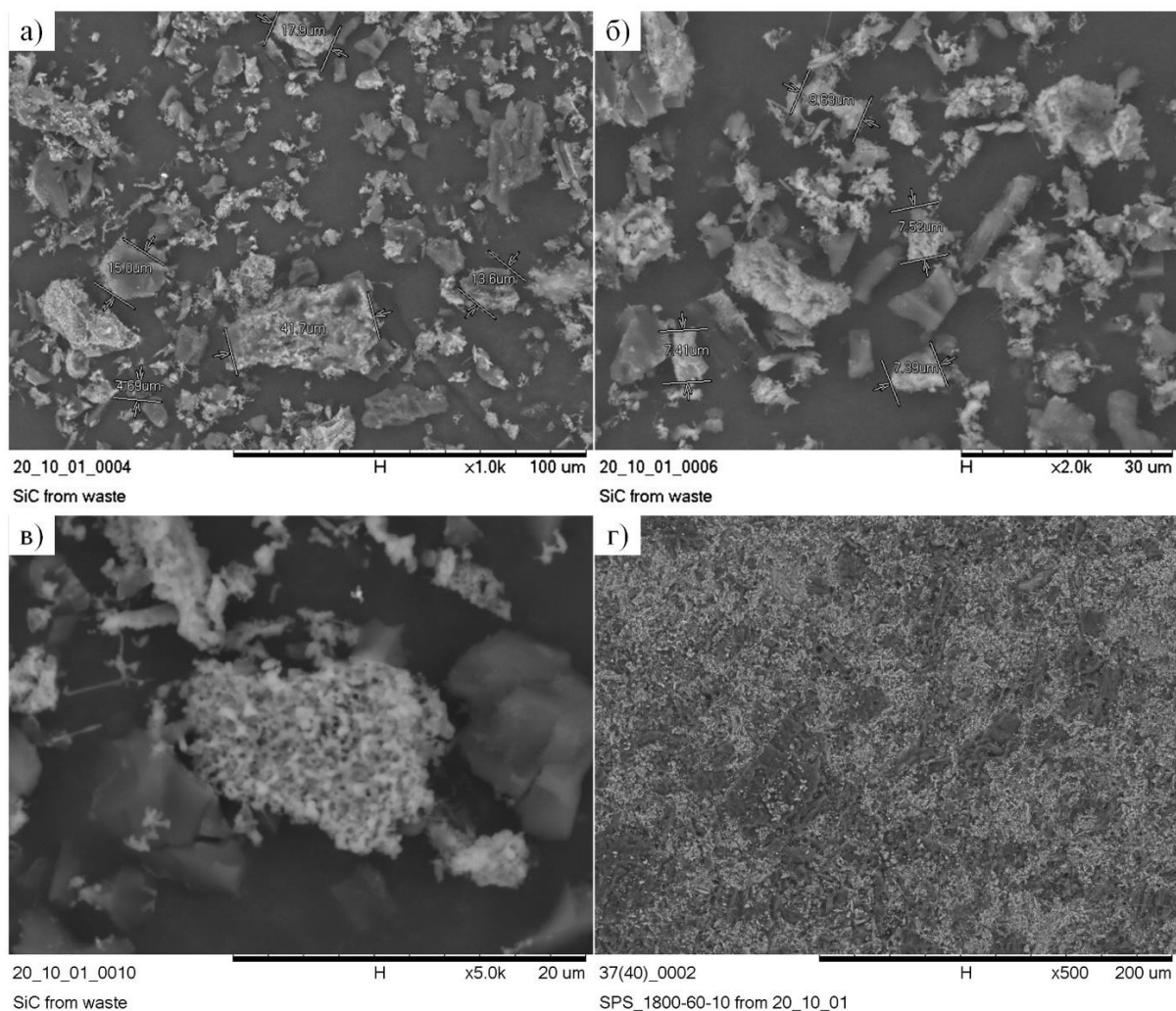


Рис. 6. РЭМ-снимки характерных объектов в составе синтезированного дисперсного карбида кремния (а-в) и снимок поверхности полученного объемного образца (г)
Fig. 6. SEM images of characteristic objects within the synthesized dispersed silicon carbide (a-в) and surface image of the obtained bulk sample (г)

Спеченный с использованием синтезированного порошка объемный образец характеризуется более высокой однородностью поверхности и отсутствием микротрещин. Тем не менее при ближайшем рассмотрении наблюдается большое количество микропор, образование которых обусловлено значительным количеством несвязанного углерода, который присутствует в составе исходного порошка. Таким образом, одним из путей повышения плотности и физико-механических свойств конечных объемных изделий может быть оптимизация процесса безвакуумного резистивного синтеза для минимизации содержания углерода.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведены исследования по получению объемных керамических образцов с использованием

углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи. Прямое спекание предварительно измельченного углеродистого остатка позволяет сформировать объемный образец с содержанием SiC до 15 мас. %.

2. Формирование смесевых составов углеродистого остатка с кварцевым песком и их дальнейшее спекание методом SPS позволяет повысить выход SiC в составе объемных изделий до уровня свыше 50 мас. %.
3. Реализован процесс получения дисперсного карбида кремния SiC безвакуумным резистивным синтезом с использованием предварительного помолотого углеродистого остатка в качестве прекурсора. Такой процесс позволяет получить микронные порошки с размерами от единиц до 50 мкм с массовым выходом карбида кремния ~70 %.

4. Спекание керамических образцов при использовании в качестве шихты синтезированного безвакуумным резистивным методом карбида кремния позволяет получить керамические образцы с выходом SiC практически равным 60 мас. %.

Полученные данные свидетельствуют о высокой перспективности и возможности получения высоко-

кочистых материалов на основе карбида кремния из углеродистого остатка термической переработки рисовой шелухи. Для этого требуется проведение дополнительных исследований либо для определения оптимальных добавок и прямого спекания объемных изделий, либо по предварительному синтезу с возможностью дальнейшего использования как порошка, так и керамики на основе SiC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Golla B.R., Mukhopadhyay A., Basu B., Thimmappa S.K. Review on ultra-high temperature boride ceramics. *Progress in Materials Science*, 2020, vol. 111, article no. 100651. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100651
2. Ren X., Zou H., Diao Q., Wang C., Wang Y., Li H., Sui T., Lin B., Yan S. Surface modification technologies for enhancing the tribological properties of cemented carbides: a review. *Tribology International*, 2023, article no. 108257. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108257
3. Sivkov A.A., Gerasimov D.Y., Nikitin D.S. Direct dynamic synthesis of nanodispersed phases of titanium oxides upon sputtering of electrodischarge titanium plasma into an air atmosphere. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, article no. 16–19. DOI: 10.1134/S1063785016120105
4. Riedel R. Handbook of ceramic hard materials. *Wiley Online Library*. Weinheim, Wiley, 2000. 1020 p.
5. Nisar A., Hassan R., Agarwal A., Balani K. Ultra-high temperature ceramics: aspiration to overcome challenges in thermal protection systems. *Ceramics International*, 2022, vol. 48, no. 7, pp. 8852–8881. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.12.199
6. Xu M., Girish Y.R., Rakesh K.P., Wu P., Manukumar H.M., Byrappa S.M., Byrappa K. Recent advances and challenges in silicon carbide (SiC) ceramic nanoarchitectures and their applications. *Materials Today Communications*, 2021, vol. 28, article no. 102533. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102533
7. Katoh Y., Snead L.L. Silicon carbide and its composites for nuclear applications—Historical overview. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 526, article no. 151849. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.151849
8. Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G., Nigro R.L., Giannazzo F., Iucolano F., Saggio M. Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices. *Microelectronic Engineering*, 2018, vol. 187, pp. 66–77. DOI: 10.1016/j.mee.2017.11.021
9. Wu R., Zhou K., Yue C.Y., Wei J., Pan Y. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials. *Progress in Materials Science*, 2015, vol. 72, pp. 1–60. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.003
10. Wang X., Gao X., Zhang Z., Cheng L., Ma H., Yang W. Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, vol. 41, no. 9, pp. 4671–4688. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.051
11. Tebyani S.F., Dehghani K. Effects of SiC nanopowders on the mechanical properties and microstructure of interstitial free steel joined via friction stir spot welding. *Materials & Design*, 2016, vol. 90, pp. 660–668. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.11.016
12. Fang L., Huang X.P., Vidal-Iglesias F.J., Liu Y.P., Wang X.L. Preparation, characterization and catalytic performance of a novel Pt/SiC. *Electrochemistry communications*, 2011, vol. 13, no. 12, pp. 1309–1312. DOI: 10.1016/j.elecom.2011.07.023
13. Tong X., Dong L., Jin G., Wang Y., Guo X.Y. Electrocatalytic performance of Pd nanoparticles supported on SiC nanowires for methanol oxidation in alkaline media. *Fuel Cells*, 2011, vol. 11, no. 6, pp. 907–910. DOI: 10.1002/fuce.201100017
14. Manikandan S., Jancirani J. A study of preparation and characterization of Nano-sized SiC powder using high energy ball milling. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 592, pp. 13–17. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.13
15. Károlyházy G., Beke D., Zalka D., Lenk S., Krafcsik O., Kamarás K., Gali Á. Novel method for electroless etching of 6H–SiC. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 3, article no. 538. DOI: 10.3390/nano10030538
16. Kuang B., Dou Y., Wang Z., Ning M., Jin H., Guo D., Cao M., Fang X., Zhao Y., Li J. Enhanced microwave absorption properties of Co-doped SiC at elevated temperature. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 445, pp. 383–390. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.03.203
17. Zhan H., Zhang N., Wu D., Wu Z., Bi S., Ma B., Liu W. Controlled synthesis of β -SiC with a novel microwave sintering method. *Materials Letters*, 2019, vol. 255, article no. 126586. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126586
18. Qin X., Wang F., Ren S., Yang L., Meng Y., Sun L. Self-forming salt-assisted synthesis of SiC nanoparticles and their adsorption property for methylene blue from aqueous solution. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 847–852. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.09.008
19. Yamada T., Araki F., Ishihara J., Miyajima K. Fabrication of silicon carbide nanoparticles using picosecond pulsed laser ablation in acetone with characterizations from TEM and XRD. *AIP Advances*, 2019, vol. 9, no. 10, article no. 105011. DOI: 10.1063/1.5121756
20. Wang C., Zhou J., Song M., Lu Z., Chen X., Zheng Y., Xia W. Synthesis of ultrafine silicon carbide nanoparticles using nonthermal arc plasma at atmospheric pressure. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, vol. 104, no. 8, pp. 3883–3894. DOI: 10.1111/jace.17811
21. Sivkov A.A., Nikitin D.S., Pak A.Y., Rakhmatullin I.A. Influence of plasmodynamic synthesis energy in Si-C system on the product phase composition and dispersion. *Nanotechnologies in Russia*, 2015, vol. 10, pp. 34–41. DOI: 10.1134/S1995078015010188
22. Sivkov A.A., Nikitin D.S., Pak A.Y., Rakhmatullin I.A. Production of ultradispersed crystalline silicon carbide by plasmodynamic synthesis. *Journal of Superhard Materials*, 2013, vol. 35, pp. 137–142. DOI: 10.3103/S1063457613030027

23. Voon C.H., Lim B.Y., Ho L.N. Silicon carbide nanomaterials. *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*, 2018, pp. 213–253. DOI: 10.1016/B978-0-08-101975-7.00009-9
24. Wang Y., Dong S., Li X., Hong C., Zhang X. Synthesis, properties, and multifarious applications of SiC nanoparticles: a review. *Ceramics International*, 2022, vol. 48, no. 7, pp. 8882–8913. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.12.208
25. Omoriyekomwan J.E., Tahmasebi A., Dou J., Tian L., Yu J. Mechanistic study on the formation of silicon carbide nanowhiskers from biomass cellulose char under microwave. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, vol. 262, article no. 124288. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.124288
26. Wang L., Mu G., Tian C., Sun L., Zhou W., Yu P., Yin J., Fu H. Porous graphitic carbon nanosheets derived from cornstalk biomass for advanced supercapacitors. *ChemSusChem*, 2013, vol. 6, no. 5, pp. 880–889. DOI: 10.1002/cssc.201200990
27. Currie H.A., Perry C.C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of botany*, 2007, vol. 100, no. 7, pp. 1383–1389. DOI: 10.1093/aob/mcm247
28. Larichev Y.V., Yeletsky P.M., Yakovlev V.A. Study of silica templates in the rice husk and the carbon–silica nanocomposites produced from rice husk. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2015, vol. 87, pp. 58–63. DOI: 10.1016/j.jpcs.2015.07.025
29. Yeletsky P.M., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Tabakaev R.B., Okotrub K.A., Yakovlev V.A. Conversion of natural feedstocks to porous carbons via carbonization in fluidized catalyst bed followed by leaching the feedstock mineral template phase: a comparison of biomass and sedimentary raw materials. *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 226, article no. 107076. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.107076
30. Cheng X.Y., Liu C.Z. Enhanced coproduction of hydrogen and methane from cornstalks by a three-stage anaerobic fermentation process integrated with alkaline hydrolysis. *Bioresource technology*, 2012, vol. 104, pp. 373–379. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.10.082
31. Pan C.M., Ma H.C., Fan Y.T., Hou H.W. Bioaugmented cellulosic hydrogen production from cornstalk by integrating dilute acid-enzyme hydrolysis and dark fermentation. *International Journal of hydrogen energy*, 2011, vol. 36, no. 8, pp. 4852–4862. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.114
32. Su J., Gao B., Chen Z., Fu J., An W., Peng X., Zhang X., Wang L., Huo K., Chu P.K. Large-scale synthesis and mechanism of β -SiC nanoparticles from rice husks by low-temperature magnesiothermic reduction. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 6600–6607. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01483
33. Krishnarao R.V. Effect of cobalt chloride treatment on the formation of SiC from burnt rice husks. *Journal of the European Ceramic Society*, 1993, vol. 12, no. 5, pp. 395–401. DOI: 10.1016/0955-2219(93)90010-O
34. Zhu J., Jia J., Kwong F.L., Ng D.H. Synthesis of 6H-SiC nanowires on bamboo leaves by carbothermal method. *Diamond and related materials*, 2013, vol. 33, pp. 5–11. DOI: 10.1016/j.diamond.2012.12.010
35. Shin Y., Wang C., Samuels W.D., Exarhos G.J. Synthesis of SiC nanorods from bleached wood pulp. *Materials Letters*, 2007, vol. 61, no. 13, pp. 2814–2817. DOI: 10.1016/j.matlet.2006.10.035
36. Rajarao R., Sahajwalla V. A cleaner, sustainable approach for synthesising high purity silicon carbide and silicon nitride nanopowders using macadamia shell waste. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 133, pp. 1277–1282. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.029
37. Pak A.Y., Bolatova Z., Nikitin D.S., Korchagina A.P., Kalinina N.A., Ivashutenko A.S. Glass waste derived silicon carbide synthesis via direct current atmospheric arc plasma. *Waste Management*, 2022, vol. 144, pp. 263–271. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.04.002
38. Sivkov A., Nikitin D., Shanenkov I., Ivashutenko A., Rahmatullin I., Nassyrbayev A. Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, vol. 79, pp. 123–130. DOI: 10.1016/j.jrmhm.2018.11.016
39. Oguntuyi S.D., Nyembwe K., Shongwe M.B., Johnson O.T., Adewumi J.R., Malatji N., Olubambi P.A. Improvement on the fabrication OF SiC materials: processing, reinforcing phase, fabricating route – a review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 225–237. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2022.10.005

Информация об авторах

Иван Игоревич Шаненков, кандидат технических наук, заведующий лабораторией ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6; младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. i.i.shanenkov@utmn.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7499-5846>

Дмитрий Сергеевич Никитин, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nikitindmsr@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-5015-6092>

Артур Насырбаев, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. arn1@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4761-8863>

Александр Игоревич Циммерман, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. alextsimmer@yandex.ru; <http://orcid.org/0009-0008-9474-7899>

Юлия Леонидовна Шаненкова, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kolganovajulia@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0439-8557>

Алексей Владимирович Власов, аспирант Инженерной школы энергетики, младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли, старший лаборант организационного отдела Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. avv49@tpu.ru

Александр Яковлевич Пак, доктор технических наук, заведующий лабораторией перспективных материалов энергетической отрасли, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. avv49@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8447-1309>

Анастасия Сергеевна Сайгаш, кандидат технических наук, и.о. руководителя отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nasts@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7340-0871>

Поступила в редакцию: 20.12.2023

Поступила после рецензирования: 25.12.2023

Принята к публикации: 14.03.2024

Information about the authors

Ivan I. Shanenkov, Cand. Sc., Head of the Laboratory, Tyumen State University, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation; Senior Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. i.i.shanenkov@utmn.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7499-5846>

Dmitry S. Nikitin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nikitindmsr@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-5015-6092>

Artur Nassyrbayev, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. arn1@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4761-8863>

Alexander I. Tsimmerman, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. alextsimmer@yandex.ru; <http://orcid.org/0009-0008-9474-7899>

Yuliya L. Shanenkova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kolganovajulia@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0439-8557>

Alexey V. Vlasov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. avv49@tpu.ru

Alexander Ya. Pak, Dr. Sc., Head of the Laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ayapak@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8447-1309>

Anastasia S. Saigash, Cand. Sc., Acting head of Power Engineering and Electrical Technology Department, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nasts@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7340-0871>

Received: 20.12.2023

Revised: 25.12.2023

Accepted: 14.03.2024

УДК 628.31

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

Шифр специальности ВАК: 2.6.7

Получение комплексных титансодержащих коагулянтов из крупнотоннажных минеральных концентратов и их использование при очистке сточных вод

Е.Н. Кузин[✉], А.Б. Фадеев

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, г. Москва

[✉]Kuzin.e.n@muctr.ru

Аннотация. Актуальность. Разработка новых, высокоэффективных реагентов для очистки сточных вод различного происхождения – сложная и крайне важная задача. Не менее актуальным остается вопрос проектирования технологий переработки крупнотоннажных минеральных продуктов, получивших статус «отходы» и не имеющих в настоящее время экономически и экологически обоснованных и рациональных способов утилизации. Разработка технологии получения реагентов с использованием в качестве сырья промышленных отходов будет не только иметь экономический эффект, но и позволит существенно минимизировать уровень негативного воздействия на окружающую среду и сделать шаг к реализации концепции Zero Waste. **Цель:** разработка технологии переработки крупнотоннажного титансодержащего сырья для получения комплексных титансодержащих реагентов и исследование их эффективности в процессах очистки сточных вод различных производств. **Методы.** Для исследования фазового состава образцов применяли метод рентгеновской дифракции, а определение содержания металлов в кислых растворах и сточных водах проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии. **Результаты и выводы.** Предложена технология получения комплексных титансодержащих коагулянтов, включающая гидрометаллургическую технологию сернокислотной переработки крупнотоннажного минерального сырья титанита. В полученные растворы для корректировки химического состава и нейтрализации свободной серной кислоты вводили гидроксид алюминия. Образующийся сульфат алюминия переходит в наиболее стабильную форму 18-водного кристаллогидрата и поглощает влагу из раствора, тем самым реализуя процесс химической дегидратации. Исследование состава твердых образцов коагулянтов показало, что преобладающей фазой в составе комплексного коагулянта является сульфат алюминия, а содержание соединений титана колеблется в диапазоне 1–14 % мас. Установлено, что при варьировании соотношения минерального сырья и серной кислоты можно направленно менять количество модифицирующей добавки соединений титана в составе комплексного реагента. Доказано, что применение комплексных титансодержащих реагентов в процессах очистки сточных вод позволяет на 25–35 % снизить расход коагулянтов, повысить эффективность очистки воды, минимизировать остаточные концентрации загрязняющих веществ, а также существенно повысить скорость седиментации коагуляционных шламов в сравнении с традиционным сульфатом алюминия.

Ключевые слова: химическая дегидратация, комплексные титансодержащие коагулянты, сточные воды, титанит, минеральное сырье, седиментация, выщелачивание

Благодарности: Авторы выражают благодарность научному консультанту, доктору технических наук, профессору Наталии Евгеньевне Кручининой.

Для цитирования: Кузин Е.Н., Фадеев А.Б. Получение комплексных титансодержащих коагулянтов из крупнотоннажных минеральных концентратов и их использование при очистке сточных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 34–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

UDC 628.31

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

Preparation of complex titanium-containing coagulants from large-scale mineral concentrates and their use in wastewater treatment

E.N. Kuzin✉, A.B. Fadeev

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

✉Kuzin.e.n@muctr.ru

Abstract. Relevance. Development of new, highly effective reagents for treatment of wastewater of various origins is a complex and extremely important task. An equally pressing issue remains the development of technologies for processing large-scale mineral products, which currently have not found an economically feasible technology for their processing and have received the status of “waste”. The development of a technology for producing reagents using waste as a raw material will not only have an economic effect but will also significantly minimize the level of negative impact on the environment and take a step towards the implementation of the Zero Waste concept. **Aim.** Development of technology for processing large-scale titanium-containing raw materials to obtain complex titanium-containing reagents and study of their effectiveness in wastewater treatment from various industries. **Methods.** To study the phase composition of the samples, the X-ray diffraction method was used, and the determination of metal content in acidic solutions and wastewater was carried out by atomic emission spectroscopy. **Results and conclusions.** The authors have proposed the technology for production of complex titanium-containing coagulants, which includes hydrometallurgical technology for sulfuric acid processing of large-capacity mineral raw materials – titanite. Aluminum hydroxide was introduced into the resulting solutions to adjust the chemical composition and neutralize free sulfuric acid. The resulting aluminum sulfate transforms into the most stable form of 18-aqueous crystalline hydrate, absorbing moisture from the solution, realizing chemical dehydration. The study of the composition of solid samples of coagulants showed that the predominant phase in the composition of the complex coagulant is aluminum sulfate, and the content of titanium compounds ranges from 1 to 14 wt %. It was established that by varying the ratio of mineral raw materials:sulfuric acid it is possible to vary the amount of modifying additive titanium compounds in the complex reagent. It was proven that the use of complex titanium-containing coagulants in wastewater treatment allows reducing the consumption of coagulants by 25–35%, increasing the efficiency of water purification, minimizing residual concentrations of pollutants, and also significantly increasing the rate of sedimentation of coagulation sludge in comparison with traditional sulfate aluminum.

Keywords: chemical dehydration, complex titanium-containing coagulants, wastewater, titanite, mineral raw materials, sedimentation, leaching

Acknowledgments: The authors express gratitude to the scientific consultant, Dr. Sc., Professor Nataliya E. Kruchinina.

For citation: Kuzin E.N., Fadeev A.B. Preparation of complex titanium-containing coagulants from large-scale mineral concentrates and their use in wastewater treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 34–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4599

Введение

Рост промышленного производства ведет к неизбежному увеличению уровня негативного воздействия на окружающую природную среду. Наибольшему влиянию, несомненно, подвергается гидросфера. Огромные объемы пресной воды, изымаемой из поверхностного и подземного источника, а также сброс недостаточно очищенных сточных вод различных отраслей промышленности приводит к существенному снижению качества воды в поверхностных и подземных источниках.

Еще одним негативным последствием развития промышленности является увеличение объемов

накопления относительно невостребованных крупнотоннажных минеральных концентратов, не нашедших в настоящее время широкого практического применения и имеющих статус «отходы» [1, 2]. Наиболее яркими примерами подобных «отходов» являются нефелиновый, сфеновый (титанитовый) и кварц-лейкоксеновые концентраты, ежегодные объемы образования и размещения на шлаковалы которых исчисляются миллионами тонн.

Подобные объекты хранения отходов не только отчуждают значительные территории, но и оказывают серьезное негативное воздействие на окружающую среду. В отдельных случаях подобные объекты накопления отходов могут стать эпицен-

трами техногенных, экологических катастроф. В 2010 г. в Венгрии прорыв шламохранилища привел к загрязнению огромных площадей и уничтожению нескольких деревень [3].

Наиболее эффективным методом очистки сточных вод различного происхождения является коагуляция, или ее частный случай – флокуляция. Данный метод достаточно давно используется как на станциях водоподготовки речной воды, так и на локальных очистных сооружениях различных промышленных производств. Традиционно в качестве реагентов-коагулянтов используют соли алюминия или железа. Данные реагенты хорошо зарекомендовали себя, однако уже давно морально устарели и недостаточно успешно справляются с поставленными перед ними задачами. Помимо этого, соединения алюминия работают в узком диапазоне pH, малоэффективны в холодной воде и имеют жесткий остаточный норматив ПДК. Соединения железа, в свою очередь, могут образовывать устойчивые комплексы с органическими лигандами, а также обладают ярко выраженными коррозионными и абразивными свойствами [4, 5].

В последнее время все чаще исследователями отмечается перспективность применения комплексных или бинарных реагентов. Смеси солей алюминия и железа, а также алюмокремниевый флокулянт-коагулянт являются эффективными аналогами традиционных реагентов. К сожалению, ряд технологических особенностей (низкий pH, гелирование и пр.) не позволяют применять данные реагенты повсеместно [5, 6].

Сегодня значительное количество зарубежных коллективов называют титансодержащие коагулянты новым поколением коагулянтов, способных выполнять недостижимые для традиционных реагентов задачи. К сожалению, данные реагенты дорогие, что существенно замедляет их повсеместное внедрение [7–13].

Выходом из сложившейся ситуации может стать использование комплексных титансодержащих коагулянтов, получаемых модификацией традиционных алюмо- или железосодержащих коагулянтов соединениями титана в количестве 2,5–10,0 % мас. [14]. Комплексные реагенты показали высокую эффективность в процессах очистки сточных вод различных производств [15–17], однако до сих пор не существует технологии их производства, и локальные потребители просто смешивают соли алюминия и титана, что негативно сказывается на стоимости процесса очистки.

Целью данного исследования является разработка технологии переработки получения комплексных титансодержащих реагентов из крупнотоннажного титансодержащего сырья и изучение

эффективности полученного реагента при очистке сточных вод различных производств.

Объекты и методы исследования

В качестве основного объекта исследования выбран титанитовый (сфеновый) концентрат – побочный продукт добычи апатита на Кольском полуострове. Несмотря на значительные успехи в направлении переработки титанита в пигментный диоксид титана, дубители и сорбенты, объемы его образования существенно превышают производственные мощности, а значит, вопрос поиска новых направлений его применения остается актуальным [18–21].

Сульфатизацию сырья проводили 50–80%-ми растворами серной кислоты при температуре кипения раствора (1). Непрореагировавшую руду удаляли отстаиванием, а свободную серную кислоту нейтрализовали гидроксидом алюминия.



Элементный состав твердых образцов исследовали на рентгенофлуоресцентном электронном микроскопе JEOL1610LV с энергодисперсионной приставкой SSD X-MaxIncaEnergy (JEOL, Япония; Oxford Instruments, Великобритания).

Исследование фазового состава твердых образцов проводили на приборе рентгенофазового анализа ДРОН 3 Н (Россия).

Содержание металлов в кислых растворах и сточных водах определяли при помощи атомно-эмиссионного спектрометра с магнитной плазмой «Спектроскай» (г. Королев, Россия) [22].

Содержание взвешенных веществ в воде определяли гравиметрическим методом в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.4.254-09, а также при помощи турбидиметра-мутномера HANNA HI 98703 (Italia).

Пробную коагуляцию (Jar-Test) проводили на лабораторном флокуляторе JLT 4 Velp Scientifica (Italia). Время смешения фаз коагулянта и сточной воды – 2 минуты, хлопьеобразования – 8 минут, седиментации – 30 минут.

Скорость седиментации коагуляционных шламов определяли путем измерения времени стабилизации оптической плотности обработанной коагулянтами сточной воды.

В качестве образца сравнения использовали сульфат алюминия производства Kemira (Финляндия).

В качестве тест-объектов сточной воды были выбраны:

- сточные воды установки газоочистки обогатительного участка;
- сточные воды участка отмывки и нейтрализации фосфогипса;
- атмосферные стоки с промышленной площадки предприятия.

Результаты исследования и их обсуждение

Добываемый титанит и получаемый из него титанитовый (сфеновый) концентрат, как было отмечено ранее, в настоящее время не перерабатывается в промышленных масштабах и приобретает статус «отхода». Обычно в составе направляемого на длительное хранение титаните содержится 95–97 % основного вещества (титанита) и до 3–5 % примесей нефелина, апатита, кварца, оксидов алюминия, железа, кальция, натрия и пр. Данные по элементному составу образца, использованного в экспериментах, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав титанита, мас. %

Table 1. Titanite elemental composition, wt %

Элемент/Element	O	Ca	Si	Ti	Fe	Al	Mg, Na, K, Y, Sc etc.
Содержание/Content	40,1	20,8	14,3	24,1	0,22	0,11	0,37

Образец титанитового (сфенового) концентрата обрабатывали растворами серной кислоты различной концентрации. Данные по эффективности извлечения титановой фазы представлены на графике (рис. 1).

Из данных графика (рис. 1) видно, что наибольшая степень извлечения титана наблюдается при концентрации серной кислоты 60–70 % мас. и времени процесса 210 и 150 минут соответственно. Важно отметить, что переход в раствор ионов кальция в процессе сульфатизации сырья сопровождался образованием сульфата (гипса), который выпадал в виде нерастворимого осадка.

Образующийся осадок после нейтрализации свободной (непрореагировавшей) серной кислоты и отмывки водорастворимых компонентов представлял собой смесь дигидрата сульфата кальция, диоксида кремния и примесей оксидов железа и алюминия в процентном соотношении 72/27/1 %. Согласно данным элементного и фазового анализа и с учетом тестов на фитотоксичность данный осадок относится к 5 классу опасности и может быть использован в качестве компонента строительных смесей.

Снижение эффективности извлечения соединений титана при концентрации кислоты 80 % и более можно объяснить процессами термогидролиза высоко концентрированных растворов оксисульфата титана и выпадением гидроокиси титана в осадок вместе с частицами гипса и непрореагировавшей руды. Пониженная эффективность извлечений титана 50 %-ной серной кислотой обусловлено наличием в составе минерала химически неактивных соединений титана, приоритетно в форме диоксида титана рутильной модификации.

При варьировании соотношения титанита и кислоты можно контролировать количество свободной серной кислоты, а значит, и количество образующегося по реакции (2) сульфата алюминия. Данный технологический ход позволит регулировать процентное содержание модифицирующей добавки соединений титана в составе комплексного коагулянта. Согласно данным различных источников, содержание добавки должно находиться в диапазоне 2,5–20 % мас.

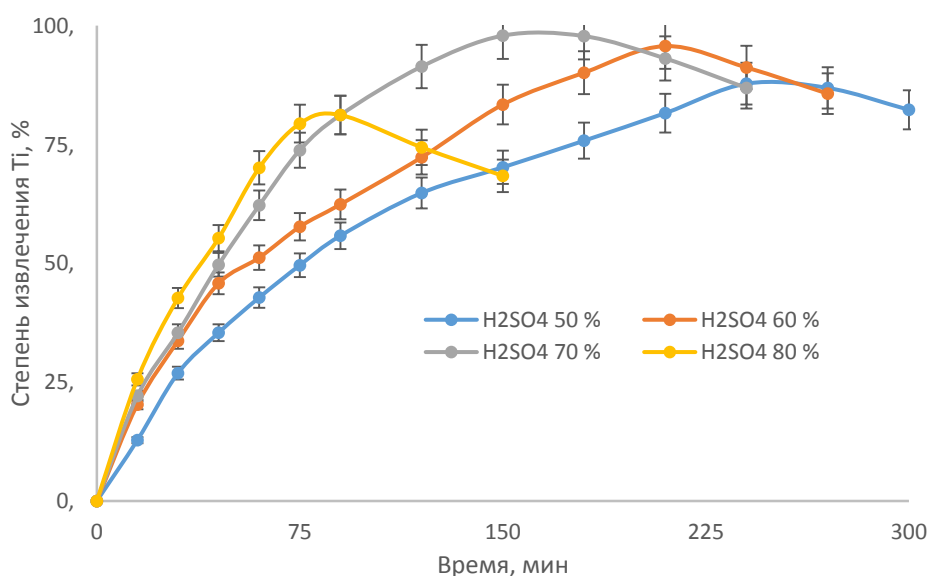
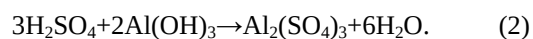


Рис. 1. Степень извлечения Ti при сульфатизации титанита 50–80%-й H₂SO₄

Fig. 1. Degree of Ti extraction during titanite sulfatization with 50–80% H₂SO₄

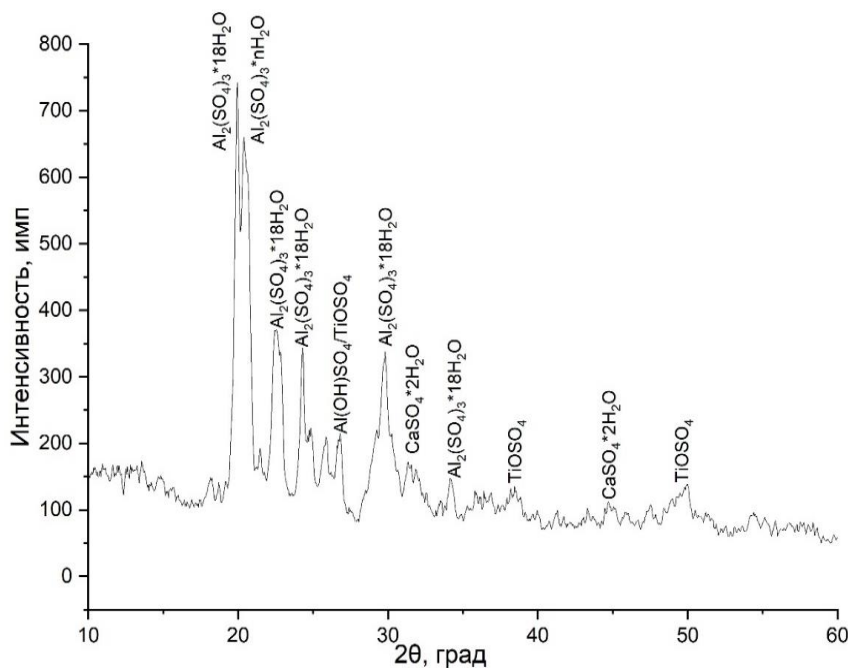


Рис. 2. Дифрактограмма образца комплексного титансодержащего коагулянта
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of a complex titanium-containing coagulant sample

Принимая во внимание тот факт, что наиболее стабильная форма сульфата алюминия – 18-водный кристаллогидрат, образовавшийся ангидрид сульфата алюминия будет поглощать необходимую влагу из раствора. Так, количество поглощаемой из раствора влаги колеблется от 0,8 до 1,5 граммов на 1 грамм образующегося ангидрида сульфата алюминия.

Фазовый состав коагулянта, полученного методом химической дегидратации, представлен на рис. 2.

На основании данных дифрактограммы (рис. 2) можно сделать вывод, что преобладающей фазой в составе комплексного титансодержащего коагулянта является сульфат алюминия в форме 14–18-водного кристаллогидрата. Соединения титана присутствуют в форме оксисульфата титана, а значит, растворимы в воде и способны к реакциям гидролиза и коагуляции. Данные по влиянию исходного соотношения титанита и серной кислоты на содержание активной добавки оксисульфата титана в составе комплексного коагулянта представлены в табл. 2.

Исходя из анализа данных табл. 2 было выяснено, что варьирование соотношения Т:Ж позволяет получать образцы комплексных коагулянтов с оптимальным содержанием добавки соединений титана. В качестве оптимального соотношения Т:Ж было выбрано 1:4, а полученный продукт содержал 5 % водорастворимого оксисульфата титана.

Заключительным этапом экспериментов стала оценка коагуляционной эффективности полученного образца комплексного титансодержащего реа-

гента (КТК) в процессах очистки сточных вод. Данные по остаточным концентрациям взвешенных веществ в сточной воде до и после очистки представлены табл. 3.

Таблица 2. Фазовый состав образцов комплексных титансодержащих коагулянтов при различных значениях Т:Ж

Table 2. Phase composition of samples of complex titanium-containing coagulants at different S:V values

Титанит: H ₂ SO ₄ Titanite: Sulfur acid	Состав комплексного коагулянта Complex coagulant composition, %		
	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	TiOSO ₄ (TiO ₂)	CaO/SiO ₂
1:3	83,2	13,9 (6,95)	2,9
1:4	88,3	9,7 (4,85)	2,0
1:5	90,9	7,5 (3,75)	1,6
1:6	92,6	6,1 (3,05)	1,3
1:7	93,8	5,1 (2,55)	1,1
1:8	94,7	4,4 (2,2)	0,9
1:9	95,3	3,9 (1,95)	0,8
1:10	95,8	3,5 (1,75)	0,7
1:11	96,2	3,1 (1,55)	0,7

Приведенные данные (табл. 3) демонстрируют, что применение комплексного коагулянта позволяет не только сократить его расход на 25–35 %, но и добиться минимальных остаточных концентраций взвешенных веществ в очищенной воде. Для всех исследуемых систем комплексный титансодержащий реагент показал высокую эффективность и превзошел традиционный реагент – сульфат алюминия.

Таблица 3. Концентрации взвешенных веществ до и после очистки воды

Table 3. Concentrations of pollutants before and after water treatment

Реагент Reagent	Доза коагулянта, мг(МехОγ)/дм³ Coagulant dose, mg(МехОγ)/dm³							Время седиментации шлама, сек Sedimentation time, sec
	Исходная вода Wastewater	10	20	30	40	50	60	
Сточная вода с установок газоочистки обогатительного участка Wastewater from gas purification units of the enrichment area								
КТК Complex coagulant	1890	1170	360	42	5,6	5,5	5,5	360
Сульфат алюминия Aluminum sulfate	1890	1480	950	420	116	59	23	540
Атмосферные стоки с промышленной площадки предприятия Atmospheric effluents from the industrial site of the enterprise								
КТК Complex coagulant	148	34	5,2	1,1	1,0	1,0	0,9	120
Сульфат алюминия Aluminum sulfate	148	69	37,5	14,8	6,1	5,8	5,7	180
Сточные воды с участка отмывки и нейтрализации фосфогипса Wastewater from the phosphogypsum washing and neutralization area								
КТК Complex coagulant	1360	980	684	326	54	10,2	10,1	600
Сульфат алюминия Aluminum sulfate	1360	1140	759	387	145	52	29,6	780

Помимо снижения содержания взвешенных веществ в процессе очистки сточной воды участка нейтрализации и отмывки фосфогипса, было зафиксировано значительное снижение концентрации фосфат-аниона, при этом комплексный реагент был в среднем на 10–15 % эффективнее сульфата алюминия [9].

Важно отметить, что применение комплексного титаносодержащего реагента также позволило существенно сократить время седиментации коагуляционных шламов (20–30%-е ускорение седиментации), что в свою очередь обеспечит увеличение эффективности очистного оборудования и сокращение его габаритов.

Повышенную эффективность комплексных титаносодержащих коагулянтов можно объяснить протекающими процессами поликонденсации (полимеризации) продуктов гидролиза соединений титана, оказывающими флокулирующее действие. Не менее весомый вклад вносит процесс нейтрализации положительно заряженных частиц гидроксида алюминия отрицательно заряженными соединениями титана (зародышеобразование), что приводит к потере агрегативной и седиментативной устойчивости дисперсной системы, образованию первичных мицелл и интенсивной коагуляции [23, 24]. Также необходимо отметить, что соединения титана способны к адсорбции загрязняющих веществ на своей поверхности [24].

Очищенная вода может быть использована для обеспечения оборотного водоснабжения предприятия, что будет иметь выраженный экономический эффект [25]. Образующийся коагуляционный шлам, с учетом типа удаляемых загрязняющих веществ (нерастворимые малоопасные оксиды крем-

ния, алюминия, железа или кальция), может быть эффективно переработан с получением чистых соединений диоксида титана или вовлечен в промышленное применение в качестве компонента строительных смесей [14, 24]. Вопрос промышленного применения коагуляционных шламов в строительной промышленности будет актуальным при очистке больших объемов сточных вод, загрязненных преимущественно диоксидом кремния (цементная, строительная промышленность, водоподготовка речной воды и пр.).

Заключение

На основании экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Переработка титанитового (сфенового) концентрата гидрометаллургическим способом позволяет получать сернокислые титаносодержащие растворы, которые могут быть использованы в качестве прекурсора для синтеза комплексных титаносодержащих коагулянтов. Установлено, что степень извлечения соединений титана достигает 90–95 % при сульфатизации титанита 60–70 % серной кислотой.
2. Доказано, что введение в сернокислые растворы гидроксида алюминия позволяет получать ангидрид сульфата алюминия, который поглощает влагу из раствора для образования наиболее стабильной формы 18-водного кристаллогидрата. Предложенный процесс химической дегидратации позволяет получать твердый продукт, исключая процесс сушки, что позволит снизить себестоимость получаемого комплексного титаносодержащего коагулянта

3. Установлено, что основной фазой в составе комплексного титансодержащего коагулянта являются кристаллогидраты сульфата алюминия, а модифицирующая добавка соединений титана находится в форме оксисульфата титана.
4. Установлено, что, варьируя соотношение титаниа и серной кислоты на стадии вскрытия сырья, возможно получение образцов комплексных титансодержащих коагулянтов с различным содержанием модифицирующей добавки соединений титана (1–14 мас. %). Оптимальным соотношением Т:Ж было выбрано 1:4, при этом содержание модифицирующей добавки соединений титана составило около 5 мас. %.
5. Подтверждена повышенная эффективность комплексного титансодержащего реагента в процессах очистки сточных вод от взвешенных веществ. Применение инновационного реагента в сравнении с традиционным сульфатом алюминия позволяет на 25–35 % снизить расход коагулянтов, повысить эффективность очистки воды, минимизировать остаточные концентрации загрязняющих веществ, а также увеличить скорость седиментации коагуляционных шламов. Полученный осадок может быть использован в качестве компонента строительных смесей или переработан в титансодержащее сырье.
6. Разработка технологии вовлечения техногенного сырья в процессы получения новых, высокоэффективных реагентов для процессов инженерной защиты окружающей среды позволит не только снизить уровень негативного воздействия на окружающую среду, но и сделать шаг к реализации концепции Zero Waste в рамках экономики замкнутого цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Towards a green industry through cleaner production development / V.H. de Mello Santos, T.L.R. Campos, M. Espuny, O.J. de Oliveira // *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*. – 2022. – Vol. 29. – P. 349–370.
2. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices // *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* – 2018. – Vol. 118. – № 8. – P. 825–844.
3. Radiological aspects of red mud disaster in Hungary / T. Kovács, Z. Sas, V. Jobbágy, A. Csordás, G. Szeiler, J. Somlai // *Acta Geophysica*. – 2013. – Vol. 61 (4). – P. 1026–1037.
4. Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурина Л.В. Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. – М.: «АСВ», 2008. – 271 с.
5. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. – М.: Науч. изд., 2005. – 576 с.
6. Оптимизация процесса получения отвержденных форм алюмокремниевого флокулянта-коагулянта для применения в очистке сточных вод / М.Г. Гордиенко, Н.Е. Кручинина, Е.Н. Кузин, А.А. Войновский // *Безопасность в техносфере*. – 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 21–25.
7. Gan Y., Zhang L., Zhang S. The suitability of titanium salts in coagulation removal of micropollutants and in alleviation of membrane fouling // *Water Research*. – 2021. – Vol. 205. – № 117692.
8. Coagulation performance of titanium tetrachloride for Alor Pongsu wastewater treatment / T.Y. Wern, R. Ardani, S.F. Ramil et al. // *AIP Conf Proceeding*. – 2020. – Vol. 2267. – № 020073.
9. Jeon K.J., Kim J.H., Ahn J.H. Phosphorus removal characteristics of titanium salts compared with aluminum salt // *Water environment research*. – 2017. – Vol. 89. – № 8. – P. 739–743.
10. Enhanced algae removal by Ti-based coagulant: comparison with conventional Al- and Fe-based coagulants / J. Xu, Y. Zhao, B. Gao, Q. Zhao // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – Vol. 25. – № 13. – P. 13147–13158.
11. Surface water treatment benefits from the presence of algae: influence of algae on the coagulation behavior of polytitanium chloride / Y. Zhao, H. Lian, C. Tian et al. // *Front. Environ. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 15. – № 58. – P. 1–13.
12. Potential of titanium coagulants for water and wastewater treatment: current status and future perspectives. / Y. Gan, J. Li, Z. Li et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – № 126837. – P. 1–17.
13. Thomas M., Bąk J., Królikowska J. Efficiency of titanium salts as alternative coagulants in water and wastewater treatment: Short review // *Desalination and Water Treatment*. – 2020. – Vol. 208. – P. 261–272.
14. Preparation and characterization of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by TiCl₄ flocculation with FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ and Ca(OH)₂ coagulant aids in wastewater / H. Shon, S. Vigneswaran, J. Kandasamy et al. // *Sep. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. 44. – P. 1525–1543.
15. Кузин Е.Н. Титансодержащие коагулянты в процессах очистки хозяйственно-бытовых сточных вод // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2020. – № 4 (84). – С. 16–23.
16. Izmailova N.L., Lorentson A.V., Chernoberezhskii Y.N. Composite coagulant based on titanyl sulfate and aluminum sulfate // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2015. – Vol. 88. – P. 458–462.
17. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry / E. Kuzin, Y. Averina, A. Kurbatov, N. Kruchinina, V. Boldyrev // *Processes*. – 2022. – Vol. 10. – № 440. – P. 1–10.
18. Получение титаносиликатного ионообменника, технические свойства, сорбция двухзарядных катионов / Л.Г. Герасимова, Е.С. Щукина, М.В. Маслова, В.В. Семушин // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2021. – Т. 64. – № 8. – С. 115–122.
19. Gerasimova L.G., Maslova M.V., Shchukina E.S. Synthesis of sorption materials from low grade titanium raw materials // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – № 5. – P. 1–21.

20. Gerasimova L.G., Shchukina E.S., Kiselev Yu.G. Preparation of functional materials from raw materials with a low amount of titanium // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 56. – № 5. – P. 908–914.
21. The effect of heavy metal ions hydration on their sorption by a mesoporous titanium phosphate ion-exchanger / M. Maslova, V. Ivanenko, N. Yanicheva, L. Gerasimova // *Journal of Water Process Engineering*. – 2020. – Vol. 35. – P. 101233.
22. Кузин Е.Н. Применение метода атомно-эмиссионной спектроскопии с СВЧ (магнитной) плазмой в процессах идентификации химического состава отходов сталеплавильного производства // *Черные металлы*. – 2022. – № 10. – С. 79–82.
23. Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 309 с.
24. Shon H., Vigneswaran S., Kim I.S. Preparation of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by titanium tetrachloride (TiCl₄) flocculation of wastewater // *Environ. Sci. Technol.* – 2007. – Vol. 41. – P. 1372–1377.
25. Development and design of a closed water use cycle / J.M. Averina, G.E. Kaliakina, D.Y. Zhukov, A.Y. Kurbatov, V.S. Shumova // 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019). – Varna, Bulgaria, 2019. – Vol. 19. – № 3.1. – P. 145–152.

Информация об авторах

Евгений Николаевич Кузин, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1. kuzin.e.n@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>

Андрей Борисович Фадеев, аспирант кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1. fadeev89@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8188-5079>

Поступила в редакцию: 28.02.2024

Поступила после рецензирования: 07.03.2024

Принята к публикации: 14.03.2024

REFERENCES

1. De Mello Santos V.H., Campos T.L.R., Espuny M., De Oliveira O.J. Towards a green industry through cleaner production development. *Environmental science and pollution research international*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 349–370.
2. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, vol. 118, no. 8, pp. 825–844.
3. Kovács T., Sas Z., Jobbágy V. Radiological aspects of red mud disaster in Hungary. *Acta Geophysica*, 2013, vol. 61, pp. 1026–1037.
4. Draginsky V.L., Alekseeva L.P., Getmantsev S.V. *Coagulation in the natural water treatment technology*. Moscow, Nauchnoe Izdatelstvo Publ., 2005. 576 p. (In Russ.).
5. Getmantsev S.V., Nechaev I.A., Gandurina L.V. *Purification of industrial wastewater with coagulants and flocculants*. Moscow, ASV Publ. House, 2008. 271 p. (In Russ.).
6. Gordienko M.G., Kruchinina N.E., Kuzin E.N., Voynovsky A.A. Process optimization of obtaining solidified forms of aluminosilicic flocculant-coagulant for application in wastewater treatment. *Environmental safety*, 2012, vol. 1, no. 4, pp. 21–25. (In Russ.).
7. Gan Y., Zhang L., Zhang S. The suitability of titanium salts in coagulation removal of micropollutants and in alleviation of membrane fouling. *Water research*, 2021, vol. 205, no. 117692.
8. Wern T.Y., Ardani M.R., Ramli S.F., Rezan S.A., Aziz H.A., Ibrahim I. Coagulation performance of titanium tetrachloride for Alor Pongsu wastewater treatment. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2267, no. 020073.
9. Jeon K.J., Kim J.H., Ahn J.H. Phosphorus removal characteristics of titanium salts compared with aluminum salt. *Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation*, 2017, vol. 89, no. 8, pp. 739–743.
10. Xu J., Zhao Y., Gao B., Zhao Q. Enhanced algae removal by Ti-based coagulant: comparison with conventional Al- and Fe-based coagulants. *Environmental science and pollution research international*, 2018, vol. 25, no. 13, pp. 13147–13158.
11. Zhao Y., Lian H., Tian C., Li H., Xu W., Phuntsho S., Shih K. Surface water treatment benefits from the presence of algae: Influence of algae on the coagulation behavior of polytitanium chloride. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, vol. 15, no. 58, pp. 1–13.
12. Gan Y., Li J., Zhang L., Wu B., Huang W., Li H., Zhang S. Potential of titanium coagulants for water and wastewater treatment: current status and future perspectives. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 406, no. 126837, pp. 1–17.
13. Thomas M., Bak J., Królikowska J. Efficiency of titanium salts as alternative coagulants in water and wastewater treatment: short review. *Desalination and Water Treatment*, 2020, vol. 208, pp. 261–272.
14. Shon H.K., Vigneswaran S., Kandasamy J., Zareie M., Kim J.B., Cho D., Kim J. Preparation and characterization of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by TiCl₄ flocculation with FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ and Ca(OH)₂ coagulant aids in wastewater. *Separation Science and Technology*, 2009, vol. 44, pp. 1525–1543.
15. Kuzin E.N. Titanium-based coagulants in domestic wastewater treatment. *Water and Ecology*, 2020, vol. 4, no. 84, pp. 16–23. (In Russ.).
16. Izmailova N.L., Lorentson A.V., Chernoberezhskii Y.N. Composite coagulant based on titanyl sulfate and aluminum sulfate. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2015, vol. 88, pp. 458–462.
17. Kuzin E., Averina Y., Kurbatov A., Kruchinina N., Boldyrev V. Titanium-containing coagulants in wastewater treatment processes in the alcohol industry. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 440, pp. 1–10.

18. Gerasimova L.G., Shchukina E.S., Maslova M.V., Semushin V.V. Obtaining titanosilicate ion-exchanger, technical properties, sorption of doubly charged cations. *ChemChemTech*, 2021, vol. 64, no. 8, pp. 115–122. (In Russ.).
19. Gerasimova L.G., Maslova M.V., Shchukina E.S. synthesis of sorption materials from low grade titanium raw materials. *Materials*, 2022, vol. 15 (5), no. 1922, pp. 1–21.
20. Gerasimova L.G., Shchukina E.S., Kiselev Y.G. Preparation of functional materials from raw materials with a low amount of titanium. *Theor Found Chem Eng*, 2022, vol. 56, pp. 908–914.
21. Maslova M., Ivanenko V., Yanicheva N., Gerasimova L. The effect of heavy metal ions hydration on their sorption by a mesoporous titanium phosphate ion-exchanger. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, vol. 35, no. 101233.
22. Kuzin E.N. Application of the method of atomic emission spectroscopy with microwave (magnetic) plasma in the processes of identifying the chemical composition of steelmaking waste. *Chernye Metally*, 2022, vol. 10, pp. 79–82. (In Russ.).
23. Shabanova N.A., Popov V.V., Sarkisov P.D. *Chemistry and technology of nanodispersed oxides*. Moscow, IKTs Akademkniga Publ., 2007. 309 p. (In Russ.).
24. Shon H.K., Vigneswaran S., Kim I.S., Cho J., Kim G.J., Kim J.B., Kim J.H. Preparation of titanium dioxide (TiO₂) from sludge produced by titanium tetrachloride (TiCl₄) flocculation of wastewater. *Environmental science & technology*, 2007, vol. 4, no. 4, pp. 1372–1377.
25. Averina J.M., Kaliakina G.E., Zhukov D.Y., Kurbatov A.Y., Shumova V.S. Development and design of a closed water use cycle. *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019)*. Varna, Bulgaria, 2019. Vol. 19, no. 3.1, pp. 145–152.

Information about the authors

Evgenii N. Kuzin, Cand. Sc., Associate Professor, D. Mendeleev University of Chemical Technology, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. Kuzin.e.n@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>;

Andrey B. Fadeev, Postgraduate Student, D. Mendeleev University of Chemical Technology, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. fadeev89@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8188-5079>

Received: 28.02.2024

Revised: 07.03.2024

Accepted: 14.03.2024

УДК 621.310.311

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423

Шифр специальности ВАК: 05.14.01

Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства

И.У. Рахмонов^{1✉}, В.Я. Ушаков², А.М. Нажимова³, К.К. Обидов⁴, С.Р. Сулейманов⁵

¹ Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, г. Ташкент

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

³ Каракалпакский государственный университет, Узбекистан, г. Нукус

⁴ «ТИИИМСХ» НИУ Бухарский институт управления природными ресурсами, Узбекистан, г. Бухара

⁵ Научно-производственная компания КазТехАвтоматика, Казахстан, г. Темиртау

✉ ilider1987@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена важностью минимизации потребления электроэнергии на промышленных предприятиях с непрерывным характером производства с учетом особенностей технологических процессов на них и требований сохранения объема выпускаемой ими продукции. *Цель:* решить задачу минимизации потребления электрической энергии на основе математической модели и градиентного метода в условиях оптимального планирования объема продукции, выпускаемой на промышленными предприятиями с непрерывным характером производства; разработать математическую модель оптимального распределения продукции за цикл времени (месяц, квартал, год) по цехам с учетом простых и функциональных ограничений, исходя из условия обеспечения минимального потребления электроэнергии на промышленных предприятиях с непрерывным характером производства. *Методы.* При разработке математической модели обеспечения минимального потребления электроэнергии при сохранении объема производимой продукции применены классические методы оптимизации Лагранжа, а с целью обеспечения достаточной точности расчета – итерационные методы. Для рассматриваемой задачи предполагалась и установлена погрешность расчета на уровне $\varepsilon=0,1$. Известно, что выбор значения погрешности расчета зависит от особенностей решаемой задачи и лица, принимающего решение. Для проверки адекватности разработанной модели был использован метод отыскания относительного экстремума функции нескольких переменных. *Результаты.* Использование математической модели, учитывающей характер технологического процесса и граничные условия в простой и интегральной форме, показало целесообразность оптимального планирования электропотребления предприятием. Эффективность разработанных подходов проверена на примере металлургического предприятия как промышленного предприятия с непрерывным характером производства при решении задачи минимизации расхода электроэнергии на продукцию, производимую в течение отчетного периода. Использование предложенной модели позволило снизить годовое потребление электроэнергии на 2,5 % при сохранении неизменным объема производства продукции. Один из классических методов оптимизации – метод отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных – при проверке показал практически такие же результаты. Это еще одно свидетельство адекватности предложенной модели.

Ключевые слова: технологический процесс, электропотребление, продукция, оптимизация, минимизация, метод Лагранжа, функциональные ограничения, математический модель, планирование, непрерывный режим работы, адекватность

Для цитирования: Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, А.М. Нажимова, К.К. Обидов, С.Р. Сулейманов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423

UDC 621.310.311

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423

Mathematical modeling of minimization of electricity consumption by industrial enterprises with continuous production

I.U. Rakhmonov^{1✉}, V.Ya. Ushakov², A.M. Najimova³, K.K. Obidov⁴, S.R. Suleimanov⁵

¹ Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Karakalpak State University, Nukus, Uzbekistan

⁴ "TIIAME" NRU Bukhara Institute of Natural Resources Management, Bukhara, Uzbekistan

⁵ Research and production company KazTechAutomatics, Temirtau, Kazakhstan

✉ ilider1987@asu.ru

Abstract. Relevance. Determined by the importance of minimizing electrical power consumption in industrial enterprises with continuous production, considering the specific characteristics of their technological processes and the requirements to maintain the output volume of their products. **Aim.** To solve the task of minimizing electrical power consumption based on a mathematical model and gradient method under optimal planning of the production volume of the industrial enterprises with continuous production; to develop a mathematical model for optimal distribution of production over a time cycle (month, quarter, year) across departments, taking into account both simple and functional constraints, derived from the condition of ensuring minimal electrical power consumption in industrial enterprises with continuous production. **Methods.** When developing the mathematical model for ensuring minimal electrical power consumption while preserving the production volume, classic Lagrange optimization methods were used. To ensure sufficient calculation accuracy, iterative methods were also applied. For the task under consideration, a calculation error margin of $\epsilon=0,1$ was assumed and established. It is known that the choice of calculation error margin depends on the specifics of the problem at hand and the decision-maker. To verify the adequacy of the developed model, the method of finding the relative extremum of a function of several variables was used. **Results.** The use of the mathematical model, which takes into account the nature of the technological process and boundary conditions in both simple and integral forms, demonstrated the feasibility of optimal planning of electrical power consumption by the enterprise. The effectiveness of the developed approaches was verified using a metallurgical enterprise as an example of an industrial enterprise with continuous production, in solving the task of minimizing electrical power consumption for products produced during the reporting period. The use of the proposed model allowed for a reduction in annual electrical power consumption by 2.5% while maintaining the same production volume. One of the classic optimization methods – the method of finding the relative extremum of functions of several variables – showed almost identical results upon verification. This serves as further evidence of the adequacy of the proposed model.

Keywords: technological process, power consumption, products, optimization, minimization, Lagrange method, functional limitations, mathematical model, planning, continuous production, adequacy

For citation: Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Najimova A.M., Obidov K.K., Suleimanov S.R. Mathematical modeling of minimization of electricity consumption by industrial enterprises with continuous production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423

Введение

Повышение эффективности использования электроэнергии на промышленных предприятиях с непрерывным характером производства (ППНХП) требует выполнения системы мероприятий, в том числе специальных [1, 2]. К универсальным, наиболее общим, мероприятиям обычно относят следующие:

- учёт и контроль расхода электроэнергии;
- составление электробалансов отдельных электропотребляющих машин и агрегатов, цехов и предприятия в целом;
- нормирование электропотребления;

- разработка и реализация конкретных мероприятий по рациональному использованию электроэнергии.

Одним из путей повышения энергоэффективности работы промышленных предприятий является минимизация расхода ими электроэнергии при сохранении объёма выпускаемой продукции за рассматриваемый период. Минимизации расхода электроэнергии можно добиться привлечением потребителей; в рассматриваемом случае – ППНХП на административно-экономической основе [3].

В [4–6] предложена следующая технология реализации потенциала энергосбережения и повышения энергоэффективности (ЭС и ПЭЭ) на ППНХП:

- разработка новых методов и технических решений по снижению энергетических затрат;
- оптимизация расхода топлива, электрической и тепловой энергии в основных технологических процессах промышленного производства с использованием современных технических средств учёта, контроля и управления;
- разработка методов экспериментальных исследований и измерений на действующем оборудовании ППНХП;
- составление математических моделей параметров управления режимами энергопотребления, обеспечивающих минимум энергетических затрат.

В связи с этим на основе выполненного анализа современного состояния управления потреблением электроэнергии промышленными предприятиями можно сделать вывод, что целесообразным является разработка и использование специально созданной для этой цели математической модели.

Результаты исследования

При решении задач реализации потенциала ЭС и ПЭЭ в качестве основных энергетических показателей электропотребления, которые зависят от многих факторов, обычно рассматриваются: потребляемая активная мощность – P , расход электроэнергии – W , удельное электропотребление – d (на единицу произведенной продукции) [7, 8].

Обычно на показатели электропотребления наибольшее влияние оказывает объём и номенклатура выпускаемой продукции за расчётный период (Π). В математических моделях это влияние описывается выражением $P=f(\Pi)$ [9]. При выпуске нескольких видов продукции учитываются их объём и доля каждого вида в общем выпуске продукции, а также режим работы оборудования при изготовлении каждого вида продукции. Потребляемая мощность определяется для каждого вида продукции. В этих случаях исследования проводятся на основе системного подхода, что позволяет разработать методы оптимизации электрических нагрузок и определить зависимости между режимом работы электрооборудования и его энергетическими показателями [10, 11].

Как известно [12, 13], исследования можно выполнять как на физической модели (на уменьшенном варианте реального объекта), так и на математической модели. В первом случае изучают сам процесс, а во втором исследуют уравнения, описывающие тот или иной процесс. Обычно в таких случаях невозможно аналитическое решение таких уравнений, поэтому с помощью различных приближенных методов уравнения приводят к виду, при котором они могут быть решены.

При оптимизации электропотребления разрабатываются и выполняются энергосберегающие мероприятия, для осуществления которых требуются значитель-

ные финансовые средства. При этом для оценки различных стратегий используются разработанные модели, и при изменении любого параметра с их помощью можно быстро и точно найти новые решения, обеспечивающие оптимальность системы в целом [14–16].

Промышленные предприятия, как правило, располагают информацией по итогам работы в отчетном периоде об объемах произведенной продукции и фактических расходах электроэнергии на каждый вид продукции в соответствии с принятой для производственных подразделений методикой учёта электроэнергии за отчетный период (год, месяц, неделя) [17–19]. Необходимо отметить, что предложенная методика применима для предприятий, выпускающих один тип продукции с различающимися объемами по временным интервалам. На основе этой информации можно нормировать удельный расход электроэнергии по соотношению:

$$d_i = f(\Pi_i) = \frac{W_i}{\Pi_i}, \quad (1)$$

где W_i – расход электроэнергии за отчетный период (год, месяц, неделя), кВтч; d_i – удельный расход электроэнергии за отчетный период (год, месяц, неделя), кВтч/т; Π_i – объём выпускаемой продукции за отчетный период (год, месяц, неделя), т.

Анализ статистических данных об объемах производства и соответствующих им удельных расходах электроэнергии показал, что наилучшим образом связь удельных расходов электроэнергии с объемами производства отражается экспоненциальной зависимостью вида [9]:

$$d_i = f(\Pi_i) = \exp(a_{i0} + a_{i1}\Pi_i), \quad (2)$$

где a_{i0} , a_{i1} – коэффициенты, определяемые для каждой зависимости (для каждого производственного подразделения предприятия).

Таким образом, на уровне производственных подразделений объём потребления электроэнергии можно определять на основе полученных зависимостей (1) по соотношению:

$$W_i = f(\Pi_i) = d_i \Pi_i. \quad (3)$$

Задача состоит в минимизации общего расхода или удельного расхода электроэнергии при ограничивающем условии для объема выпускаемой продукции Π_i , т. е.:

$$W_i = f(\Pi_i) \rightarrow \min \text{ или } d_i = f(\Pi_i) \rightarrow \min.$$

Исходя из особенностей работы оборудования ППНХП, для обеспечения неизменного объёма производства продукции в течение технологического процесса при минимально возможном потреблении электроэнергии задача оптимального распределения

производства готовой продукции в течение отчётного периода (без учета простых и функциональных ограничений) пошагово решается следующим образом [20, 21].

Минимизируется целевая функция, которая представляет собой сумму затрат на электроэнергию при производстве готовой продукции в j -цехах предприятия:

$$W_j = \Pi_j e^{a+b\Pi_j} \rightarrow \min, \quad (4)$$

здесь

$$W_j = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n. \quad (5)$$

Ограничения:

- по балансу готовой продукции, произведённой в цехах предприятия за отчетный период (год, месяц, неделя):

$$\Pi_j = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots + \Pi_n, \quad (6)$$

- по максимальному и минимальному объемам готовой продукции, которая может быть произведена цехом за отчётный период (год, месяц, неделя):

$$\Pi_j^{\min} \leq \Pi_j \leq \Pi_j^{\max}, \quad j \in N. \quad (7)$$

Описанная уравнениями (4)–(7) задача с учетом ограничений минимизируется с помощью функции Лагранжа:

$$\begin{aligned} L &= W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n + \\ &+ \lambda(\Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3 - \dots - \Pi_n) = \\ &= \Pi_1 e^{a+b\Pi_1} + \Pi_2 e^{a+b\Pi_2} + \Pi_3 e^{a+b\Pi_3} + \dots + \Pi_n e^{a+b\Pi_n} + \\ &+ \lambda(\Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3 - \Pi_n), \end{aligned} \quad (8)$$

где λ – неопределенные множители Лагранжа с учётом условия баланса производства готовой продукции в отчетном периоде.

Для обеспечения минимума функции (8) должно выполняться следующее условие:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \Pi_1} &= w_1 - \lambda = (1 + b\Pi_1)e^{a+b\Pi_1} - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \Pi_2} &= w_2 - \lambda = (1 + b\Pi_2)e^{a+b\Pi_2} - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \Pi_3} &= w_3 - \lambda = (1 + b\Pi_3)e^{a+b\Pi_3} - \lambda = 0; \\ &\dots\dots \\ \frac{\partial L}{\partial \Pi_n} &= w_n - \lambda = (1 + b\Pi_n)e^{a+b\Pi_n} - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \Pi - \Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3 - \dots - \Pi_n = 0, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

где $w_i = \frac{\partial W_i}{\partial \Pi_j}$ – относительный прирост потребления

электроэнергии j -го цеха при производстве готовой продукции Π_j за отчетный период,

Из системы (9) видно что, значения λ равны:

$$\lambda = (1 + b\Pi_j)e^{a+b\Pi_j}.$$

Для решения системы уравнений значения λ находим по минимальным значениям объема продукции, т. е.

$$\lambda = (1 + b\Pi_j)e^{a+b\Pi_{\min}}.$$

Тогда для определения значения Π_i имеем трансцендентные уравнения вида

$$f(\Pi_i) = \lambda - (1 + b\Pi_j)e^{a+b\Pi_i} = 0. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) применим метод итерации.

С учетом (10) уравнение имеет следующий вид:

$$\Pi_j = \frac{\lambda}{b} e^{-(a+b\Pi_i)} - \frac{1}{b}.$$

Значения Π_i из (4) определяются методом итерации.

Таким образом, для обеспечения минимума потребления электроэнергии в процессе производства готовой продукции необходимо выполнять условия, записанные в виде (6), (7).

В частных случаях, т. е. с учетом всех условий, приведенных в (8), получаем:

$$\left. \begin{aligned} w_n &= -\lambda_i, \quad i \in N; \\ \Pi - \sum_{i=1}^n \Pi_i &= 0, \end{aligned} \right\}.$$

Это означает, что при сохранении баланса готовой продукции равенство относительного прироста расхода электроэнергии i -го цеха при производстве продукции Π_j за рассматриваемый отчетный период является критерием минимального потребления электроэнергии [22, 23].

Для проверки правильности сформулированных выше выводов рассмотрена задача обеспечения минимального расхода электроэнергии на готовую продукцию, производимую промышленными предприятиями с непрерывным характером производства в течение отчетного периода. В связи с тем, что потребление электроэнергии на предприятии пропорционально удельной стоимости продукции, рекомендуется использовать стоимостные характеристики вместо характеристик электропотребления

$$\Pi_j = \frac{\lambda}{b} e^{-(a+b\Pi_i)} - \frac{1}{b}.$$

Значения Π_i определяются с помощью метода итерации.

Таким образом, для обеспечения минимума потребления электроэнергии в процессе производства готовой продукции необходимо выполнять условия, записанные в виде (6)–(8).

В частных случаях, т. е. с учетом всех условий, приведенных в (8), получаем:

$$\left. \begin{aligned} w_n &= -\lambda_j, \quad i \in N \\ \Pi - \sum_{i=1}^n \Pi_j &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Это означает, что при сохранении баланса готовой продукции равенство относительного прироста расхода электроэнергии j -го цеха при производстве продукции Π за рассматриваемый период является критерием минимального потребления электроэнергии.

Для подтверждения сформулированных выше выводов рассмотрена задача обеспечения минимального расхода электроэнергии на производство продукции на ППНХП в течение отчетного периода по подразделениям предприятия (по цехам). Коэффициенты, определенные по уравнениям (2) и (3), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты, характеризующие расход электроэнергии по подразделениям предприятия (по цехам), определенные по уравнениям (2) и (3)

Table 1. Coefficients, characterizing electrical power consumption by divisions of the enterprise (by workshops), determined according to equations (2) and (3)

Подразделения (цех)/Divisions (workshop)	a_0	a_1
№ 1	3,0092	0,0041
№ 2	3,0067	0,0043
№ 3	2,9663	0,0043

Введен ряд ограничений в соответствии с уравнениями (6) и (7):

- по балансу готовой продукции, произведённой предприятием за год:

$$\sum_{k=1}^{\text{IV}} \Pi_j = \Pi_1' + \Pi_2' + \Pi_3' + \dots = 854;$$

- плановые обязательства по объёму производимой продукции, принятые предприятием (табл. 2).
- ограничения по максимальному и минимальному объемам продукции, произведённой в цехах предприятия по кварталам имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{цех № 1:} & \quad 67 \leq \Pi_1 \leq 81 \\ \text{цех № 2:} & \quad 69 \leq \Pi_2 \leq 82 \\ \text{цех № 3:} & \quad 65 \leq \Pi_3 \leq 75. \end{aligned}$$

Таблица 2. Плановые значения выпуска готовой продукции ППНХП

Table 2. Planned output values of finished products of the industrial enterprises of continuous production (IECP)

Кварталы/Quarters	1	2	3	4	Сумма/Total
$\Pi_{\text{план, т}}/\Pi_{\text{plan, t}}$	210	241	201	202	854

Здесь граничные условия для каждого цеха заранее заданы руководством предприятия, а минимальные и максимальные значения определяются спецификой технологического процесса. Например, сокращение производства до минимального значения нецелесообразно с экономической точки зрения, а увеличение его выше максимального значения ограничено возможностями предприятия (или цеха).

Ежеквартальный план по выпуску продукции и соответствующая ему потребляемая электроэнергия приведены в табл. 3.

Таблица 3. Ежеквартальный план производства продукции и потребление электроэнергии предприятием

Table 3. Quarterly plan for production and electrical power consumption by the enterprise

Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
Объём произведённой продукции, $\Pi_{\text{план, т}}$ Volume of produced products, $\Pi_{\text{plan, t}}$	210	241	201	202	854
Расход электроэнергии на производство продукции, $W_{\text{план, } 10^4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}}$ Electrical power consumption for production, $W_{\text{plan, } 10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}}$	81,69	93,749	78,189	78,578	332,21

Поквартальное изменение в течение года потребления электроэнергии и объёма произведённой продукции на предприятии чёрной металлургии с непрерывным характером производства показано в табл. 4.

Видно, что при незначительном изменении объёма производимой продукции в течение года наблюдаются значительные изменения объёма потреблённой электроэнергии. При сохранении годового объёма готовой продукции минимальное потребление электроэнергии в месяц составляет $324,03 \cdot 10^6$ кВт·ч, а различие между плановым и оптимальным годовым потреблением электроэнергии составляет $8,176 \cdot 10^6$ кВт·ч. Годовое потребление электроэнергии уменьшается на 2,5 % при сохранении объемов производства продукции, т. е.

условия ограничения по максимальному и минимальному объемам продукции, произведённой в цехах предприятия за год по кварталам в разрезах цехов, выполняются. Результаты исследования подтверждают адекватность предложенной модели.

Таблица 4. Поквартальное изменение выпуска готовой продукции и потребления электроэнергии

Table 4. Quarterly changes in finished product output and electrical power consumption

Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
$P_{\text{план}}, \text{т}/P_{\text{план}}, \text{t}$	210	241	201	202	854
$P_{\text{оптим.}}, \text{т}/P_{\text{оптим.}}, \text{t}$	205	238	201	210	854
Разница в объемах произведенной продукции, т Difference in volume of products, t	5	3	0	-8	0
$W_{\text{план}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{план}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	81,69	93,749	78,189	78,578	332,21
$W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	80,01	83,84	79,57	80,61	324,03
Разница в объемах потребления ЭЭ, $10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ Difference in electrical power consumption volumes, $10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	1,68	9,909	-1,381	-2,032	8,176

Результаты подобного сравнения, но в разрезе цехов (на примере трех цехов), приведены в табл. 5.

Таблица 5. Изменение по кварталам выпуска готовой продукции и потребления электроэнергии в разрезе цехов

Table 5. Quarterly changes in the output of finished products and electrical power consumption by workshop division

Подразделения (цехи) Divisions (workshops)	Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
№ 1	$P_{\text{оптимал.}}, \text{т}$ $P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	70	81	67	69	287
	$W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	27,01	28,26	26,68	26,90	109
№ 2	$P_{\text{оптимал.}}, \text{т}$ $P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	69	82	69	75	295
	$W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	27,21	28,77	27,21	27,92	111
№ 3	$P_{\text{оптимал.}}, \text{т}$ $P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	66	75	65	66	272
	$W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	25,79	26,81	25,68	25,79	104

В табл. 6 достоверность полученных результатов и сделанных на их основе выводов подтверждена сравнением с результатами, полученными методом отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных [24, 25].

Таблица 6. Сравнение полученных результатов методом отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных

Table 6. Comparison of results obtained by the method of finding the relative extremum of functions of several variables

Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
Результаты, полученные разработанным авторами методом Results obtained by the method developed by the authors					
$P_{\text{оптим.}}, \text{т}/P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	204	238	202	210	854
$W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	80,01	83,84	79,57	80,61	324,03
Результаты, полученные методом, предложенным в [24, 25] Results obtained by the method proposed in [24, 25]					
$P_{\text{оптим.}}, \text{т}/P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	205	238	201	210	854
$W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	79,86	83,84	80,52	80,61	324,83
Разница в объемах потребления ЭЭ, $10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ Difference in electrical power consumption volumes, $10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	0,15	0	-0,95	0	-0,8

Заключение

Решена задача минимизации потребления электроэнергии на основе математической модели и градиентного метода в условиях оптимального планирования объема продукции, выпускаемой на ППНХП. При разработке математической модели, учитывающей характер технологического процесса и граничные условия в простой и интегральной форме, выявлена целесообразность оптимального планирования электропотребления предприятием.

На основе проведенных расчетно-экспериментальных исследований установлено, что предложенная математическая модель является адекватной, так как обеспечивает минимум потребления электроэнергии. При учете различных видов ограничений она обладает высокими вычислительными качествами. При этом оптимальный объем выпускаемой продукции относится к определенному отрезку времени (месяц, год) при условии строгого соблюдения требований технологического процесса.

Адекватность разработанной модели подтверждена на примере работы металлургического предприятия. При этом выявлено условие минимального потребления электроэнергии. Результаты расчетов по предложенной методике и с применением метода отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных практически совпали. Использование на практике предложенного

авторами метода позволяет сократить годовое электропотребление на $8,176 \cdot 10^6$ кВт·ч, что составит 2,5 % от суммарного объема. Естественно, что при этом должны учитываться основные факторы,

влияющие на потребление электроэнергии на данном конкретном промышленном предприятии, а также граничные условия в простой и интегральной форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zharov V., Tokarenko A. Quantitative assessment of sustainability level of industrial enterprises // BIO Web of Conferences Aquaculture-2023. – 2023. – Vol. 05003. URL: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405003> (дата обращения 15.09.2023).
2. Zakharchenko N., Kosaretskyi Y., Andreichenko A. Methodical provision of assessment of the efficiency of the functioning of a high-tech industrial enterprise on the basis of score-coefficient method // Economic Innovations. – 2023. – Vol. 25. – № 87. – P. 18–26. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.31520/ei.2023.25.2> (дата обращения 15.09.2023).
3. Gayibov T., Reymov K. Optimal planning of short-term modes of power systems with control of loads of electric consumers and taking into account of network factor // European Science Review. – 2017. – Vol. 3. – № 9–10. – P. 86–91.
4. Dinolov O. Energy efficiency of induction motor drives: state of the art, analysis and recommendations // Energies. – 2023. – Vol. 16. – № 7136. URL: <https://doi.org/10.3390/en162071-36> (дата обращения 15.09.2023).
5. Shinkevich A.I. Modeling the efficiency of using digital technologies of energy and resource saving technologies at petrochemical enterprises // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2020. – Vol. 10 (5). – P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.32479/ijeep.9837> (дата обращения 15.09.2023).
6. Yepifanova I.Yu., Dzhedzhula V.V. Modelling of potential level of industrial enterprises // WSEAS Transactions on Environment and Development. – 2022. – Vol. 17. – P. 556–565.
7. The effect of electricity distribution loos, electricity power consumption, electricity intensity on energy consumption in West Africa / A. Mohammed, S. Ismail, F. Roslan, A. Ahmad // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2022. – Vol. 12. – № 5. – P. 361–369. URL: <https://doi.org/10.32479/ijeep.13386> (дата обращения 15.09.2023).
8. Ugolnikov A.V., Makarov N.V. Application of automation systems for monitoring and energy efficiency accounting indicators of mining enterprises compressor facility operation // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 236. – P. 245–248. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.245
9. Гофман И.В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий. – СПб.: Энергия, 1966. – 319 с.
10. Dzhedzhula V., Yepifanova I. Optimization of energy saving potential of industrial enterprises // 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). – 2021. – P. 433–436. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548428.
11. Energy-efficient field-oriented control for induction motors taking into account core losses / G. Khoury, R. Ghosn, F. Khatounian, M. Fadel, M. Tientcheu // Proceedings of the 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control. – Budapest, Hungary, 2018. – P. 543–548.
12. Mokin O., Mokin B., Kryvonis O. Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 2017. DOI: <http://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100504>
13. Maryasin O.Y. Two-stage problem of optimizing smart grid energy consumption at the enterprise // 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency-2022. – Lipetsk, Russian Federation, 2022. – P. 808–813. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973902.
14. Novel sampling-based optimal motion planning algorithm for energy-efficient robotic pick and place / M.M. Alam, T. Nishi, Z. Liu, T.A. Fujiwara // Energies. – 2023. – Vol. 16. – № 6910. – P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.3390/en16196910> (дата обращения 15.09.2023).
15. Maryasin O. Two-stage problem of optimizing smart grid energy consumption at the enterprise. – 2022. – P. 808–813. URL: <https://doi.org/10.1109/SUMMA57301.2022.9973902> (дата обращения 15.09.2023).
16. Chang S.C. Effects of financial developments and income on energy consumption // International Review of Economics and Finance. – 2015. – Vol. 35. – P. 28–40. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iref.2014.08.011> (дата обращения 15.09.2023).
17. Соколов В.К. Задачи оперативной оптимизации производства электроэнергии в условиях рыночных отношений // Электричество. – 2007. – № 1. – С. 2–9.
18. Валь П.В., Попов Ю.П. Концепция разработки системы прогнозирования электропотребления промышленного предприятия в условиях оптового рынка // Промышленная энергетика. – 2011. – № 10. – С. 31–35.
19. Арендателева С.И. Математическое моделирование производственного планирования на малом предприятии // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Прикладная математика». – 2010. – № 2 (17). – С. 97–109.
20. Прогнозирование электропотребления с помощью нейронных сетей с LSTM / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 125–133. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4407
21. Рахмонов И.У., Реймов К.М. Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – № 62 (6). – С. 528–535. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535> (дата обращения 15.09.2023).
22. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry // Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
23. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks // Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055046.
24. Method of integral gradients for searching global extremum of multivariable functions (procedure improvement) / V. Shmukler, V. Babaev, L. Kovalenko, O. Kalmykov, I. Demianenko // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 807. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_7 (дата обращения 15.09.2023).

25. Doroshenko D., Bilichenko R. Understanding of the main ideas and logical reasoning when studying the sequence limit section // Collection of Scientific Papers ЛОГОС. – 2022. – P. 97–100. URL: <https://doi.org/10.36074/logos-16.09.2022.26> (дата обращения 15.09.2023).

Информация об авторах

Икромжон Усмонович Рахмонов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электро-снабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. ilider1987@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Василий Яковлевич Ушаков, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vyush@tpu.ru

Айсулу Махмудовна Нажимова, доктор философии по техническим наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики Каракалпакского государственного университета, Узбекистан, 230100, г. Нукус, ул. Ч. Абдилова, 1. a_najimova@karsu.uz; <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Камолиддин Комилович Обидов, заместитель декана по работе с молодежью гидромелиоративного факультета, Бухарский институт управления природными ресурсами национального исследовательского университета Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Узбекистан, 200100, г. Бухара, шоссе Газлийское, 32. fedika1@mail.ru

Сейдамет Ришадович Сулейманов, директор, Научно-производственная компания КазТехАвтоматика, Казахстан, 101400, г. Темиртау, ул. Сейфуллина, 11. seidamet.s@gmail.com

Поступила в редакцию: 05.10.2023

Поступила после рецензирования: 20.02.2024

Принята к публикации: 14.03.2024

REFERENCES

1. Zharov V., Tokarenko A. Quantitative assessment of sustainability level of industrial enterprises. *BIO Web of Conferences AQUACULTURE-2023*. Vol. 05003. Available at: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405003> (accessed 15 September 2023).
2. Zakharchenko N., Kosaretskyi Y., Andreichenko A. Methodical provision of assessment of the efficiency of the functioning of a high-tech industrial enterprise on the basis of score-coefficient method. *Economic Innovations*, 2023, vol. 25, no. 87, pp. 18–26. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.31520/ei.2023.25.2> (accessed 15 September 2023).
3. Gayibov T., Reymov K. Optimal planning of short-term modes of power systems with control of loads of electric consumers and taking into account of network factor. *European Science Review*, 2017, vol. 3, no. 9–10, pp. 86–91.
4. Dinolov O. Energy efficiency of induction motor drives: state of the art, analysis and recommendations. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 7136. Available at: <https://doi.org/10.3390/en162071-36> (accessed 15 September 2023).
5. Shinkevich A.I. Modeling the efficiency of using digital technologies of energy and resource saving technologies at petrochemical enterprises. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2020, vol. 10 (5), pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.32479/ijeep.9837> (accessed 15 September 2023).
6. Yepifanova I.Yu., Dzhezdzhula V.V. Modelling of potential level of industrial enterprises. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2022, vol. 17, pp. 556–565.
7. Mohammed A., Ismail S., Roslan F., Ahmad A. The effect of electricity distribution loos, electricity power consumption, electricity intensity on energy consumption in West Africa. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2022, vol. 12 (5), pp. 361–369. Available at: <https://doi.org/10.32479/ijeep.13386> (accessed 15 September 2023).
8. Ugolnikov A.V., Makarov N.V. Application of automation systems for monitoring and energy efficiency accounting indicators of mining enterprises compressor facility operation. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 245–248. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.245
9. Goffman I.V. *Rationing of energy consumption and energy balances of industrial enterprises*. Moscow, Energiya Publ., 1966. 319 p. (In Russ.).
10. Dzhezdzhula V., Yepifanova I. Optimization of energy saving potential of industrial enterprises. *11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, 2021. pp. 433–436. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548428.
11. Khoury G., Ghosn R., Khatounian F., Fadel M., Tientcheu M. Energy-efficient field-oriented control for induction motors taking into account core losses. *Proc. of the 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control*, 2018. pp. 543–548.
12. Mokin O., Mokin B., Kryvonis O. Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. DOI: <http://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100504>
13. Maryasin O.Y. Two-stage problem of optimizing smart grid energy consumption at the enterprise. *4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency-2022*. pp. 808–813. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973902.
14. Alam M.M., Nishi T., Liu Z., Fujiwara T. A Novel sampling-based optimal motion planning algorithm for energy-efficient robotic pick and place. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 6910, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16196910> (accessed 15 September 2023).
15. Maryasin O.Yu., Lukashov A.I. Optimizing the daily energy consumption of an enterprise. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022, vol. 857, pp. 370–382.

16. Chang S.C. Effects of financial developments and income on energy consumption. *International Review of Economics and Finance*, 2015, vol. 35, pp. 28–40. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iref.2014.08.011> (accessed 15 September 2023).
17. Sokolov V.K. Problems of operational optimization of electricity production in conditions of market relations. *Electricity*, 2007, no. 1, pp. 2–9. (In Russ.).
18. Val P.V., Popov Yu.P. Concept for developing a system for forecasting power consumption of an industrial enterprise in the conditions of the wholesale market. *Industrial Energy*, 2011, no. 10, pp. 31–35. (In Russ.).
19. Arendateleva S.I. Mathematical modeling of production planning in a small enterprise. *Bulletin of Tver State University. Series "Applied Mathematics"*, 2010, no. 2 (17), pp. 97–109. (In Russ.).
20. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N. Forecasting electricity consumption by LSTM neural network. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 125–133. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4407> (accessed 15 September 2023).
21. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Mathematical models and algorithms of optimal load management of electricity consumers. *Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 528–535. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535> (accessed 15 September 2023).
22. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry. *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
23. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks. *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055046.
24. Shmukler V., Babaev V., Kovalenko L., Kalmykov O., Demianenko I. Method of integral gradients for searching global extremum of multivariable functions (procedure improvement). *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, vol. 807. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_7 (accessed 15 September 2023).
25. Doroshenko D., Bilichenko R. Understanding of the main ideas and logical reasoning when studying the sequence limit section. *Collection of Scientific Papers ΛΟΓΟΣ*, 2022, pp. 97–100. Available at: <https://doi.org/10.36074/logos-16.09.2022.26> (accessed 15 September 2023).

Information about the authors

Ikromjon U. Rakhmonov, Dr. Sc., Professor, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan. ilider1987@asu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vyush@tpu.ru

Aysulu M. Najimova, PhD, Associate Professor, Karakalpak State University, 1, Ch. Abdirov street, Nukus, 230100, Uzbekistan. a_najimova@karsu.uz; <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Kamoliddin K. Obidov, Associate Dean on Working with Youth, "TIAME" NRU Bukhara Institute of Natural Resources Management, 32, Gazli highway, Bukhara, 200100, Uzbekistan. Fedika1@mail.ru

Seidamet R. Suleimanov, Postdoctoral Student, Director of the Research and Production Company KazTechAutomatics, 11, Seifullin street, Temirtau, 101400, Kazakhstan. seidamet.s@gmail.com

Received: 05.10.2023

Revised: 20.02.2024

Accepted: 14.03.2024

UDC 624.131.43

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4410

Comparative analysis of swelling mitigation in marl and clay soils: natural plant fibers (Alfa, jute, sisal) vs. polypropylene fiber with lime-pozzolana cement utilizing proctor compaction

A. El Majid✉, Kh. Baba, Ya. Razzouk

*Civil Engineering and Environment Laboratory (LGCE),
Mohammadia School of Engineering, Mohammed V University, Rabat, Morocco*

✉ahlam.elmajid@research.emi.ac.ma

Abstract. This study offers a comparative assessment of two methodologies for mitigating soil swelling in marl and clay soils. The methods under investigation include the use of natural plant fibers (Alfa, jute, sisal) and polypropylene fibers in combination with lime-pozzolana cement. Laboratory tests, including Proctor compaction tests, and swell potential assessments, were conducted to assess the effectiveness of each method. The findings reveal that both natural plant fibers and polypropylene fibers, when combined with lime-pozzolana cement, effectively reduce soil swelling. The study underscores the promise of eco-friendly natural plant fibers and the durability of polypropylene fibers as viable solutions for soil stabilization. Furthermore, incorporating lime-pozzolana cement enhances both methods performance, providing an additional layer of soil stability. This research contributes valuable insights to geotechnical engineering projects dealing with marl and clay soils. It aids in the selection of suitable soil stabilization techniques, considering project-specific needs and sustainability concerns. Ultimately, this study advances the field of geotechnical engineering by promoting environmentally conscious and resilient solutions to address soil swelling in clay and marl soils.

Keywords: soil stabilization, swelling reduction, natural plant fibers, polypropylene fiber, lime-pozzolana cement

Acknowledgments: The authors thank the Materials and Soil Control Laboratory (LCMS) for the chance to collaborate on an experimental project.

For citation: El Majid A., Baba Kh., Razzouk Ya. Comparative analysis of swelling mitigation in marl and clay soils: natural plant fibers (Alfa, jute, sisal) vs. polypropylene fiber with lime-pozzolana cement utilizing proctor compaction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 52–63. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4410

УДК 624.131.43

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4410

Сравнительный анализ снижения набухания мергельно-глинистых грунтов: натуральные растительные волокна (Альфа, джут, сизаль) против полипропиленовой фибры с известково-пуццолановым цементом при прокторном уплотнении

А. Эль Маджид✉, Х. Баба, Я. Раззук

*Лаборатория гражданского строительства и окружающей среды,
Инженерная школа Мохаммадии, Университет Мохаммеда V, Марокко, г. Рабат*

✉ahlam.elmajid@research.emi.ac.ma

Аннотация. В данном исследовании дана сравнительная оценка двух методик снижения набухания грунта в мергельно-глинистых почвах. Исследуемые методы включают использование натуральных растительных волокон (Альфа, джут, сизаль) и полипропиленовых волокон в сочетании с известково-пуццолановым цементом. Для оценки эффек-

тивности каждого метода были проведены лабораторные испытания, включающие тесты на уплотнение по методу Проктора и оценку потенциала вспучивания. Результаты показали, что как натуральные растительные волокна, так и полипропиленовые волокна в сочетании с известково-пуццолановым цементом эффективно снижают набухание грунта. Исследование подчеркивает перспективность экологически чистых натуральных растительных волокон и долговечность полипропиленовых волокон как эффективных решений для стабилизации грунта. Кроме того, добавление известково-пуццоланового цемента повышает эффективность обоих методов, обеспечивая дополнительный слой стабильности грунта. Данное исследование вносит ценный вклад в инженерно-геологические проекты, связанные с мергельно-глинистыми грунтами. Оно помогает выбрать подходящие методы стабилизации грунта с учетом специфики проекта и соображений устойчивости. Данное исследование способствует развитию геотехнической инженерии, предлагая экологически безопасные и устойчивые решения для борьбы с набуханием грунта в глинистых и мергелистых почвах.

Ключевые слова: стабилизация грунтов, снижение набухания, натуральные растительные волокна, полипропиленовое волокно, известково-пуццолановый цемент

Благодарности: Авторы благодарят лабораторию контроля материалов и почв за предоставленную возможность сотрудничества в рамках экспериментального проекта.

Для цитирования: Эль Маджид А., Баба Х., Раззук Я. Сравнительный анализ снижения набухания мергельно-глинистых грунтов: натуральные растительные волокна (Альфа, джут, сизаль) против полипропиленовой фибры с известково-пуццолановым цементом при прокторном уплотнении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 52–63. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4410

Introduction

Marl and clay soils, characterized by their fine particles, high plasticity, and sensitivity to moisture content, are integral components of geotechnical engineering projects globally. These soils, while prevalent, are notorious for their inherent susceptibility to volumetric changes, primarily swelling and shrinkage, in response to variations in moisture content. These soils remarkable plasticity is a testament to their versatility and a source of formidable challenges in civil engineering and construction [1–6]. The magnitude of these challenges cannot be overstated. Swelling and shrinkage in clay and marl soils pose substantial threats to the structural integrity and long-term stability of civil engineering structures and infrastructure. Foundation settlement, pavement distress, and building damage are but a few of the pernicious consequences associated with these soil behaviors. It is a complex interplay of geological factors, climatic conditions, and human activities that conspire to render these soils particularly challenging. As a result, the mitigation of swelling and shrinkage issues in clay and marl soils has remained a primary focus of geotechnical research and practice for decades. The imperative to find effective solutions to these challenges has driven the exploration of numerous soil stabilization techniques. Among these techniques, the incorporation of natural plant fibers into the soil matrix has emerged as a prominent avenue of investigation [2–5]. Natural plant fibers, such as Alfa (scientifically known as *Medicago sativa*), jute (*Corchorus capsularis*), and sisal (*Agave sisalana*), have garnered significant attention due to their ecological advantages. These fibers possess inherent qualities of biodegradability, renewability, and the potential to enhance soil properties through a myriad of mechanisms.

Fiber reinforcement, improved water retention, and erosion control are among the benefits that these natural plant fibers offer [6, 7]. In parallel, the deployment of synthetic fibers, particularly polypropylene, has arisen as a compelling alternative [8, 9]. Polypropylene fibers have earned their place in the realm of geotechnical engineering for their durability, resistance to environmental degradation, and exceptional tensile strength. Their applications extend to crack reduction, improved load-bearing capacity, and enhanced resilience to cyclic loading, making them a formidable contender in the realm of soil stabilization [10–12]. Furthermore, the deployment of lime-pozzolana cement (LPC) as a soil stabilizer has displayed significant promise in ameliorating the swelling behavior of clayey and marly soils [13, 14]. LPC operates as a pozzolanic material and cementitious binder, engendering a transformation in soil characteristics. Reduced plasticity, enhanced compressive strength, and improved durability are among the effects of this treatment [2, 15]. This research article endeavors to proffer an exhaustive comparative analysis of these two distinct methodologies for swelling reduction in clay and marl soils. As a testament to our dedication, we embark on a comprehensive exploration of these methodologies, deploying a carefully designed array of laboratory tests and evaluations. Our rigorous approach encompasses Proctor compaction tests, California Bearing Ratio (CBR) tests, unconfined compressive strength tests, and exhaustive swell potential assessments. Our core objective is to furnish empirical evidence concerning the efficacy of natural plant fibers, polypropylene fibers, and LPC in soil stabilization. We aim to do justice to the complexities of soil behavior, considering the intricate interplay of soil properties, fiber types,

proportions, and the dosages of LPC. Moreover, this research journey will probe deeper into the influence of varying fiber types, proportions, and the precise dosage of LPC on the geotechnical properties of clay and marl soils. It is our mission to illuminate the path for geotechnical engineers and practitioners, empowering them to navigate the nuanced terrain of soil stabilization techniques with informed decision-making. We recognize that the exigencies of each project are unique, influenced by project-specific requirements, sustainability considerations, and the distinctive geologic and hydrological characteristics of the soil. This research aspires to be a beacon in the realm of geotechnical engineering. Our comprehensive analysis will bridge the chasm between laboratory findings and real-world engineering applications, ushering in a new era of sustainable and resilient infrastructure development. We are committed to advancing the science of soil stabilization, paving the way for a greener and more resilient future in civil engineering and construction.

Experimental program

Sample collection and preparation

During the initial phase of our research, we meticulously procured soil samples from the Fez-Meknes region in Morocco [8]. These samples were acquired during the construction of a hospital in Tahla and a local road, identified during geotechnical surveys [3, 4]. A diverse array of experiments was subsequently conducted to elucidate the geotechnical properties of these two collected soil samples [8]. The clay and marl soils subjected to our study have been classified as exceptionally plastic A3 [8], in accordance with GTR 92 guidelines [16]. This classification is grounded in a comprehensive analysis that incorporates various correlations and the findings derived from soil identification tests, as meticulously documented in Table 1. It is worth noting that both samples exhibited a notable propensity for high to very high levels of soil swelling [17–21], particularly within the domains where marl and clay soils predominate. To guarantee an exhaustive representation of subsurface conditions, our sampling strategy involved the collection of samples at diverse depths. These soil specimens were vigilantly transported to our laboratory, carefully enclosed within hermetically sealed containers to safeguard against moisture fluctuations during transit.

Upon their arrival at the laboratory, our research team meticulously adhered to a rigorous and standardized protocol. This included subjecting the soil samples to a controlled air-drying process until they reached a consistent and stable weight. Following this crucial step, the samples underwent uniform crushing and meticulous sieving through a 2 mm mesh to meticulously eliminate coarse particles. Subsequently, the samples were subjected to thorough mixing, ensuring the attainment of sample homogeneity, thereby establishing a consistent foundation for our subsequent testing procedures.

Table 1. Characteristics of the soil samples [9]

Таблица 1. Характеристики образцов почвы [9]

Parameter Параметр	Clay soil Глинистая почва	Marl soil Мергелистая почва
particle size analysis гранулометрический анализ		
%<0.08 mm	93.7	95.5
%<2 mm	98.7	99.7
%<20 mm	100	100
Water content w (%) Содержание влаги w (%)	16.6	19
Atterberg limits Пределы Аттерберга		
Liquid limit LL (%) Предел текучести LL (%)	62	55
Plasticity index PI (%) Индекс пластичности PI (%)	38	37
Classification Классификация	A3	A3

Fiber selection and preparation

The selection and preparation of fibers were executed with meticulous attention to detail. Our research team meticulously sourced natural plant fibers (Alfa, jute, and sisal) from reputable suppliers, guaranteeing their quality and integrity, as meticulously documented in Table 2.

Table 2. Properties of Alfa, jute, and sisal fiber [8]

Таблица 2. Свойства альфы, джута и сизалевого волокна [8]

Properties Свойства	Alfa fiber Альфа-волокно	Jute fiber Джутовое волокно	Sisal fiber Сизалевое волокно
Density (g/m ³) Плотность (г/м ³)	1.3–1.4	1.3–1.4	1.4
Diameter (μm) Диаметр (мкм)	5–22	15–35	10–20
Tensile strain (%) Деформация при растяжении (%)	1.4–5	1.5–1.8	2–2.5
Tensile strength (Mpa) Прочность при растяжении (Мпа)	173.4–1327	400–800	511–635
Young's modulus (Gpa) Модуль Юнга (Гпа)	18–58	10–30	9.4–22
Cellulose (%) Целлюлоза (%)	38.8–47.6	67–71.5	67–78
Lignin (%) Лигнин (%)	14.9–24	12–13	8–11
Microfibrillar angle Угол микрофибрилл	–	8°	11°
Wax (%) Воск (%)	1.5–5	0.5	2
Hemi-Cellulose (%) Геми-целлюлоза (%)	22.1–38.5	13.6–20.4	10–14.2
References Ссылки	[27]	[22, 23]	[22, 23]

These fibers underwent a stringent cleansing process to eliminate any potential contaminants. Subsequently, they were subjected to a comprehensive drying procedure to eliminate moisture content, thus facilitating precise measurements. Uniformity was maintained by meticulously cutting the fibers to standardized lengths. In the case of polypropylene fibers, we selected filament polypropylene (PP) fibers that were carefully extracted from sweepers and held well-documented specifications. These PP fibers utilized in our research exhibit a comprehensive range of physical, chemical, and mechanical properties, augmenting their suitability for a wide array of applications. With a specific gravity of 0.89, this PP fiber is notably lightweight, greatly facilitating its handling and application. Its remarkable tensile strength of 0.67 kN/mm² allows it to endure significant loads and stresses without succumbing to deformation, rendering it an exemplary choice for reinforcement applications. With Young's modulus of 4.00 kN/mm², this fiber showcases its ability to withstand substantial forces while retaining its structural integrity. Furthermore, its melting point range of 160–170°C ensures stability when exposed to elevated temperatures, making it a fitting choice for applications that demand heat resistance. This fiber high ignition point at 590°C underscores its resilience to ignition at lower temperatures, thus enhancing safety across various contexts. It boasts a bulk density of 910 kg/m³, a characteristic that greatly facilitates its easy handling and application. Furthermore, its loose density, ranging from 250–430 kg/m³, accommodates diverse requirements across various applications. It is offered in cut lengths of 10, 15, 20, and 25 mm, effectively catering to specific project needs. This PP fiber also demonstrates excellent dispersion characteristics, ensuring uniform distribution within materials such as concrete, thereby elevating their overall strength and durability. Additionally, it exhibits notable resistance to acids and salts, making it a dependable choice for applications exposed to corrosive substances. Moreover, its inherent chemical-proof nature guarantees enduring performance, particularly when faced with challenging and harsh environmental conditions. These fibers remained unaltered to preserve their original characteristics and to maintain consistency across our experiments, precise measurements of fiber proportions were meticulously executed, accounting for the dry weight of the soil samples. This thorough approach allowed us to prepare the fibers with the utmost precision in anticipation of subsequent testing procedures.

Soil stabilization methods

The essence of our experiment revolves around the exploration of soil stabilization methods. The approach was systematically organized into distinct phases. For the integration of natural plant fibers (Alfa, jute, and sisal) with soil samples, proportions were methodically

varied, ranging from 1 to 18% by weight of dry soil. This systematic variation facilitated an investigation into the influence of different fiber concentrations on soil stabilization.

Simultaneously, in the context of polypropylene fiber stabilization, varying fiber content percentages, spanning from 0.1 to 1.8% by weight of dry soil, were introduced. This spanned a spectrum of concentrations, providing a comprehensive assessment of the impact of varying fiber levels on soil stability. In select samples, LPC was introduced in different dosages, ranging from 1 to 18% by weight of dry soil. This deliberate variation enabled a comprehensive exploration of the effects of this stabilizing agent on soil properties, contributing to a richer understanding of our study scope.

Laboratory testing

In our laboratory testing, we employed a systematic approach to examine soil-fiber-cement mixtures. The central method was the Proctor compaction test, conducted meticulously to determine maximum dry density and optimum moisture content. Sample preparation ensured representative materials, and data on weight, moisture content, and compaction were collected. Swelling behavior was assessed alongside data analysis to draw meaningful conclusions. All tests were repeated for reliability, contributing to a comprehensive investigation of these mixtures in our research.

Data analysis

To extract meaningful insights from our experiments, a rigorous data analysis process was employed. The methodical approach allowed us to discern the effectiveness of each soil stabilization technique under scrutiny. Visual representations, such as graphs and charts, were generated to offer a clear, concise visualization of the variations in soil properties corresponding to different fiber types, proportions and lengths.

Quality control

To maintain the integrity and reliability of our experimental data, strict quality control measures were diligently implemented. Our laboratory equipment was regularly calibrated to ensure precision and consistency in our measurements. Adherence to well-established testing standards, such as ASTM [24–28], was strictly followed throughout our experiments, upholding the highest standards of scientific rigor. These quality control practices reinforced the credibility of our findings and ensured the robustness of our conclusions.

Results and discussion

Exploring the impact of time on swelling potential

Exploring the relationship between time and percentage swelling in standard Proctor compaction tests on pristine clay and marl samples, which were reinforced with various materials including PP fiber, ce-

ment, and a range of plant fibers such as Alfa, jute, sisal, and a composite of these three, has yielded intriguing findings. The results indicate a gradual increase in swelling over time, with stabilization occurring after 4320 minutes.

PP fiber with LPC: in this study, it was observed that the combination of PP fiber with LPC was highly effective in reducing swelling in both clay and marl samples as presented in Fig. 1, 2. The key findings include:

- Higher percentage: when compared to plant fibers, the PP fiber with LPC mixture (1.8% PP+18% LPC) had a higher percentage reduction in swelling. This suggests that the synthetic PP fibers, when combined with the cementitious material, have a stronger impact on swelling reduction compared to plant fibers.
- Length effect: the study also revealed that increasing the length of PP fibers in the mixture further enhanced the reduction in swelling as seen in Fig. 3. This indicates that longer PP fibers (L=25mm) cre-

ate a more effective reinforcement network within the soil, which is better at controlling swelling.

Plant fiber reinforcements (Alfa, jute, sisal): on the other hand, the use of plant fibers like Alpha, jute, and sisal in the clay and marl samples also led to reductions in swelling, but the effectiveness was lower compared to the PP fiber with LPC. Key observations for plant fibers include:

- Higher percentage: despite having higher percentages of plant fibers in the mixture (18%), their swelling reduction effect was not as significant as that of PP fiber with LPC. This implies that plant fibers alone may not provide as robust reinforcement against swelling.
- Length effect: similar to PP fibers, increasing the length of plant fibers (L=25 mm) also contributed to a reduction in swelling as represented in Fig. 3. However, even with longer fibers, the reduction was still less pronounced than with PP fiber and cement.

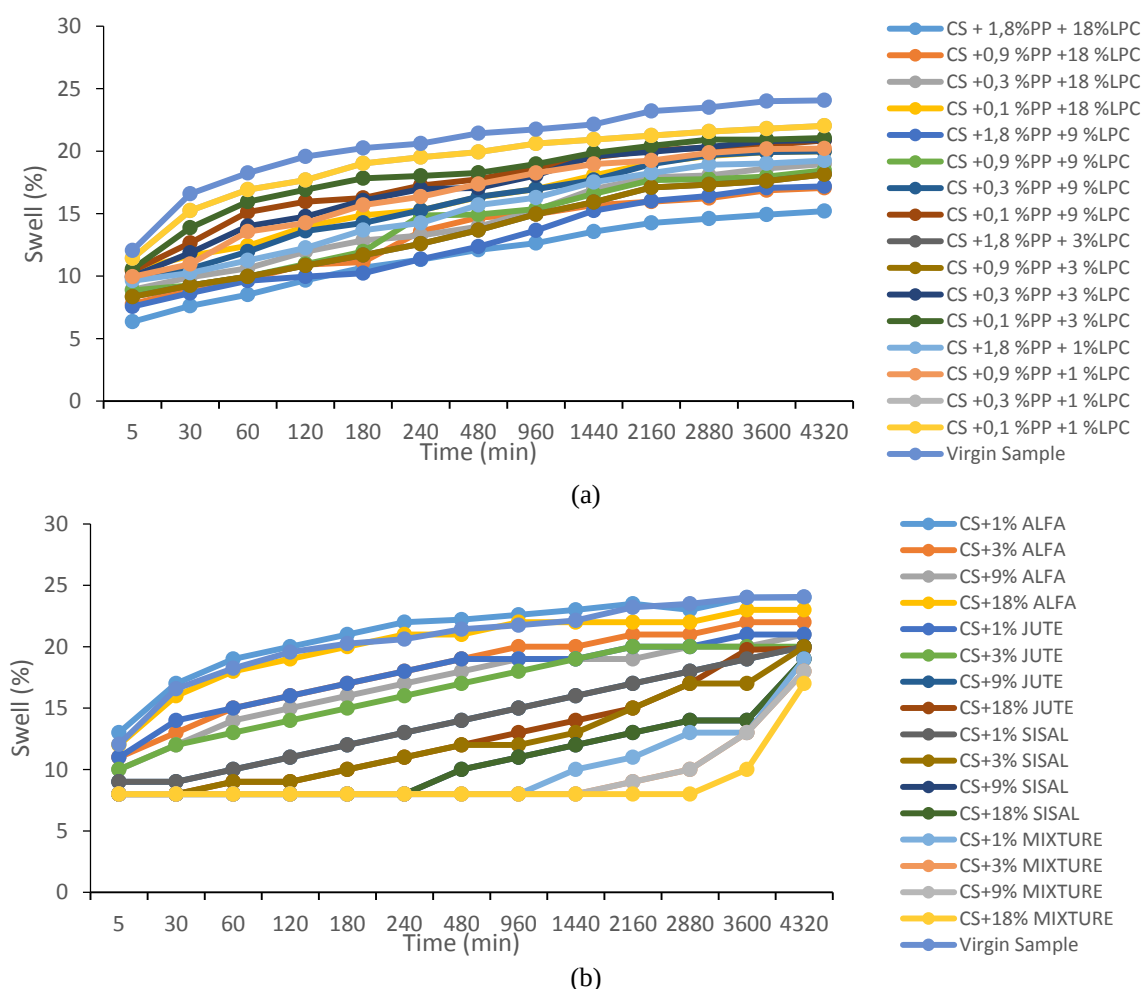


Fig. 1. Time-percent swelling correlation in standard Proctor compaction for clay soil reinforced with: (a) PP filament fiber and LPC; (b) plant fiber

Рис. 1. Соотношение времени и процента набухания при стандартном уплотнении глинистого грунта, армированного: (а) полипропиленовым волокном и известково-пуццолоновым цементом; (б) растительным волокном

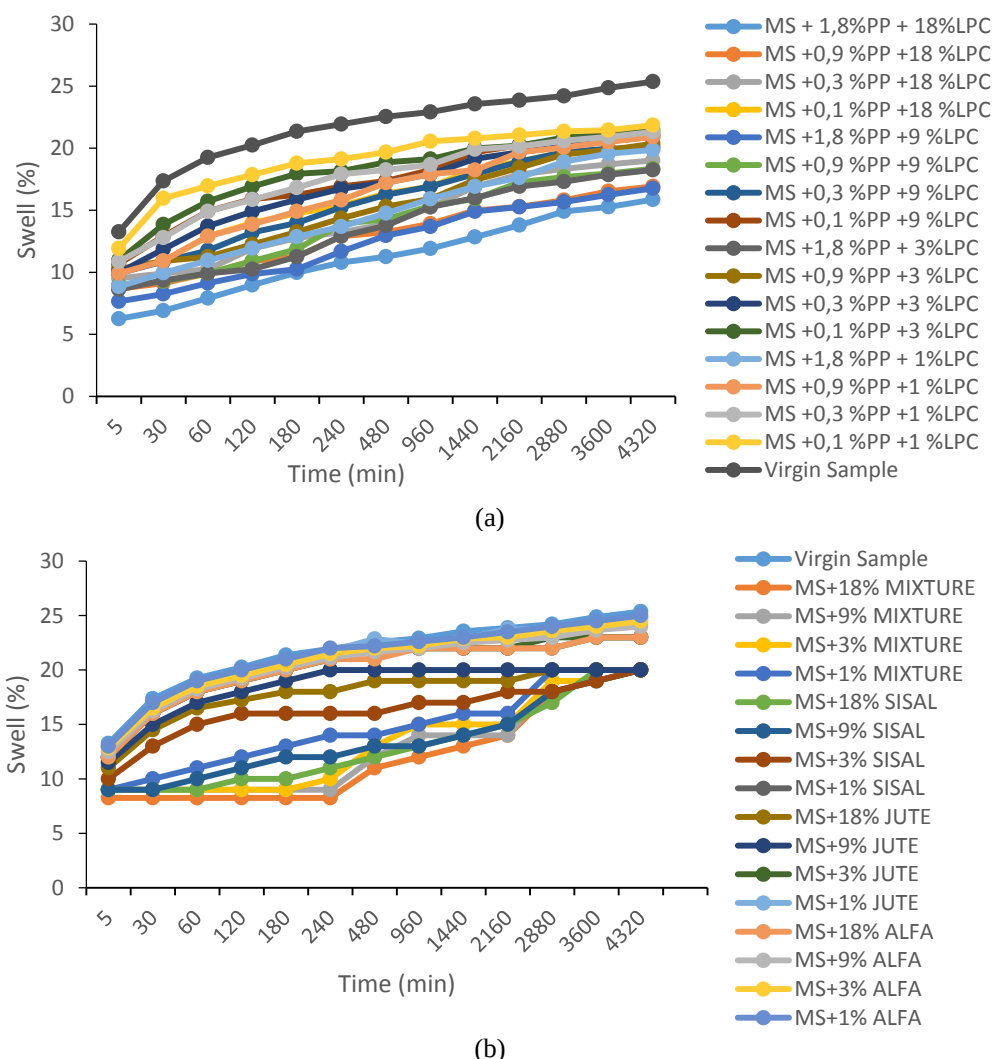


Fig. 2. Time-percent swelling correlation in standard Proctor compaction for marl soil reinforced with: (a) PP filament fiber and LPC; (b) plant fiber

Рис. 2. Соотношение времени и процента набухания при стандартном уплотнении мергеля, армированного: (a) полипропиленовым волокном и известково-пуццолоновым цементом; (b) растительным волокном

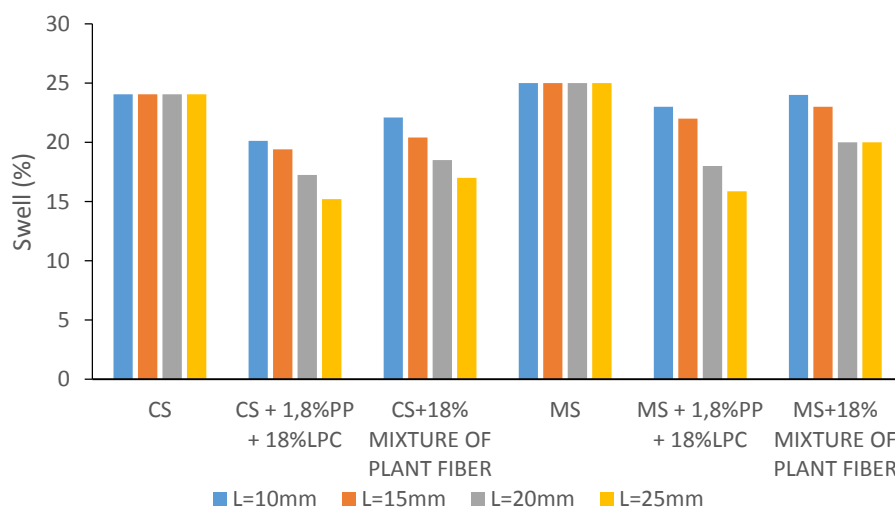


Fig. 3. Swelling behavior as a function of fiber length (plant and PP fiber)

Рис. 3. Поведение при набухании в зависимости от длины волокна (растительное и полипропиленовое волокно)

The results of the study indicate that when it comes to reducing swelling in clay and marl samples, the combination of PP fiber with LPC was more effective than using plant fibers alone. Additionally, increasing the length of the reinforcing fibers, whether synthetic or plant-based, generally led to improved performance in reducing swelling. This information can be valuable in selecting the most effective materials and configurations for soil stabilization in construction and geotechnical engineering projects.

Numerous studies in geotechnical engineering have consistently demonstrated the substantial reduction of soil swelling with the incorporation of natural or synthetic fibers, and these reductions often correlate with increasing fiber content and length. For instance, diverse research [29–32] found that as the content of jute fibers increased in expansive clay soil, there was a proportional decrease in soil swelling. Similarly, various investigations [7, 33–36] reported a significant reduction in swelling behavior with the introduction of longer polypropylene fibers into clayey soils. These findings underscore the effectiveness of higher fiber content and longer fiber lengths in enhancing soil stability and mitigating the adverse effects of swelling.

Potential swell influence on swelling pressure across different soil types

Swelling pressure, a pivotal factor in soil mechanics, exhibits a direct correlation with the swelling potential of different soil types. When evaluating marl and clay soils, it becomes apparent that clay soil typically manifests higher swelling pressure and greater swelling potential in comparison to marl soil. This swelling propensity, however, can be significantly impacted by the inclusion of plant fiber additives.

As the content and length of plant fibers increase within the soil mixture, the swelling pressure in both marl and clay soils tends to diminish. This decline is attributed to the reinforcing qualities of plant fibers, which act as stabilizing agents, counteracting the expansive nature of these soils.

Moreover, the introduction of LPC into the soil composition yields noteworthy effects on swelling pressure. In reinforced marl soil, the swelling pressure surpasses that of clay soil, signifying the constructive influence of LPC in reducing swelling potential and enhancing soil integrity.

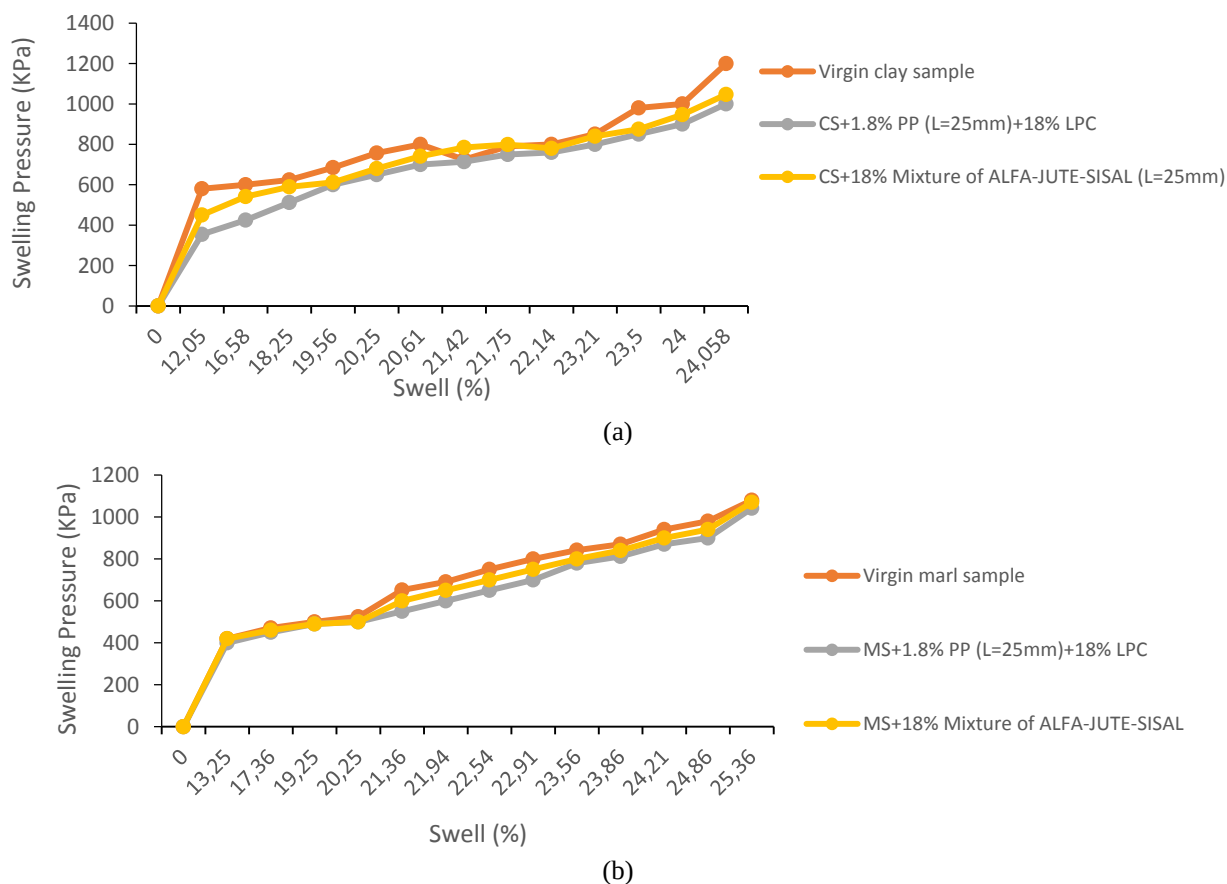


Fig. 4. Swell pressure vs. swell: comparative study with and without reinforcement, varied compaction energies: (a) clay soil, (b) marl soil

Рис. 4. Зависимость давления вспучивания от величины вспучивания: сравнительное исследование с армированием и без него при различных энергиях уплотнения: (а) глинистый грунт (b), мергелистый грунт

Notably, in soil blends incorporating PP fibers along with LPC, swelling pressure exhibits enhanced stability. This indicates that the combination of PP fibers and cement offers a more enduring and dependable solution for managing swelling pressure when compared to plant fibers alone.

Our research underscores the efficacy of PP in conjunction with LPC as a superior alternative to plant fiber additives for addressing soil-related challenges. Our study clearly demonstrates that the PP-cement blend has a more pronounced impact on reducing swelling pressure and improving soil stability compared to plant fiber reinforcement. These results align with a growing body of evidence supporting the strength and durability of PP fibers, which offer a robust, long-lasting reinforcement mechanism. Furthermore, the cohesive properties of LPC synergize with PP fibers, resulting in heightened soil stability. These findings emphasize the potential of PP combined with LPC as a preferred choice for engineering solutions aimed at mitigating swelling pressure and enhancing soil performance in various geotechnical applications.

Swelling pressure in soils is influenced by the inherent swelling potential of the soil type, the presence of PP fibers, and the addition of LPC. Understanding these dynamics is crucial for developing engineering solutions that effectively manage soil swelling and ensure the stability of construction projects.

Comparing our research findings with those of previous studies provides valuable insights into the broader context of our work. In contrast to some earlier research, our results reveal distinctive patterns in soil behavior under varying conditions. While some prior studies may have reported similar trends regarding swelling pressure and soil additives [36–45], our research extends this understanding by specifically focusing on marl and clay soils and their response to plant fibers [3, 4] and LPC with PP.

Furthermore, our findings highlight the unique dynamics of reinforced marl soil, which demonstrates higher swelling pressure compared to clay soil when treated with LPC. This diverges from certain earlier research that might have suggested different outcomes.

Overall, our research contributes to the evolving body of knowledge in soil mechanics and provides valuable data for engineering applications. By building upon and refining existing research, we strive to offer a more comprehensive and nuanced understanding of soil behavior, ultimately aiding in the development of more effective solutions for construction and geotechnical projects.

Exploring the influence of maximum dry density on potential swell in various soil types

The evolution of soil swells as a function of dry maximum density can be described as a distinctive convex curve, mirroring the characteristic shape of the Proctor curve [46]. In our comprehensive study, we observed a compelling trend wherein the sample reinforced with PP fibers exhibited significantly greater stability when compared to the sample reinforced with natural plant fibers, which, in its turn, was more stable than the unaltered virgin soil sample. This progression is in accordance with logical expectations, as the introduction of reinforcing fibers, regardless of their origin, tends to fortify the structural integrity of the soil. Furthermore, the type of soil played a pivotal role in shaping these findings. Remarkably, the clay soil, despite its innate expansiveness, displayed notably more stable results compared to the marl soil as presented in Fig. 5. This intriguing outcome underscores the considerable potential of soil improvement techniques, such as fiber reinforcement, in not only mitigating the detrimental effects of soil expansion but also in enhancing overall soil stability and performance in diverse geological contexts.

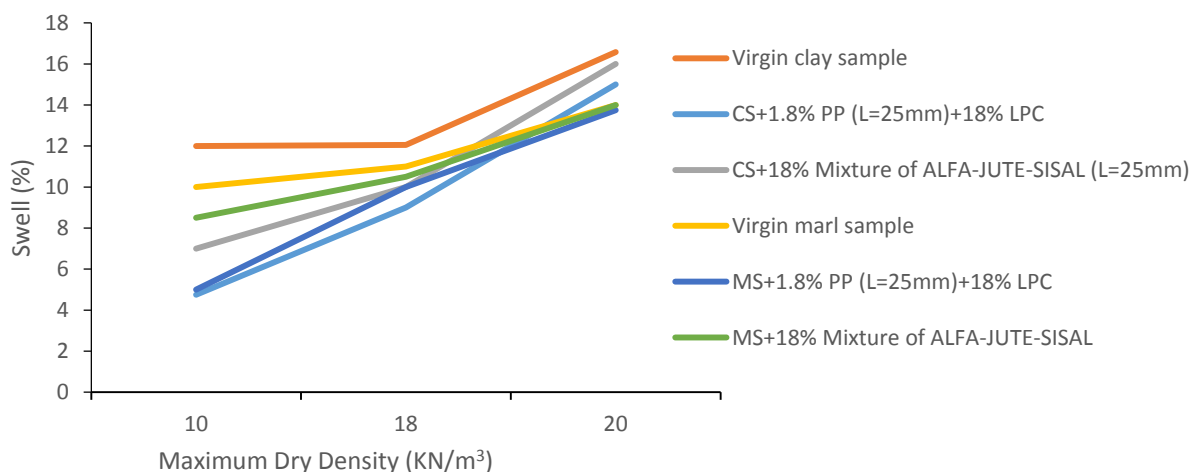


Fig. 5. Correlation between swell and maximum dry density across diverse sample types

Рис. 5. Корреляция между разбуханием и максимальной сухой плотностью в различных типах образцов

Our research findings are in line with several prior studies that have explored the relationship between soil swell and maximum dry density [47]. In particular, our observation that soil stability increases with the incorporation of reinforcing fibers aligns with established principles in geotechnical engineering. This consistency in results reinforces the effectiveness of fiber reinforcement techniques in enhancing soil stability, as demonstrated by both our study and others in the field. Furthermore, the intriguing aspect of our research lies in the comparative analysis of different fiber types. Our data supports the notion that PP fiber reinforcement outperforms natural plant fibers (Alfa, jute, sisal) in terms of stabilizing soil, a finding that is consistent with certain previous investigations. However, our study also introduces a novel dimension by highlighting the role of soil type. Despite the inherent expansiveness of clay soil in comparison to marl, our results show that clay soil can achieve superior stability when subjected to similar fiber reinforcement techniques. This insight contributes valuable information to the existing body of knowledge in geotechnical engineering, emphasizing the importance of considering soil type as a critical factor in soil improvement strategies.

Effect of compaction energy on the evolution of swell and swelling pressure in expansive soil behavior

The observed increase in both swell and swelling pressure with rising compaction energy can be attributed to the inherent expansiveness of the soil under investigation. Expansive soils tend to exhibit greater volume changes in response to changes in moisture content, and

this behavior is often exacerbated with increased compaction energy. As compaction energy rises, the soil particles are subjected to higher levels of compaction and densification. Paradoxically, this densification can lead to increased swell and swelling pressure in expansive soils due to reduced void space for water to occupy. In essence, while compaction energy aims to reduce soil voids, it can also lead to more significant internal pressures and subsequent soil expansion. This phenomenon underscores the complex interplay between soil properties, moisture content, and compaction efforts in the behavior of expansive soils, a critical consideration in geotechnical engineering and construction projects.

The effect of compaction energy on the evolution of swell and swelling pressure in our study remained consistently aligned with established principles, regardless of the presence of reinforcement materials such as plant fibers and PP combined with LPC. In both the clay and marl soil samples, we observed a systematic reduction in swell and swelling pressure as compaction energy increased. This reduction was particularly noteworthy in the reinforced samples, where the additional incorporation of plant fibers or the PP+LPC mixture contributed to even greater stability as seen in Fig. 6. These results echo the well-documented influence of compaction energy on soil density and the consequent mitigation of soil expansion. Importantly, our study underscores the beneficial role of reinforcement materials in further enhancing soil stability, demonstrating their compatibility with the fundamental principles governing soil behavior.

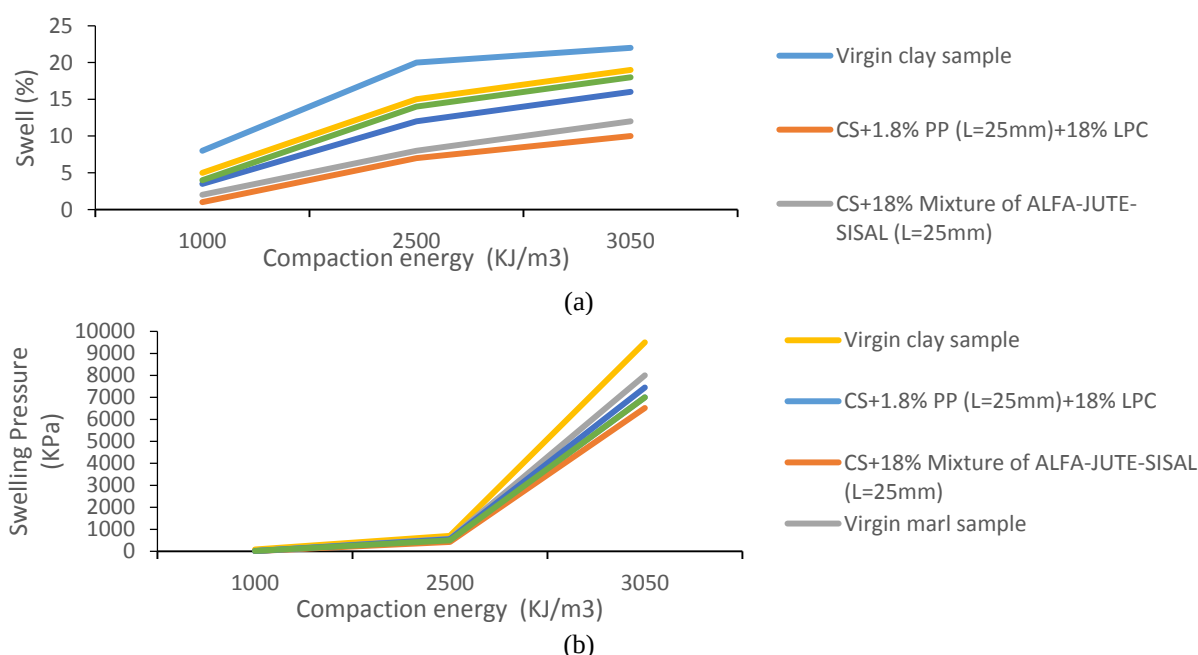


Fig. 6. Effect of compaction energy on swell characteristics in expansive soils samples: (a) swell (%); (b) swelling pressure
Рис. 6. Влияние энергии уплотнения на характеристики набухания образцов экспансивных грунтов: (a) набухание (%); (b) давление набухания

Our research results, which show an increase in both swell and swelling pressure with rising compaction energy in expansive soils, align with several prior scientific studies that have investigated the behavior of expansive soils under compaction. These findings are consistent with established principles in geotechnical engineering and soil mechanics. Another study [47] has reported similar trends, emphasizing that the densification of expansive soils through higher compaction energy often leads to increased internal pressures and, consequently, greater soil expansion. Moreover, the relationship between compaction energy and soil behavior in expansive soils has been a subject of interest in geotechnical research for several decades. Studies have explored various factors influencing this relationship, such as soil composition, moisture content, and the type of compaction equipment used. Our results bolster the existing body of knowledge by reaffirming the importance of understanding and managing soil expansion in expansive soil environments. While the increase in swell and swelling pressure with compaction energy may seem counterintuitive at first glance, it underscores the intricate nature of expansive soils. These soils possess unique characteristics that necessitate a nuanced approach to engineering and construction projects. Therefore, our research contributes to the broader conversation on how to effectively mitigate the challenges posed by expansive soils, offering insights that can inform best practices in geotechnical engineering and soil management.

Conclusion

In conclusion, this study has yielded valuable insights into the intricate relationship between swelling potential, soil stabilization methods, compaction energy, and maximum dry density, while considering vari-

ous crucial factors. Our investigation into the efficacy of natural plant fibers, such as Alfa, jute, and sisal, in conjunction with polypropylene fibers and LPC, has demonstrated their potential in effectively mitigating soil swelling. These findings underscore the significance of accounting for fiber type, proportion, and cement dosage when selecting appropriate soil stabilization techniques, particularly in expansive soil environments.

Furthermore, we delved into the influence of fiber length, both in plant and PP fibers, on swelling behavior, shedding light on how variations in fiber length can impact the soil response. Additionally, our examination of compaction energy effect on swelling behavior has contributed to a more comprehensive understanding of the role of compaction in soil stabilization, especially in expansive soils. The interplay between compaction energy and soil swelling was evident in both reinforced and unreinforced soil samples.

Moreover, we considered the time-dependent nature of swelling behavior, with stabilization observed after 4320 minutes, underscoring the importance of long-term monitoring in geotechnical projects. These multifaceted findings add valuable tools to the repertoire of geotechnical engineers and practitioners, offering sustainable solutions for projects in clay and marl-rich regions. As we continue to explore innovative materials and techniques, it is evident that a comprehensive understanding of soil behavior, including its response to compaction energy and maximum dry density, remains paramount for the successful execution of civil engineering projects. We anticipate that this research will serve as a foundation for future endeavors and contribute to the development of more resilient and sustainable infrastructure in challenging soil environments.

REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rotta L., Alessandro F. The silent impact of underground climate change on civil infrastructure. *Commun Eng*, 2023, vol. 2, no. 1, Art. no. 1. DOI: 10.1038/s44172-023-00092-1.
2. Razzouk Y., Ahatri M., Baba K., Majid A. Optimal bracing type of reinforced concrete buildings with soil-structure interaction taken into consideration. *Civil Engineering Journal*, 2023, vol. 9, pp. 1371–1388. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-06-06.
3. Razzouk Y., Ahatri M., Baba K., Majid A. The impact of bracing type on seismic response of the structure on soft soil. *Civil Engineering and Architecture*, 2023, vol. 11, pp. 2706–2718. DOI: 10.13189/cea.2023.110534.
4. Razzouk Y., Baba K., Ahatri M., Majid A. *Analyzing the influence of bracing types on the overall displacement of reinforced concrete buildings*, 2023, pp. 290–304. DOI: 10.1007/978-3-031-49345-4_28.
5. Razzouk Y., Ahatri M., Baba K., Majid A. Optimizing seismic bracing systems for reinforced concrete buildings based on height and seismic zone. *Civil Engineering and Architecture*, 2023, vol. 11, pp. 3430–3450. DOI: 10.13189/cea.2023.110615.
6. Razzouk Y., Ahatri M., Baba K., Majid A. The impact of bracing type on the global displacement of reinforced concrete buildings. *Research Gate*, 2023, vol. 9, p. S478–S484. DOI: 10.17756/nwj.2023-s2-081.
7. Abdalla J.A. A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: a step towards sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 19, p. e02244. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02244.
8. Majid A., Baba K. Assessing the impact of plant fibers on swelling parameters of two varieties of expansive soil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, vol. 8, p. 100408. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100408.
9. Majid A., Cherradi C., Baba K., Razzouk Y. Laboratory investigations on the behavior of CBR in two expanding soils reinforced with plant fibers of varying lengths and content. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.06.395.
10. Punia Bangar S., Ilyas R.A., Chaudhary N., Dhull S.B., Chowdhury A., Lorenzo J.M. Plant-Based natural fibers for food packaging: a green approach to the reinforcement of biopolymers. *J Polym Environ.*, 2023. DOI: 10.1007/s10924-023-02849-3.
11. Sengupta S. Sustainable products from natural fibers/biomass as a substitute for single-use plastics: Indian context. *Novel Sustainable Raw Material Alternatives for the Textiles and Fashion Industry*. Gopanpally Village, Springer, 2023. pp. 81–119.

12. Cruz Fabian D.R., Durpekova S., Dusankova M., Cisar J., Drohsler P., Elich O., Borkova M., Cechmankova J., Sedlarik V. Renewable poly (lactic acid) lignocellulose biocomposites for the enhancement of the water retention capacity of the soil. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 10, pp. 2243.
13. Navaratnam S., Selvaranjan K., Jayasooriya D., Rajeev P., Sanjayan J. Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure: a suitability assessment. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 66, pp. 105835.
14. Janaswamy S., Yadav M.P., Hoque M., Bhattarai S., Ahmed S. Cellulosic fraction from agricultural biomass as a viable alternative for plastics and plastic products. *Industrial Crops and Products*, 2022, vol. 179, pp. 114692.
15. Qin Y., Zhang X., Chai J., Xu Z., Li S. Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 194, pp. 216–225.
16. LCPC *Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR 92)*, 1992. Available at: <https://geniecivilpdf.com/wp-content/uploads/Guide-de-terrassement-routier-GTR-Fascicule-1-et-2.pdf> (accessed 15 April 2023).
17. Blazy J., Blazy R. Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, vol. 14, e00549.
18. Rajak M., Rai B. Effect of micro polypropylene fibre on the performance of fly ash-based geopolymer concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 97–108.
19. GhavamShirazi S., Bilsel H. Characterization of volume change and strength behavior of micro-silica and lime-stabilized Cyprus clay. *Acta Geotechnica*, 2021, vol. 16, no. 3, pp. 827–840.
20. Jitha P.T., Kumar B.S., Raghunath S. Strength development and masonry properties of geopolymer stabilised soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 250, pp. 118877.
21. Ganiyu A., Abdulsalaam A.A., Alawi H.A., Badr A. Impacts of alkaline activated slag blended with Omani Sarooj on expansive soil. *The 75th Canadian Geotechnical Conference. Calgary, Alberta*. Available at: <https://geocalgary2022.ca/wp-content/uploads/papers/51.pdf> (accessed 15 April 2023).
22. Vijayvergiya V.N., Ghazzaly O.I. Prediction of swelling potential for natural clays. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*. Haifa, 1973. pp. 227–236.
23. Bigot G., Zerhouni M.I. *Retrait, gonflement et tassement des sols fins*. 2000. p. 10. Available at: https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_229_105-114.pdf (accessed 15 April 2023).
24. Dakshanamurthy V., Raman V. A simple method of identifying an expansive soil. *土質工学会論文報告集*, 1973, vol. 13, no. 1, pp. 97–104. DOI: 10.3208/sandf1972.13.97.
25. Der Van M.D.H. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fractions of soils – discussion. *Civil Engineering = Siviele Ingenieurswese*, 1964, vol. 1964, no. 12, pp. 226–228. DOI: 10.10520/AJA10212019_17005.
26. Williams A.A.B., Donaldson G.W. Buildings on expansive soils in South Africa: 1973–1980. *Proc. 4th International Conference on Expansive Soils*. Ed. by D. Snethen. Denver, Colo., 1980. ASCE, New York, 1980. Vol. 2, p. 834.
27. El-Abbassi F.E., Assarar M., Ayad R., Bourmaud A., Baley C. A review on Alfa fibre (*Stipa tenacissima* L.): from the plant architecture to the reinforcement of polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, vol. 128, pp. 105677. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105677.
28. Ekundayo G., Adejuyigbe S.B. Reviewing the development of natural fiber polymer composite: a case study of sisal and jute. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2019, vol. 3, pp. 1–10. DOI: 10.11648/j.ajmme.20190301.11.
29. AASHTO T 99: *Standard method of test for moisture – density relations of soils using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop*. Available at: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=AASHTO%20T%2099&item_s_key=00489084 (accessed 15 April 2023).
30. *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. Available at: <https://www.astm.org/d0698-12r21.html> (accessed 15 April 2023).
31. *Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils*. Available at: <https://www.astm.org/d1883-21.html> (accessed 15 April 2023).
32. *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. Available at: <https://www.astm.org/d2166-06.html> (accessed 15 April 2023).
33. Tiwari N., Satyam N. Performance evaluation of reinforced expansive soil subgrade with polypropylene fiber and geogrid. *Advances in Transportation Geotechnics IV*, 2022, vol. 165, pp. 545–557.
34. Hamza M., Ijaz N., Fang C., Ijaz Z. Stabilization of problematic expansive clays using polypropylene fiber reinforcement. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2022, vol. 16, pp. 20–22.
35. Hussein S.A., Ali H.A.A.-R. Stabilization of expansive soils using polypropylene fiber. *Civ Eng J*, 2019, vol. 5, no. 3, pp. 624. DOI: 10.28991/cej-2019-03091274.
36. Majid A., Baba K., Razzouk Y. Mitigating soil swelling: exploring the efficacy of polypropylene fiber reinforcement in controlling expansion of expansive soils. *Research Gate*, 2023, pp. 183–192. DOI: 10.1007/978-3-031-49345-4_19.
37. *Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils*. Available at: <https://www.astm.org/d4546-14e01.html> (accessed 15 April 2023).
38. Gupta A., Kumar M. Clayey soil stabilization using flyash and jute fibre. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 48, pp. 1205–1210. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.246.
39. Kumar S., Naval S., Sahu A.K. Swelling behaviour of expansive soil reinforced with geocell and jute fibres. *Proceedings of Indian Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference (IGGEC) 2021*, 2022, vol. 1, pp. 33–51.
40. Araya-Letelier G., Antico F.C., Burbano-Garcia C., Concha-Riedel J., Norambuena-Contreras J., Concha J., Saavedra Flores E.I. Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 276, p. 122–127. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122127.
41. Kumar S., Sahu A., Naval S. Influence of jute fibre on CBR value of expansive soil. *Civil Engineering Journal*, 2020, vol. 6, pp. 1180–1194. DOI: 10.28991/cej-2020-03091539.

42. Tiwari N., Satyam N. Experimental study on the influence of polypropylene fiber on the swelling pressure expansion attributes of silica fume stabilized clayey soil. *Geosciences*, 2019, vol. 9, no. 9, pp. 377.
43. Mumtaz J., Rashid I., Israr J. Laboratory modelling of strength and deformation characteristics of a high swelling soil treated with industrial wastes. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, pp. 1–12.
44. Orlandi S., Taverna M.E., Villada Y.A., Piqué T., Laskowski C., Nicolau V.V., Estenoz D.A., Manzanal D. Additives based on vegetable biomass to improve the stabilisation of expansive clay soil. *Environmental Geotechnics*, 2021, vol. 40, no. XXXX, pp. 1–18.
45. Kalkan E., Yarbaşı N., Bilici Ö. The effects of quartzite on the swelling behaviors of compacted clayey soils. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 92–101.
46. Bharti G., Shukla B.K., Parashar B., Kumar A., Varadharajan S. Experimental study on physico-mechanical properties of expansive soil by using wheat straw fiber. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Available at: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2800/1/020083/2910088> (accessed 15 April 2023).
47. Sridharan A., Gurtug Y. Swelling behaviour of compacted fine-grained soils. *Engineering geology*, 2004, vol. 72, no. 1–2, pp. 9–18.

Information about the authors

Ahlam El Majid, PhD Cand., Assistant, Civil Engineering and Environment Laboratory (LGCE), Mohammadia School of Engineering, Mohammed V University, 765, Avenue Ibn Sina B.P., Rabat, 10090, Morocco; ahlam.elmajid@research.emi.ac.ma; <https://orcid.org/0000-0001-8242-1623>

Khadija Baba, Dr. Sc., Professor, Civil Engineering and Environment Laboratory (LGCE), Mohammadia School of Engineering, Mohammed V University, 765, Avenue Ibn Sina B.P., Rabat, 10090, Morocco; khadija.baba@est.um5.ac.ma; <https://orcid.org/0000-0003-4603-4321>

Yassine Razzouk, PhD Cand., Assistant, Civil Engineering and Environment Laboratory (LGCE), Mohammadia School of Engineering, Mohammed V University, 765, Avenue Ibn Sina B.P., Rabat, 10090, Morocco; yassine.razzouk@um5s.net.ma; <https://orcid.org/0009-0001-3097-5680>

Received: 12.05.2023

Revised: 13.06.2023

Accepted: 14.03.2024

Информация об авторах

Ахлам Эль Маджид, PhD Cand., Ассистент, Лаборатория гражданского строительства и окружающей среды, Инженерная школа Мохаммадии, Университет Мохаммеда V, Марокко, 10090, г. Рабат, пр. Ибн Сина В.Р., 765. ahlam.elmajid@research.emi.ac.ma; <https://orcid.org/0000-0001-8242-1623>

Хадиджа Баба, Доктор гражданского строительства и геотехнического инжиниринга, Профессор, Лаборатория гражданского строительства и окружающей среды (LGCE), Инженерная школа Мохаммадии, Университет Мохаммеда V Рабат, Марокко, 10090, г. Рабат, пр. Ибн Сина В.Р., 765. khadija.baba@est.um5.ac.ma; <https://orcid.org/0000-0003-4603-4321>

Яссин Раззук, PhD, Ассистент, Лаборатория гражданского строительства и окружающей среды (LGCE), Инженерная школа Мохаммадии, Университет Мохаммеда V, Марокко, 10090, г. Рабат, пр. Ибн Сина В.Р., 765. yassine.razzouk@um5s.net.ma; <https://orcid.org/0009-0001-3097-5680>

Поступила в редакцию: 12.05.2023

Поступила после рецензирования: 13.06.2023

Принята к публикации: 14.03.2024

УДК 543:546.799
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4574
Шифр специальности ВАК: 2.6.8

Механизм соосаждения америция на оксалате кальция

В.Л. Софронов^{1✉}, В.Ю. Селявский²

*Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Россия, г. Северск
АО «Сибирский химический комбинат», ГК «Росатом», Россия, г. Северск*

✉ vlsfronov@mephi.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена тем, что в литературных источниках отсутствуют какие-либо данные не только о коэффициентах кристаллизации, но и о характере соосаждения америция (III) на оксалате кальция. Реакция соосаждения америция с оксалатом кальция применяется для концентрирования микроколичеств америция в связи с малой растворимостью оксалата кальция и его адсорбционной способностью. В связи с этим безусловный интерес вызывает изучение механизма соосаждения микроколичеств америция с оксалатом кальция, а также изучение выделения микроколичеств америция с помощью носителя – кальция – и последующее отделение его от носителя. **Цель.** Исследование механизма соосаждения америция на твердом сорбенте – оксалате кальция, описание равновесия изотермы сорбции с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха. **Методы.** При проведении исследований по установлению механизма соосаждения америция на носителе – оксалате кальция – квалификация используемых химических реактивов соответствовала требованиям марки не ниже х.ч. В работе использовали изотоп америция-241, состав твердой фазы носителя – оксалата кальция – соответствовал формуле $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Концентрацию катионов америция (III) в исходном растворе и в фильтрате определяли гамма-спектрометрическим методом с использованием спектрометрического комплекса СКС-07П, количество кальция – комплексометрическим титрованием с мурексидом в качестве индикатора, концентрацию оксалат-иона – перманганатометрическим методом. **Результаты.** Установлено, что соосаждение из нитратных растворов америция (III) на оксалате кальция в большей степени обусловлено адсорбцией микрокомпонента – америция (III) – на поверхности имеющегося или вновь образующегося осадка макрокомпонента – оксалата кальция. Определено, что модель уравнения Ленгмюра адекватно описывает процесс сорбции, поскольку обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что в координатах $C/A=f(C)$ изотерма сорбции описывается уравнением прямой с высоким коэффициентом корреляции более 0,95.

Ключевые слова: америций, оксалат кальция, соосаждение, осадитель, изотерма сорбции, адсорбция, азотнокислые растворы

Для цитирования: Софронов В.Л., Селявский В.Ю. Механизм соосаждения америция на оксалате кальция // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 35. – № 4. – С. 64–72. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4574

UDC 543:546.799
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4574

Americium co-precipitation with calcium oxalate

V.L. Sofronov^{1✉}, V.Yu. Selyavskiy²

¹ *Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI»,
Seversk, Russian Federation*

² *JSC «Siberian Chemical Combine», Seversk, Russian Federation*

✉ vlsfronov@mephi.ru

Abstract. Relevance. The fact that the literature does not contain any data not only on crystallization coefficients, but also on the nature of the co-precipitation of americium (III) with calcium oxalate. The co-precipitation reaction of americium with calcium oxalate is used to concentrate trace amounts of americium due to calcium oxalate low solubility and adsorption capacity. In this relation, the study of co-precipitation of trace amounts of americium with calcium oxalate, as well as the study of the isolation of trace amounts of americium using a calcium carrier and its subsequent separation from the carrier, is of unconditional interest. **Aim.** Investigation of americium co-precipitation with the solid sorbent – calcium oxalate, description of the equilibrium of the sorption isotherm using Langmuir and Freundlich models. **Methods.** When studying the establishment of co-precipitation of americium with a carrier – calcium oxalate, the qualification of the chemical reagents used met the requirements of the grade not lower than r.g. The isotope americium-241 was used in the work, the composition of the solid phase of the carrier – calcium oxalate – corresponded to the formula $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. The concentration of americium (III) cations in the initial solution and in the filtrate was determined by gamma-spectrometric method using the SCS-07P spectrometric complex, the amount of calcium – by complexometric titration with murexide as an indicator, and the concentration of oxalate ion – by permanganatometric method. **Results.** It was found that the co-precipitation of americium (III) nitrate solutions with calcium oxalate is largely due to adsorption of the micro-component – americium (III) – on the surface of the existing or newly formed precipitate of the macro-component calcium oxalate. It is determined that the Langmuir equation model adequately describes sorption, since the processing of experimental data by the least squares method showed that in coordinates $C/A=f(C)$ the sorption isotherm is described by the equation of a straight line with a high correlation coefficient of more than 0.95.

Keywords: americium, calcium oxalate, co-precipitation, precipitator, sorption isotherm, adsorption, nitrate solutions

For citation: Sofronov V.L., Selyavskiy V.Yu. Americium co-precipitation with calcium oxalate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 64–72. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4574

Введение

Для выделения радиоактивных элементов, находящихся в растворе в микроколичествах, можно использовать методы соосаждения микрокомпонента с массовыми количествами устойчивого соединения – макрокомпонента. В этих случаях возможны различные виды соосаждения, отличающиеся друг от друга по механизму и законам, которые ими управляют [1], основными из которых являются:

- изоморфное соосаждение: радиоэлемент распределяется по всему объёму осадка, образуя с противоположно заряженным ионом твердой фазы соединение, изоморфное с осадком;
- адсорбционное соосаждение: радиоэлемент концентрируется на поверхности раздела фаз кристалл–раствор.

В обоих случаях наблюдаемые явления одинаковы – с образующимся осадком макрокомпонента соосаждаются другие вещества, которые, взятые отдельно, не дают осадка в этих условиях. Эти виды соосаждения можно различить только экспериментально – путем определения количества радиоэлемента, перешедшего в твердую фазу, в зависимости от следующих факторов:

- продолжительности процесса;
- величины удельной поверхности осадка макрокомпонента;
- содержания и изменения концентрации собственных ионов микрокомпонента;
- содержания и изменения концентрации посторонних многовалентных ионов.

Однако все-таки отличить адсорбционное соосаждение от изоморфного достаточно трудно, по-

этому чаще всего для установления механизма и физико-химических закономерностей соосаждения используют ряд экспериментальных методов.

До настоящего времени достаточно подробно были изучены лишь механизмы соосаждения немногих систем. Например, при изучении соосаждения ряда катионов с сульфатом калия и хлоридом натрия отмечалась большая роль адсорбции на поверхности кристаллов [2]. При соосаждении трехвалентного церия с оксалатами урана и тория особую роль играл захват микрокомпонента в процессе роста кристаллов из пересыщенного раствора [3]. Однако, несмотря на технологическое применение оксалатного осаждения для выделения трансураниевых элементов (ТУЭ), механизм их соосаждения детально не изучался. Имеется лишь ограниченное количество опубликованных работ, в которых приводятся экспериментально установленные условия, при которых оксалаты кальция, являясь наименее растворимыми из оксалатов щелочноземельных металлов, используются для выделения РЗЭ и актиноидов [4–7].

Достижение состояния равновесия в гетерофазных процессах, особенно в системах «твердое–жидкость», может осложняться установлением ложного равновесия из-за замедления обменных и химических реакций в твердой фазе на активных группах. Активность функциональной группы может проявляться как способность к ионному обмену (ионогенные группы), как возможность образования донорно-акцепторных комплексов (комплексобразующие группы), а также как способность к образованию полилигандных пространственных комплексов – хелатов (хелатообразующие группы).

В настоящее время теория сорбции из растворов находится в развитии, что объясняется сложностью изучаемого явления. До сих пор не существует теории, которая дала бы возможность количественно прогнозировать взаимодействие сорбент–сорбат и априори рассчитывать сорбционную емкость тех или иных сорбентов. Для решения таких задач имеют право на существование различные подходы и теории, дающие новые знания об изучаемых процессах [8, 9].

Экспериментальная часть

Соосаждение представляет собой одновременный переход микро- и макрокомпонентов в формирующуюся твердую фазу коллектора. Оно включает захват примеси на следующих стадиях: при росте частиц коллектора, при созревании осадка, при структурном и морфологическом совершенствовании частиц твердой фазы. При этом выполняется главное условие соосаждения – одновременность перехода микро- и макрокомпонентов из жидкой в твердую фазу [6, 10].

В работе рассматриваются некоторые закономерности оксалатного соосаждения трехвалентного иона америция с осадком оксалата кальция, которое может осуществляться как совместной сокристаллизацией микрокомпонента с макрокомпонентом (изоморфное соосаждение), так и адсорбцией микрокомпонента на поверхности осадка макрокомпонента (адсорбционное соосаждение).

При проведении исследований по установлению механизма соосаждения америция на носителе – оксалате кальция – квалификация используемых химических реактивов соответствовала требованиям марки не ниже х.ч. В работе использовали изотоп америция-241, состав твердой фазы носителя – оксалата кальция – соответствовал формуле $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [10, 11].

О сорбционных свойствах сорбента носителя можно судить по изотерме, характеризующей зависимость его сорбционной способности от концентрации в растворе сорбируемого на нём компонента при постоянной температуре. Исследования по определению показателей сорбции осуществляли по следующей методике. Сорбент массой 1,4 г помещали в колбу вместимостью 100,0 мл и заливали 100,0 мл модельного раствора. Модельные растворы готовили методом разбавления раствора нитрата америция (III) с концентрациями катионов Am^{3+} от 8,0 до 200,0 мг/л. В процессе исследований pH в растворах не корректировали. Смесь перемешивали электромагнитной мешалкой с числом оборотов не менее 1000 об/мин в течение 1 ч, сорбент отфильтровывали через 1 сутки на бумажном фильтре (белая лента). Концентрацию катионов америция (III) в исходном растворе и в фильтрате определяли гамма-спектрометрическим методом с использова-

нием спектрометрического комплекса СКС-07П [12], количество кальция – комплексонометрическим титрованием с мурексидом в качестве индикатора [13], концентрацию оксалат-иона – перманганатометрическим методом [13].

Результаты экспериментов и обсуждение

Каждый адсорбент характеризуется своей изотермой, являющейся основной характеристикой адсорбционной способности носителя, и по её форме можно судить о механизме процесса концентрирования.

Сорбционную емкость сорбента (A , моль/г) в условиях установившегося равновесия в системе определяли по формуле:

$$A = \frac{(C_1 - C_2) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где C_1 – исходная концентрация америция в растворе, моль/л; C_2 – равновесная концентрация америция в растворе после процесса сорбции, моль/л; V – объем раствора, л; m – масса сорбента, используемого для процесса сорбции, г. Полученные данные обрабатывали методом наименьших квадратов с использованием критерия Стьюдента при значении доверительной вероятности 0,95.

По полученным экспериментальным данным была рассчитана адсорбция на оксалате кальция ионов америция (III) из нитратных растворов с их разной исходной концентрацией по формуле (1), построена изотерма адсорбции, представленная графически на рис. 1.

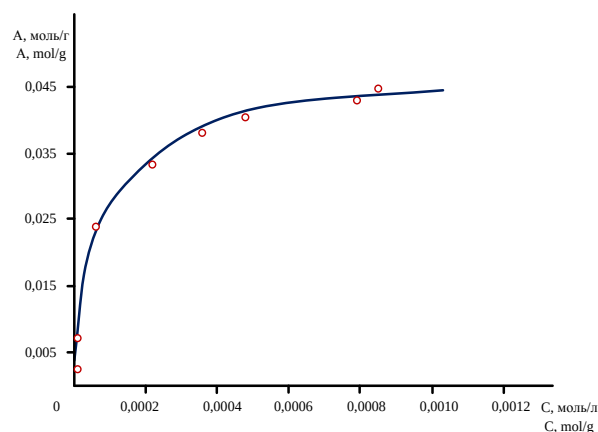


Рис. 1. Изотерма сорбции америция (III) на оксалате кальция

Fig. 1. Isotherm of americium (III) sorption with calcium oxalate

В литературе для большого ряда твердых сорбентов описаны десятки типов изотерм сорбции. Изотерму, представленную на рис. 1, можно отнести по классификации БДТ (Брунауэр, Деминг,

Деминг, Теллер) или Брунауэра к первому типу [14], описывающему мономолекулярную адсорбцию с образованием монослоя америция (III) на поверхности адсорбента – оксалата кальция. В этом случае сорбированные молекулы или ионы микрокомпонента располагаются в монослой на поверхности макрокомпонента. При заполнении его поверхности сорбент достигает состояния насыщения, чему соответствует плато на графике изотермы. Равновесие в сорбционных процессах определяется, в первую очередь, суперпозицией равновесий в фазах раствора и сорбента. Физико-химические подходы имеют наибольшее значение для понимания и количественного описания равновесия, особенно в условиях многообразия форм существования компонентов в их фазах. Эти подходы дают необходимую информацию по исходным и конечным формам реагирующих веществ и определяют пути возможного технологического воздействия на химические процессы. Именно они позволяют определить такие важнейшие параметры сорбции, как емкость и избирательность, а также найти возможности для направленного смещения равновесия и оценки возможной эффективности процессов в конкретных условиях их проведения [15–17].

Наиболее часто для аналитического описания ионообменных равновесий используют подход, основанный на применении закона действующих масс. В этом случае сложный гетерогенный процесс ионного обмена рассматривается как обратимая химическая реакция. Для количественного описания равновесия сорбции в интервале концентраций, отвечающих образованию монослоя, были использованы модели Ленгмюра и Фрейндлиха [18, 19].

Модель Ленгмюра. Согласно этой модели адсорбцию представляют как квазихимическую реакцию между адсорбатом и адсорбционными центрами поверхности адсорбента, что приводит к адсорбционному насыщению поверхности адсорбента по мере увеличения концентрации распределяемого вещества. Это представление является основополагающим в теории Ленгмюра и уточняется следующими дополнениями:

- 1) адсорбция локализована на отдельных адсорбционных центрах, каждый из которых взаимодействует только с одной молекулой адсорбата с образованием монослоя;
- 2) адсорбционные центры энергетически эквивалентны, поверхность сорбента эквипотенциальна;
- 3) адсорбированные молекулы не взаимодействуют друг с другом.

Обычно уравнение Ленгмюра используют в виде:

$$A = \frac{A_{\infty} \cdot K \cdot C}{1 + K \cdot C}, \quad (2)$$

где A – количество сорбируемого вещества, моль/г; A_{∞} – предельное количество сорбированного вещества (емкость адсорбционного монослоя), моль/г; C – равновесная концентрация адсорбтива, моль/л; K – константа сорбционного равновесия, характеризующая интенсивность процесса сорбции, л/моль.

Сродство между адсорбатом и адсорбентом можно оценить по величине безразмерного коэффициента разделения R_L , используя параметр K из уравнения Ленгмюра:

$$R_L = \frac{1}{(1 + K \cdot C_0)}, \quad (3)$$

где C_0 – начальная концентрация ионов металла в растворе, моль/л. В зависимости от величины коэффициента R_L адсорбционный процесс может быть оценен следующим образом: при $R_L > 1$ условия для его протекания неблагоприятны, при $R_L = 1$ наблюдается линейная зависимость, при $R_L = 0$ процесс сорбции будет протекать необратимо, а при $0 < R_L < 1$ условия для сорбции благоприятны [18].

Для определения параметров сорбции A_{∞} и K уравнение (2) преобразуем в линейную форму [20]:

$$\frac{C}{A} = C \cdot \frac{1}{A_{\infty}} + \frac{1}{A_{\infty} \cdot K}. \quad (4)$$

Результаты обработки изотермы сорбции америция (III) оксалатом кальция по модели Ленгмюра (уравнения (3), (4)) представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1. Результаты обработки данных изотермы по уравнению Ленгмюра

Table 1. Results of processing isotherm data according to the Langmuir equation

Концентрация америция (III) в растворе, моль/л Americium (III) concentration in solution, mol/l		Количество америция (III) на осадке оксалата кальция – A, моль/г Amount of americium (III) on the precipitate of calcium oxalate – A, mol/g	C/A	R _L
Исходная Basic	Равновесная (C) Equilibrium (C)			
0,003465	8,29876E-06	0,0024	0,0035	0,0297
0,010394	8,71369E-06	0,0072	0,0012	0,0101
0,034647	6,22407E-05	0,0240	0,0026	0,0031
0,048506	0,000219917	0,0335	0,0066	0,0022
0,041577	0,000323651	0,0286	0,0113	0,0025
0,055436	0,000356846	0,0382	0,0093	0,0019
0,0589	0,000477178	0,0406	0,0118	0,0018
0,062365	0,000792531	0,0428	0,0185	0,0017
0,06583	0,000850622	0,0451	0,0189	0,0016
0,051971	0,000871369	0,0355	0,0246	0,0020
0,069295	0,001029046	0,0474	0,0217	0,0015

Последующая математическая обработка экспериментальных данных (рис. 2) методом наименьших квадратов показала, что в координатах $C/A=f(C)$ изотерма сорбции описывается уравнением прямой (5) с высоким коэффициентом корреляции ($R^2=0,9520$):

$$y = 21,059x + 0,0022. \quad (5)$$

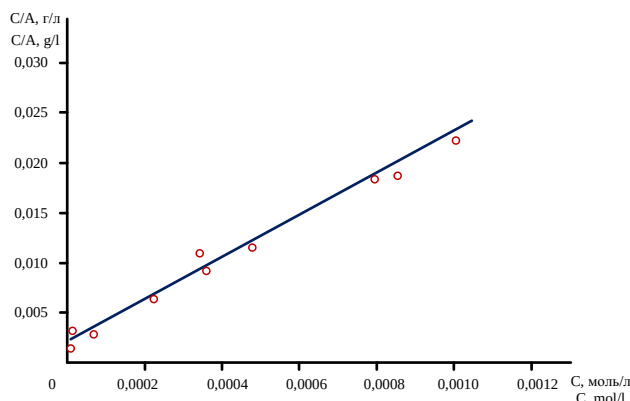


Рис. 2. Обработка изотермы сорбции америция (III) оксалатом кальция по модели Ленгмюра

Fig. 2. Treatment of the americium (III) sorption isotherm with calcium oxalate according to the Langmuir model

Это свидетельствует о том, что используемая модель уравнения Ленгмюра адекватно описывает процесс сорбции и позволяет достаточно надежно определить величины A_{∞} и K .

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что соосаждение америция (III) на осадке оксалата кальция протекает по адсорбционному механизму, поскольку величина R_L больше нуля, но меньше единицы.

Известно, что модель Ленгмюра справедлива для мономолекулярной адсорбции, протекающей на адсорбенте с энергетически эквивалентными адсорбционными центрами. Реальная же поверхность сорбента такими свойствами не обладает и в случае сорбентов с неоднородной поверхностью при обработке экспериментальных данных широко используется эмпирическое уравнение Фрейндлиха.

Модель Фрейндлиха. Сорбционные центры по этой модели обладают различными величинами энергии, поэтому в первую очередь происходит заполнение активных сорбционных центров с максимальной энергией.

При обработке экспериментальных данных изотерму адсорбции часто описывают эмпирическим уравнением в виде степенной функции [20]:

$$A = K \cdot C^{1/n}, \quad (6)$$

где A – количество сорбируемого вещества, моль/г; n – константа изотермы Фрейндлиха, показывающая интенсивность сорбции и распределение активных центров; K – константа изотермы Фрейндлиха, отражающая относительную сорбционную способность; C – равновесная концентрация адсорбтива, моль/л. В логарифмической форме уравнение (6) принимает вид:

$$\lg A = \lg K + \frac{1}{n} \lg C. \quad (7)$$

Если $n < 1$, энергия связей возрастает, при $n > 1$ энергия связи сорбент–сорбат уменьшается по мере заполнения поверхности; в случае $n = 1$ все сорбционные центры эквивалентны [15].

Представление экспериментальных данных (табл. 2) по уравнению (7) в координатах $\lg A = f(\lg C)$ позволяет графически определить значения K и n (рис. 3) [20]. Последующая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что изотерма сорбции описывается уравнением прямой (8) с коэффициентом корреляции ($R^2 = 0,8520$):

$$y = 0,4871x + 0,4234. \quad (8)$$

Результаты обработки изотермы сорбции америция (III) оксалатом кальция по модели Фрейндлиха представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2. Результаты обработки данных по уравнению Фрейндлиха

Table 2. Results of data processing according to the Freundlich equation

Концентрация америция (III) в растворе, моль/л Americium (III) concentration in solution, mol/l		Количество америция (III) на осадке оксалата кальция – A , моль/г Amount of americium (III) on the precipitate of calcium oxalate – A , mol/g	$\lg A$	$\lg C$
Исходная Basic	Равновесная (C) Equilibrium (C)			
0,003465	8,29876E-06	0,0024	–6,0322	0,0297
0,010394	8,71369E-06	0,0072	–4,9320	0,0101
0,034647	6,22407E-05	0,0240	–3,7290	0,0031
0,048506	0,000219917	0,0335	–3,3953	0,0022
0,041577	0,000323651	0,0286	–3,5527	0,0025
0,055436	0,000356846	0,0382	–3,2636	0,0020
0,0589	0,000477178	0,0406	–3,2047	0,0018
0,062365	0,000792531	0,0428	–3,1522	0,0017
0,06583	0,000850622	0,0451	–3,0983	0,0016
0,051971	0,000871369	0,0355	–3,3386	0,0020
0,069295	0,001029046	0,0474	–3,0490	0,0015

Примечание/Note: $K = 1,527$, $n = 2,053$ моль/г (mol/l).

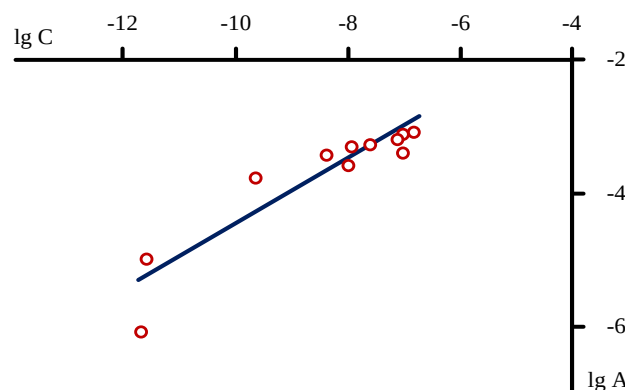


Рис. 3. Обработка изотермы сорбции америция (III) оксалатом кальция по модели Фрейндлиха

Fig. 3. Treatment of the americium (III) sorption isotherm with calcium oxalate according to the Freundlich model

Сравнения значений коэффициентов корреляции, полученных при линейаризации изотермы мономолекулярной сорбции америция (III) на осадке оксалате кальция по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха (табл. 1, 2) показывают, что сорбция с большей вероятностью описывается уравнением Ленгмюра.

Таким образом, в ходе проведенных исследований показано, что соосаждение америция (III) из кислых нитратных растворов на осадке оксалата кальция протекает по адсорбционному механизму и описывается моделью Ленгмюра, что соответствует образованию мономолекулярного сорбционного слоя на поверхности сорбента.

Обработка результатов экспериментов расчетными и графическими методами

Подтвердить или опровергнуть этот механизм можно и другими методами. Максимально быстро и достаточно эффективно отличить сокристаллизацию от адсорбции можно по скорости соосаждения. Поскольку при сокристаллизации радиоэлемент должен распределиться равномерно по всему объему осадка, установление равновесия при перемешивании осадка с раствором, содержащим радиоэлемент, требует значительного времени (от 2 до 3 недель при комнатной температуре). Соответственно, количество радиоэлемента, перешедшее в твердую фазу, при добавлении его к готовой суспензии значительно меньше, чем при осаждении носителя в присутствии радиоэлемента. При адсорбции равновесие устанавливается быстро (от 15 до 20 минут), и поэтому величина сорбции будет мало зависеть от момента ввода в раствор радиоэлемента [21].

Для оценки доли в соосаждении адсорбции и сокристаллизации в изучаемой системе по известной методике [21] проводили определение доли америция (III), соосажденного из азотнокислого раствора на оксалате кальция за определенный промежуток времени. Результаты полученных исследований приведены в табл. 3. Степень очистки раствора от америция при соосаждении его на твердом носителе – оксалате кальция – рассчитывали по уравнению (9):

$$\alpha = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \cdot 100, \quad (9)$$

где α – доля америция (III), соосаждающегося на носителе оксалате кальция; C_0 и C_1 – концентрация америция (III) в исходном и конечном растворах, моль/л.

Как следует из результатов табл. 3, при осаждении оксалата кальция америций (III) соосаждался с ним независимо от того, присутствовал ли он в растворе до начала кристаллизации осадка или вводился уже после его образования.

Таблица 3. Количество америция (III), соосажденного на носителе – оксалате кальция

Table 3. Amount of americium (III) co-deposited on the carrier – calcium oxalate

Продолжительность соосаждения, мин Duration of co-precipitation, min	Доля америция, соосажденного на оксалате кальция, α , мас. %, в опыте Proportion of americium co-precipitated on calcium oxalate, α , wt %, in the experiment					Условие Condition
	1	2	3	4	Среднее значение Average value	
5	38,2	27,6	43,3	48,2	39,3	На сформированном осадке On the formed sediment
10	50,2	60,3	66,3	54,1	57,7	
30	77,2	87,4	72,5	79,4	79,1	
60	93,1	82,1	90,4	85,6	87,8	
120	96,9	98,4	99,5	93,9	97,1	
180	95,2	98,7	99,3	98,8	98,0	На формирующемся осадке On the forming sediment
5	51,3	54,6	28,8	53,7	47,1	
10	72,8	57,8	65,2	70,2	66,5	
30	80,2	77,2	86,4	85,8	82,4	
60	96,6	97,5	86,4	90,3	92,7	
120	98,8	96,7	99,1	97,5	98,0	
180	99,6	98,8	98,8	98,3	98,8	

Из результатов, представленных в табл. 3, следует, что равновесие в исследуемой системе устанавливается быстро. Уже при изменении продолжительности процесса от 30 до 180 мин доля америция (III), соосажденного на оксалате кальция, достигает значения от 85,0 до 99,0 мас. %, соответственно. При этом количество америция, соосаждающегося с оксалатом кальция, мало зависело от момента ввода радиоэлемента. Этот факт также указывает на заметную роль адсорбции в механизме соосаждения.

В литературе часто для адсорбционного соосаждения используют уравнение [22]:

$$C_2 = \alpha \cdot C_1^{1/n}, \quad (10)$$

где C_2 – количество соосажденного микрокомпонента; C_1 – количество микрокомпонента, оставшееся в растворе; α и n – постоянные величины. Изотерма, описываемая по уравнению (10), на графике в координатах $C_2=f(C_1)$ представляет характерную кривую линию (рис. 4).

В случае изоморфного соосаждения изотерма может быть описана уравнением [21]:

$$\frac{x}{a-x} = D \frac{y}{b-y}, \quad (11)$$

где x – количество соосажденного микрокомпонента, равное C_2 ; a – начальное количество микрокомпонента; y – количество осажденного макрокомпонента; b – начальное количество макрокомпонента; D – коэффициент распределения; $a-x$ – количество микрокомпонента, остающегося в растворе, равное C_1 . При постоянном количестве макрокомпонента и постоянных условиях осаждения правая часть

уравнения (11) остается постоянной. Значит, и левая часть этого уравнения должна быть тоже постоянной, поэтому отношение соосажденного количества микрокомпонента к оставшемуся количеству его в растворе не изменяется при изменении начальных количеств микрокомпонента. Отсюда следует, что изотерма изоморфного соосаждения представляет собой в координатах $C_2=f(C_1)$ прямую линию, проходящую под углом 45° через начало координат.

Для подтверждения механизма соосаждения (адсорбционное или изоморфное соосаждение) необходимо провести процесс соосаждения при переменных количествах микрокомпонента и постоянных количествах макрокомпонента. Построив изотерму соосаждения, обработав полученные результаты графически и представив полученные зависимости в логарифмических координатах $\lg C_2=f(\lg C_1)$, можно найти угол наклона полученной прямой. В случае если преобладает процесс изоморфного соосаждения, угол наклона прямой должен быть близок к 45° , а в случае адсорбционного – менее 45° [22]. Таким образом, по характеру получаемой изотермы также можно отличать изоморфное соосаждение от адсорбционного.

В рассматриваемых далее опытах соосаждение проводили в течение 30 минут. Эта величина была выбрана с таким расчетом, чтобы полностью завершилась быстрая стадия процесса и основная масса америция (III) соосадилась на носителе. Такой методологический подход подтверждается данными, представленными в [21].

Результаты исследований соосаждения америция на оксалате кальция в виде изотермы соосаждения в координатах $C_2=f(C_1)$ графически представлены на рис. 4.

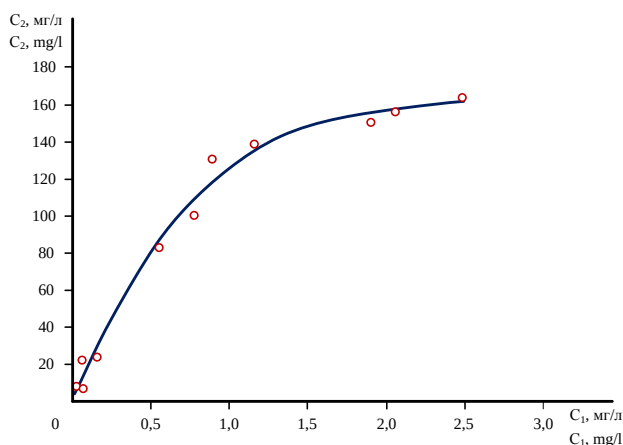


Рис. 4. Изотерма соосаждения америция на оксалате кальция

Fig. 4. Isotherm of americium co-precipitation with calcium oxalate

Последующая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что она описывается уравнением (12) с коэффициентом достоверности аппроксимации ($R^2=0,9167$):

$$y = 13,955x^3 - 89,67x^2 + 201,83x. \quad (12)$$

Из рис. 4 следует, что полученная изотерма представляет кривую линию, характерную для процесса адсорбционного осаждения. Последующая обработка экспериментальных данных по уравнению (10) и методике, представленной в [22], показала, что графически эта зависимость в логарифмических координатах $\lg C_2=f(\lg C_1)$ (рис. 5) описывается уравнением прямой линии (13) с углом наклона 26° при величине достоверности аппроксимации $R^2=0,8803$:

$$y = 0,6375x + 2,0519. \quad (13)$$

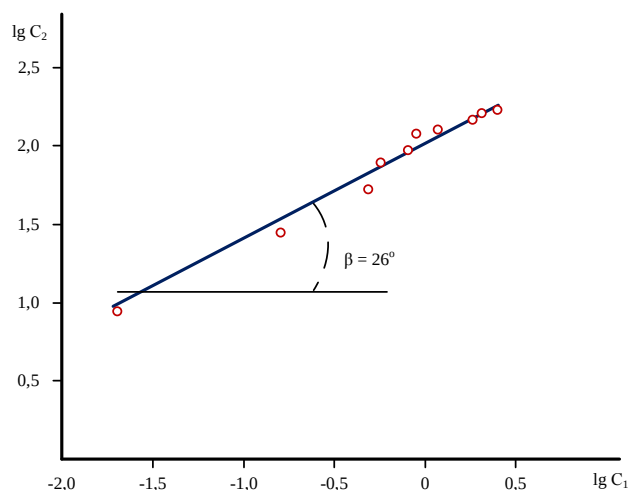


Рис. 5. Изотерма соосаждения америция (III) на оксалате кальция в логарифмических координатах $\lg C_2=f(\lg C_1)$

Fig. 5. Isotherm of americium (III) co-precipitation with calcium oxalate in logarithmic coordinates $\lg C_2=f(\lg C_1)$

Полученные результаты также указывают на механизм адсорбционного соосаждения америция (III) на осадке оксалата кальция, поскольку угол наклона прямой, соответствует 26° , т. е. меньше 45° .

Заключение

В ходе проведенных исследований и обработки полученных результатов расчетными и графическими методами установлено, что соосаждение из нитратных растворов америция (III) с оксалатом кальция в большей степени обусловлено адсорбцией микрокомпонента – америция (III) – на поверхности имеющегося или вновь образующегося осадка макрокомпонента – оксалата кальция.

Это подтверждается тем, что:

- 1) адсорбция америция на оксалате кальция из кислых нитратных растворов описывается моделью Ленгмюра, что соответствует образова-

нию мономолекулярного сорбционного слоя в данных условиях;

- 2) равновесие в системе при адсорбции достигается достаточно быстро, в отличие от сокристаллизации, при которой установление равновесия требует значительного времени. Величина сорбции незначительно зависит от момента ввода в раствор радиоэлемента;
- 3) изотерма адсорбционного соосаждения выражается характерной криволинейной зависимостью,

которая в логарифмических координатах представляет собой прямую линию с углом наклона 26° , что меньше 45° , характеризующего изоморфное соосаждение.

На основании вышесказанного следует, что система $\text{Am(III)} - \text{CaC}_2\text{O}_4$ дополняет группу систем, для которых в процессе соосаждения характерна преобладающая роль адсорбции микрокомпонента на носителе – макрокомпоненте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селявский В.Ю., Буйновский А.С., Муслимова А.В. Механизм соосаждения америция (III) на оксалате кальция из азотнокислых растворов // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: Материалы конференции в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ. – Северск: НИЯУ «МИФИ» СТИ, 2016. – С. 23–24.
2. Мелихов И.В., Киркорова Е.К. Соосаждение Се с кристаллами K_2SO_4 // Журнал Радиохимии. – 1964. – Т. 6. – № 1. – С. 5–11.
3. Kummer J.T., Youngs J.D. The surface composition of a dilute solid solution of calcium chloride in sodium chloride // Journal of Physical Chemistry. – 1963. – Vol. 67. – P. 107–109.
4. Исследование процесса очистки воднохвостовых растворов от америция с использованием оксалата кальция / В.Ю. Селявский, В.Г. Кочетков, С.А. Житков, А.С. Буйновский, В.Л. Софронов // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 4/2. – С. 257–264.
5. Ryan V.A., Pringle J.W. Preparation of pure americium. – Denver, Colo.: Dow Chemical Company, Rocky Flats Plant, 1960. – 24 p.
6. Street K. Jr., Seaborg G.T. The separation of americium and curium from the rare earth elements // Journal of the American Chemical Society. – 1950. – Vol. 72. – P. 2790–2792.
7. Madic C., Kertesz C., Sontag R. Application of extraction chromatography to the recovery of neptunium, plutonium and americium from an industrial waste // Separation Science and Technology. – 1980. – Vol. 15. – № 4. – P. 745–762.
8. Захаров А.Г., Прусов А.Н., Воронова М.И. Применимость теории объемного заполнения микропор к сорбции из растворов на природных и синтетических полимерах // Сборник трудов. Проблемы химии растворов и технологии жидкофазных материалов. – Иваново: ИГХТУ, 2001. – С. 202–209.
9. Flax shive as a source of activated carbon for adsorption of methylene blue / A.N. Prusov, S.M. Prusova, M.V. Radugin, A.V. Bazanov // Journal fullerenes nanotubes and carbon nanostructures. – 2021. – Vol. 29. – № 9. – P. 685–694.
10. Исследование размеров частиц оксалата кальция, полученных осаждением из азотнокислых растворов / В.Ю. Селявский, А.С. Буйновский, В.Л. Софронов, Е.В. Селявская // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 8. – С. 86–91.
11. Исследование растворимости оксалата кальция / В.Ю. Селявский, А.С. Буйновский, В.Л. Софронов, Е.В. Селявская // Вестник НИЯУ «МИФИ». – 2017. – Т. 6. – № 1. – С. 16–25.
12. Методика выполнения измерения. Измерение концентрации америций-241 в пробах технологических растворов с применением гамма-спектрометрического комплекса СКС-07. – Северск: АО «Сибирский химический комбинат», 2022. – 12 с.
13. Методика выполнения анализов. Методы анализа технологических продуктов. – Северск: АО «Сибирский химический комбинат», 2021. – 83 с.
14. Колпакова Н.А., Минакова Т.С. Термодинамика и кинетика сорбционного концентрирования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – 229 с.
15. Никифорова Т.Е. Физико-химические основы хемосорбции ионов d-металлов модифицированными целлюлозосодержащими материалами: дис. ... д-ра хим. наук. – Иваново, 2014. – 365 с.
16. Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Sofronov A.R. Effect of chemical modification of cotton cellulose by aminoacetic acid on the sorption of Cu(II) and Fe(II) ions // From chemistry towards technology step-by-step. – 2023. – Vol. 4. – № 1. – P. 107–116.
17. Nikiforova T.E., Vokurova D.A. Sorption of heavy metal ions from aqueous solutions by cellulose sorbent agent // From chemistry towards technology step-by-step. – 2022. – Vol. 3. – № 1. – P. 76–87.
18. Hubbe M.A., Hasan S.H., Ducoste J.J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 1. Metals // BioResources. – 2011. – Vol. 6. – № 2. – P. 2181–2287.
19. Hubbe M.A., Beck K.R., O'Neal W.G. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 2. Dyes // BioResources. – 2012. – Vol. 7. – № 2. – P. 2592–2687.
20. Ильина Е.Б., Мареичева Е.Е. Адсорбция. – М.: МАИ, 2022. – 110 с.
21. Хлопин В.Г. Избранные труды. Т. 1. – М.: АН СССР, 1957. – 375 с.
22. Коренман И.П. Отличительные признаки изоморфного и адсорбционного соосаждения // Журнал общей химии. – 1955. – Т. 25. – № 13. – С. 2399–2401.

Информация об авторах

Владимир Леонидович Софронов, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. vlsfronov@mephi.ru

Вадим Юрьевич Селявский, начальник опытно-технологического участка по работе с радиоактивными веществами и ядерными материалами АО «Сибирский химический комбинат», ГК «Росатом», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1. shk@atomsib.ru

Поступила в редакцию: 12.02.2024

Поступила после рецензирования: 01.03.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Selyavskiy V.Yu., Buinovskiy A.S., Muslimova A.V. Mechanism of co-precipitation of americium (III) on calcium oxalate from nitric acid solutions. *Actual problems of innovative development of nuclear technologies. Proc. of the conference within the framework of the Scientific session of NRNU MEPhI*. Seversk, NRNU «MEPhI» STI Publ., 2016. pp 23–24. (In Russ.)
2. Melikhov I.V., Kirkorova E.K. Co-deposition of Ce with K_2SO_4 crystals. *Journal of Radiochemistry*, 1964, vol. 6, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.)
3. Kummer J.T., Youngs J.D. The surface composition of a dilute solid solution of calcium chloride in sodium chloride. *Journal of Physical Chemistry*, 1963, vol. 67, pp. 107–109.
4. Selyavskiy V.Yu., Kochetkov V.G., Zhitkov S.A., Buynovskiy A.S., Sofronov V.L. The research of purification of watertail solutions from americium by means of calcium oxalate. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 4/2, pp. 257–264. (In Russ.)
5. Ryan V.A., Pringle J.W. *Preparation of pure americium*. Denver, Colo., Dow Chemical Company, Rocky Flats Plant, 1960. 24 p.
6. Street K. Jr., Seaborg G.T. The Separation of Americium and Curium from the Rare Earth Elements. *Journal of the American Chemical Society*, 1950, vol. 72, pp. 2790–2792.
7. Madic C., Kertesz C., Sontag R. Application of extraction chromatography to the recovery of neptunium, plutonium and americium from an industrial waste. *Separation Science and Technology*, 1980, vol. 15, no. 4, pp. 745–762.
8. Zakharov A.G., Prusov A.N., Voronova M.I. Applicability of the theory of volumetric filling of micropores to sorption from solutions on natural and synthetic polymers. *Proceedings Problems of chemistry of solutions and technology of liquid-phase materials*. Ivanovo, 2001. pp. 202–209. (In Russ.)
9. Prusov A.N., Prusova S.M., Radugin M.V., Bazanov A.V. Flax shive as a source of activated carbon for adsorption of methylene blue. *Journal fullerenes nanotubes and carbon nanostructures*, 2021, vol. 29, no. 9, pp. 685–694.
10. Selyavskiy V.Yu., Buinovskiy A.S., Sofronov V.L., Selyavskaya E.V. Investigation of the sizes of calcium oxalate particles obtained by precipitation from nitric acid solutions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 8, pp. 86–91. (In Russ.)
11. Selyavskiy V.Yu., Buinovskiy A.S., Sofronov V.L., Selyavskaya E.V. Investigation of the solubility of calcium oxalate. *Bulletin of the National Research Institute «MEPhI»*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 16–25. (In Russ.)
12. *Method of measurement. Measurement of the concentration of americium-241 in samples of technological solutions using the gamma-spectrometric complex SCS-07*. Seversk, JSC «Siberian Chemical Combine» Publ., 2022. 12 p.
13. *Method of performing analyses. Methods of analysis of technological products*. Seversk, JSC «Siberian Chemical Combine» Publ., 2021. 83 p.
14. Kolpakova N.A., Minakova T.S. *Thermodynamics and kinetics of sorption concentration*. Tomsk, TPU Publ., 2021. 229 p.
15. Nikiforova T.E. *Physico-chemical bases of chemisorption of d-metal ions by modified cellulose-containing materials*. Dr. Diss. Ivanovo, 2014. 365 p.
16. Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Sofronov A.R. Effect of chemical modification of cotton cellulose by aminoacetic acid on the sorption of Cu(II) and Fe(II) ions. *From chemistry towards technology step-by-step*, 2023, vol. 4, no. 1, pp. 107–116.
17. Nikiforova T.E., Vokurova D.A. Sorption of heavy metal ions from aqueous solutions by cellulose sorbent agent. *From chemistry towards technology step-by-step*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 76–87.
18. Hubbe M.A., Hasan S.H., Ducoste J.J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 1. Metals. *BioResources*, 2011, vol. 6, no. 2, pp. 2181–2287.
19. Hubbe M.A., Beck K.R., O'Neal W.G. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 2. Dyes. *BioResources*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 2592–2687.
20. Ilyina E.B., Mareicheva E.E. *Adsorption*. Moscow, MAI Publ., 2022. 110 p.
21. Khlopkin V.G. *Selected works*. Vol. 1. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1957. 375 p.
22. Korenman I.P. Distinctive features of isomorphic and adsorption co-deposition. *Journal of General Chemistry*, 1955, vol. 25, no. 13, pp. 2399–2401. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir L. Sofronov, Dr. Sc., Professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation. vlosofronov@mephi.ru

Vadim Yu. Selyavskiy, Head of the Experimental and Technological Section for Work with Radioactive Substances and Nuclear Materials, JSC «Siberian Chemical Combine», 1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russian Federation. shk@atomsib.ru

Received: 12.02.2024

Revised: 01.03.2024

Accepted: 22.03.2024

УДК 550.3

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4539

Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Формирование петрофизических взаимосвязей типа «кern–кern» для создания модели свойств коллекторов

М.О. Коровин^{1✉}, А.О. Алеева^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² АО «ТомскНИПИнефть», Россия, г. Томск

✉ korovinmo@hw.tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования состоит в необходимости детального анализа распределения физических свойств пласта в пространстве. В настоящее время параметры, связывающие результаты откликов геофизических полей и петрофизических исследований керна, осредняются. С одной стороны, это происходит из-за малого количества скважин с керном на месторождениях, а с другой – для упрощения и ускорения расчётов при наличии большого количества скважин с геофизическими исследованиями. Однако такой подход не позволяет выявить наибольшее число характеристик, свойственных конкретному пласту или разрезу. Это, в свою очередь, может повлечь неточности в вычислении фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора. При осреднении параметров происходит потеря особенностей формирования залежи в частях месторождения с отбором керна, что не позволяет сформировать более точно ёмкостную модель месторождения. *Цель:* сгенерировать карту распределения плотности скелета по результатам керновых исследований для надугольной толщи терригенного нефтяного пласта; проанализировать полученную карту распределения, выявить области с повышенными и пониженными значениями плотности; оценить степень изменения коэффициента пористости при сопоставлении с величинами плотности; выделить области повышенной и пониженной плотности, выявить тренды её изменения. *Объект:* надугольная толща терригенных отложений одного из пластов нефтяного месторождения на территории Томской области. *Методы.* Анализ петрофизической базы данных способствует формированию концептуального строения залежи. Лабораторные исследования керна – источник самой достоверной информации о фильтрационно-ёмкостных свойствах пласта. Методика анализа подразумевает поскважинное построение зависимостей петрофизических параметров и определение величины постоянной плотности скелета. Дополнительно строится общая зависимость по всем скважинам для сопоставления значений и выявления максимальных и минимальных границ параметров. Строятся карты распределения плотности скелета и проводится анализ получившихся зон с пониженными и повышенными значениями плотности. Поскважинная дифференциация значений приводит к повышению детализации распределения изучаемого параметра и выявлению зон с аномально высокими и низкими значениями для более детальной проработки и формирования концептуальной геологической модели.

Ключевые слова: петрофизические зависимости, объёмная плотность, коэффициент пористости, карта распределения петрофизического параметра, вариативность параметров

Для цитирования: Коровин М.О., Алеева А.О. Формирование петрофизических взаимосвязей типа «кern–кern» для создания модели свойств коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 73–79. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4539

UDC 550.3

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4539

“Core–core” petrophysical relationships generation for reservoir modeling

M.O. Korovin^{1✉}, A.O. Aleeva^{1,2}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² TomskNIPIneft JSC, Tomsk, Russian Federation

✉ korovinmo@hw.tpu.ru

Abstract. Relevance. The need in a detailed analysis of distribution of physical properties of the formation in space. Currently, the parameters connecting the results of responses of geophysical fields and petrophysical studies of core are averaged. On the one hand, this is due to the small number of wells with cores in the fields, and on the other hand, to simplify and speed up calculations in the presence of a large number of wells with geophysical surveys of wells. However, this approach does not allow us to identify the largest number of a particular layer or section characteristics. This, in its turn, may lead to inaccuracies in calculating filtration and capacitance properties. When averaging parameters, the features of formation of the deposit in parts of the field with core sampling are lost. And this is a very big opportunity to more accurately form facies models of deposits. **Aims.** To generate a map of skeletal density distribution based on core data for the supra-coal strata of a terrigenous oil reservoir; analyze the resulting distribution map, identify areas with increased and decreased density values; assess the degree of change in the porosity coefficient when compared with density values; identify areas of high and low density and trends. **Object.** Supra-coal strata of terrigenous sediments of one of the layers of an oil field in the Tomsk region. **Methods.** Analysis of the petrophysical database leads to formation of an idea of the reservoir. Laboratory core studies are the source of the most reliable information about the filtration and reservoir properties of the formation. The analysis technique involves the well-by-well construction of dependencies of petrophysical parameters and determination of the value of the constant density of the skeleton. Additionally, a general relationship is built for all wells to compare values and identify maximum and minimum parameters boundaries, skeletal density distribution map and resulting zones with low- and high-density values analysis. Borehole differentiation of values leads to increased detail of the distribution of the studied parameter and identification of zones with abnormally high and low values for more detailed study and the formation of a conceptual geological model.

Keywords: petrophysical dependencies, bulk density, porosity coefficient, parameter distribution map, parameter variability

For citation: Korovin M.O., Aleeva A.O. "Core–core" petrophysical relationships generation for reservoir modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 73–79. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4539

Введение

Анализ кернового материала является неотъемлемым этапом создания литологической, петрофизической, геологической, гидродинамической моделей продуктивного коллектора. Анализ исходных данных позволяет понять геологические предпосылки формирования пластов-коллекторов и дальнейшего распределения свойств в межскважинном пространстве и по вертикали разреза.

Современные технологии позволяют создать не только базовые зависимости, но и проанализировать дополнительные взаимосвязи между параметрами.

Геологические особенности месторождения

При анализе керновых данных необходимо учитывать геологические особенности формирования залежей в пределах месторождения. Представление о формировании залежи позволит скорректировать или подтвердить закономерности распределения свойств продуктивного пласта. В источниках литературы приводятся способы применения двух и более зависимостей для расчёта проницаемости [1–5]. Объектом исследований является пласт Ю₁¹⁻², входящий в состав надугольной пачки васюганской свиты.

Предпосылки формирования петрофизических взаимосвязей типа «кern–кern»

Из названия типа взаимосвязей становится понятно, что на всех графиках зависимостей по осям абсцисс и ординат будут данные петрофизических исследований керна. Имеющиеся данные включают исследования коэффициентов карбонатности, пористости, проницаемости, остаточной водонасы-

щенности, плотности (абсолютно сухого образца, максимально увлажнённого, минералогическая), электрических параметров (параметр пористости, параметр насыщенности, удельное электрическое сопротивление образца), акустических параметров (скорость пробега продольных волн) [6–10].

Взаимосвязи, полученные при лабораторных исследованиях керна, являются наиболее достоверными при характеристике параметров горных пород. Особенно важно, чтобы каждый пласт был охарактеризован большим количеством исследований для создания надёжных взаимосвязей и учёта неоднородностей разреза по вертикали.

Такие взаимосвязи позволяют получать формулы для перехода от геофизических характеристик к геологическим. Так, например, через данные плотности или акустических свойств можно перейти к пористости или получить коэффициенты уравнения Арчи–Дахнова через исследования электрических свойств [11–16].

Дополнительно необходимо отметить принципы формирования петрофизического обоснования интерпретации геолого-геофизических данных. Как правило, для одного стратиграфического пласта формируется набор зависимостей, а в дальнейшем полученные коэффициенты и уравнения используются для расчёта фильтрационно-ёмкостных свойств.

При таком подходе не учитывается неоднородность распределения свойств по площади. Анализируя данные, мы можем наблюдать, что значения плотности, акустических, электрических свойств меняются не только по вертикали, но и по горизонтальной составляющей [17–20].

Петрофизические исследования изучаемого пласта

Петрофизические исследования – наиболее удобный и наглядный источник информации для анализа коллекторских свойств пласта. Рассмотрим следующий пример (рис. 1).

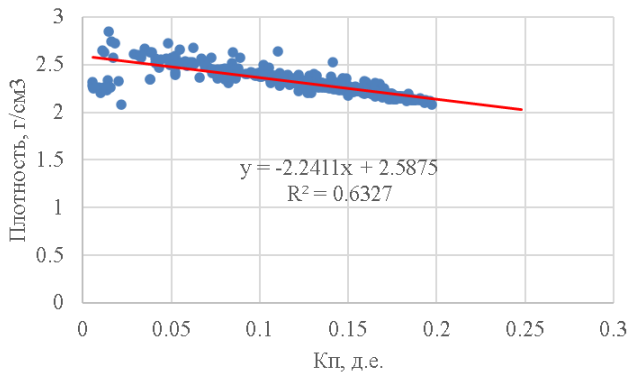


Рис. 1. Зависимость плотности абсолютно сухого образца от коэффициента пористости по керну. Данные по всем скважинам

Fig. 1. Density (dried plugs) vs core porosity. All wells datasets

В данном случае плотность матрицы, исходя из уравнения, будет составлять 2,5875 г/см³. Однако при таком подходе на всей территории пласта будет использоваться единый коэффициент. Расчёты в таком виде целесообразно проводить в полностью однородной среде, когда заранее предполагается

отсутствие изменения свойств по площади месторождения. В действительности наблюдается следующая картина (рис. 2).

При анализе рис. 2 получается, что пористость, вычисляемая через сформированные уравнения, составляет 0,09, 0,0968, 0,0992 и 0,0993 д.е. Очень близкие значения, как в абсолютных, так и в относительных величинах. Следует отметить, что в данных пересчётах не участвует плотность флюида, заполняющего поры породы. Плотность флюида зависит от типа бурового раствора и его концентрации и может варьироваться от 0,8 до 1,2 г/см³, и значительно влиять на итоговое значение пористости.

Плотность матрицы изменяется от 2,6466 до 2,7274 г/см³ (рис. 3) При увеличении плотности матрицы горной породы и постоянных значениях плотности фильтрата бурового раствора и породы наблюдается увеличение коэффициента пористости. Так, например, при среднем значении плотности матрицы, равном 2,65 г/см³, и при изменении этого параметра до 2,63 и 2,73 г/см³ коэффициент пористости будет меняться на 6,9 и 25,9 %, соответственно. Такие расчёты получаются при плотности фильтрата бурового раствора, равной 1 г/см³, и уравнении расчёта пористости (таблица, рис. 3):

$$K_{п} = (\rho_m - \rho_b) / (\rho_m - \rho_f),$$

где ρ_m – плотность скелета, г/см³; ρ_f – плотность фильтрата бурового раствора, г/см³ (принята равной 1); ρ_b – плотность породы, г/см³ (принята равной 2,4).

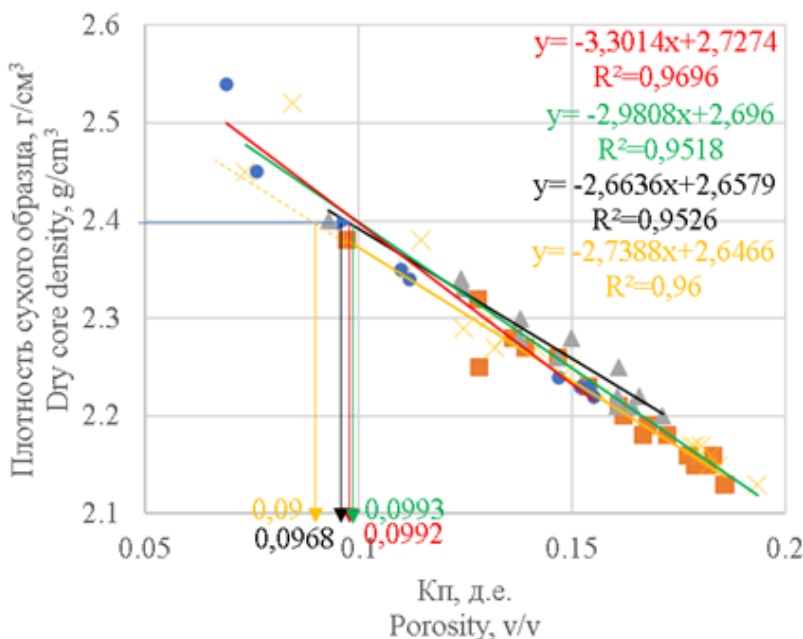


Рис. 2. Зависимость плотности абсолютно сухого образца от коэффициента пористости по керну. Данные по отдельным скважинам (каждый цвет соответствует одной скважине)

Fig. 2. Density (dried plugs) vs core porosity. Separate wells datasets (each color fits one well)

Таблица 1. Сопоставление полученных значений коэффициента пористости

Table 1. Porosity coefficients comparison

$\rho_m, \text{г/см}^3 (\text{g/cm}^3)$	$\rho_b, \text{г/см}^3 (\text{g/cm}^3)$	Кп, д.е./Porosity, v/v	$\Delta, \%$
2,63	2,4	0,141	0,069
2,65	2,4	0,152	0
2,73	2,4	0,191	0,259

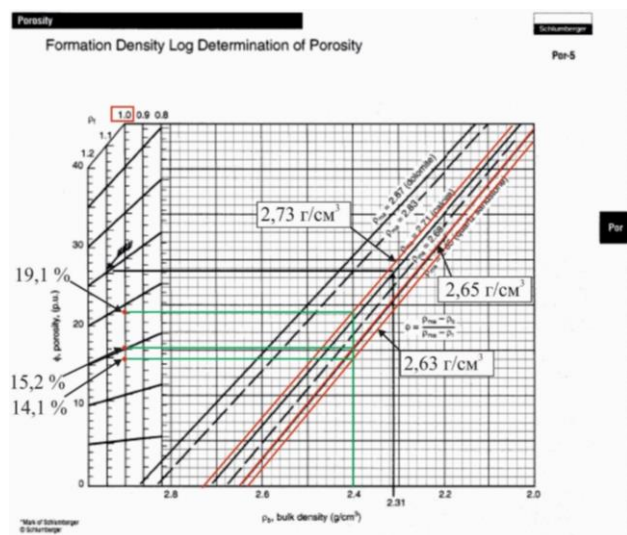


Рис. 3. Вычисление коэффициента пористости (на-летка Por-5 Schlumberger)

Fig. 3. Porosity coefficient calculation (chart Por-5 Schlumberger)

Уже на этапе анализа данных керна становится очевидно, что плотностные характеристики и, соответственно, фильтрационно-ёмкостные свойства могут значительно различаться в зависимости от выбора скважины.

Плотность тесно связана с физико-химическим свойствами горных пород и влияет на величину акустических и радиоактивных параметров. На данном этапе происходит анализ плотности твёрдой фазы пород. Эта величина зависит от значений плотности минералов (глинистые, породообразующие, сопутствующие тяжёлые) в составе породы.

Твёрдая фаза может быть:

- мономинеральной. При этом плотность фазы сопоставима с плотностью породообразующего минерала;
- полиминеральной. При этом плотность фазы определяется значением средневзвешенной плотности минералов в составе.

Ограничения применения такого подхода к анализу данных и построению петрофизической моде-

ли обусловлены количеством скважин с исследованиями керна и кратному увеличению количества создаваемых зависимостей различных параметров.

В противовес ограничениям, в результате будет получена максимально детальная петрофизическая модель с изменениями свойств, приближенными к фактическим распределениям.

На рис. 4 отображено распределение величин плотности скелета, полученных по отдельным скважинам для исследуемого пласта. Анализируя карту, можно выделить зоны повышенных и пониженных значений плотности скелета. Величины плотности варьируются от 2,5236 до 2,9445 г/см³. Исходя из этих данных явно выделяются зоны, в которых будут прогнозироваться соответствующие величины пористости. При увеличении плотности скелета коэффициент пористости будет увеличиваться (рис. 2) при остальных постоянных коэффициентах.

Дополнительно вариации плотности свидетельствуют об изменяющемся минералогическом составе пород, увеличении или уменьшении содержания минералов повышенной плотности, или об общем уплотнении (разуплотнении) по латерали пласта. Гранулометрический состав терригенных отложений – индикатор гидродинамической активности территории осадконакопления. При наличии детальных гранулометрических исследований становится возможным дополнительно формировать фациальное зонирование в пределах пласта.

Количество скважин, безусловно, влияет на детализацию карты в разных частях. В юго-восточной части скважин мало, поэтому распределение плотности в этой части характеризуется менее резкими изменениями. При перемещении в западном направлении количество скважин увеличивается и становится возможным выделить две области повышенных значений плотности с величинами около 2,8 и 2,825 г/см³. Наибольшая разница в значениях плотности наблюдается в северной части месторождения с дифференциацией по значениям от 2,5 до 2,9 г/см³. Если рассматривать причины появления таких диапазонов значений, то можно выделить седиментационные и тектонические. Также могут проявляться вторичные процессы изменения литологического состава коллекторов и их коллекторских свойств. Сформированное поле (карта изолиний) даёт представление о распределении наиболее уплотнённых областей с пониженными значениями пористости.

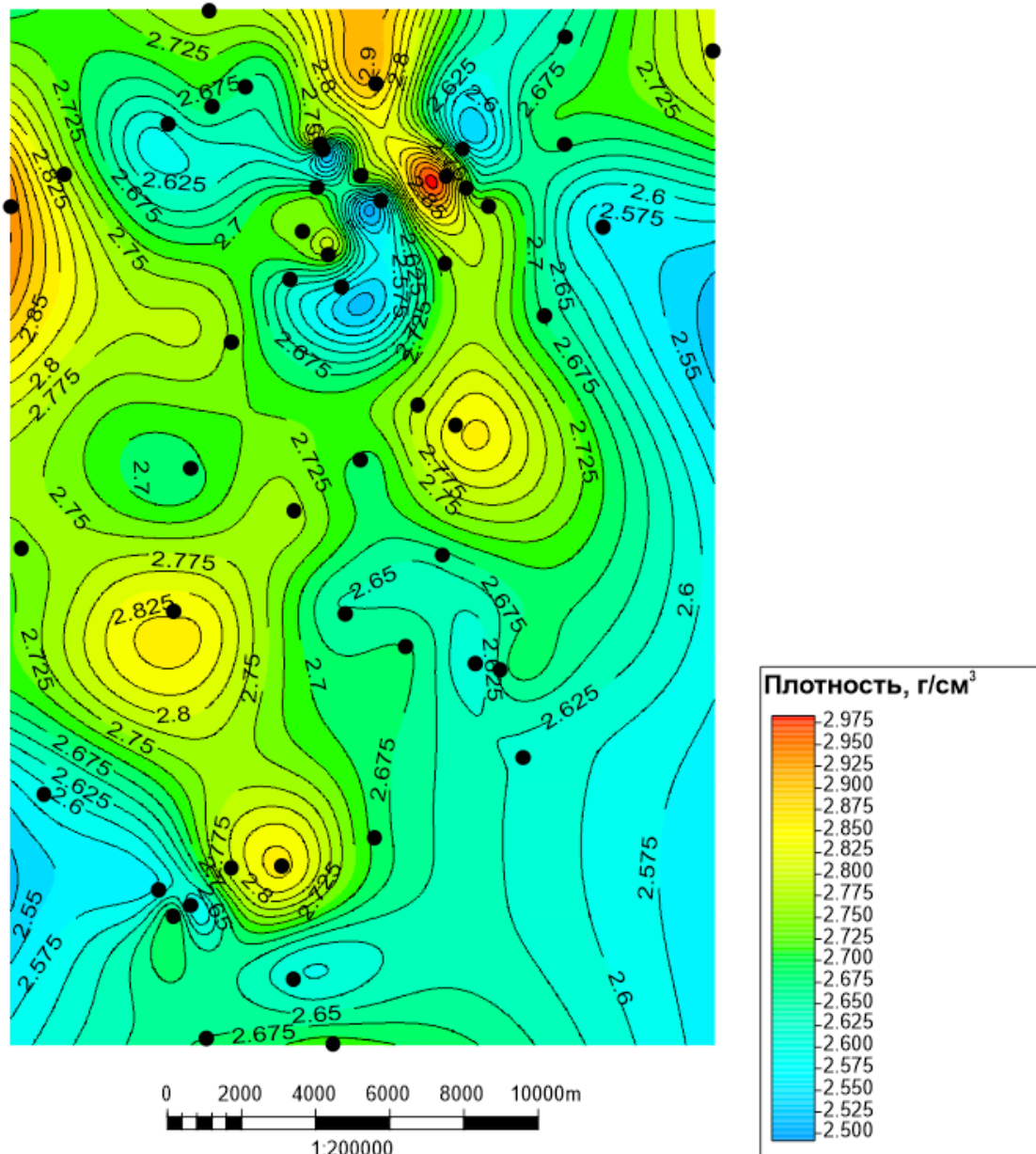


Рис. 4. Карта распределения плотности скелета
 Fig. 4. Matrix density distribution map

Закключение и выводы

Анализ лабораторных исследований керн показал, что построение графиков зависимости по каждой отдельной скважине позволяет оценить степень неопределённости в конкретной выборке данных и сформировать представление о неоднородности распределения свойств по площади. Благодаря отдельным уравнениям:

- получены достоверные значения параметров плотности скелета в каждой отдельной скважине;
- оценена степень изменчивости петрофизических свойств;
- сформированы тренды распределения петрофизических и фильтрационно-ёмкостных свойств;

- выявлены области пониженных и повышенных значений плотности;
- сформированы причины возникновения предпосылок вариации плотности скелета.

Представленные исследования свидетельствуют об изменении значений плотности скелета, а вместе с тем и пористости по площади месторождения. Ранее, при комплексном анализе геолого-геофизических данных, эта проблема не возникала. В нынешних реалиях компьютерные мощности позволяют формировать максимально детальные геологические модели и учитывать даже незначительные изменения фильтрационно-ёмкостных свойств, влияющие на величину оценки предела коллектора по

значениям пористости. Исследования целесообразно продолжить и дополнить анализом по другим физическим свойствам пород, сопоставить полученные результаты и найти закономерности во взаимном

изменении петрофизических свойств пород. Тренды изменения свойств целесообразно учитывать при расчётах фильтрационно-ёмкостных свойств и создании геологических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский С.И. Динамические режимы осадконакопления. Циклогенез. – Л.: Недра, 1985. – 263 с.
2. Петрофизические методы исследования кернового материала (Терригенные отложения) / М.К. Иванов, Ю.К. Бурлин, Г.А. Калмыков, Е.Е. Карнюшина, Н.И. Коробова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – Кн. 1. – 112 с.
3. Петрофизические методы исследования кернового материала. Кн. 2: Лабораторные методы петрофизических исследований кернового материала / М.К. Иванов, Г.А. Калмыков, В.С. Белохин, Д.В. Корост, Р.А. Хамидуллин. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 113 с.
4. Тиаб Дж., Доналдсон Эря Ч. Петрофизика: теория и практика изучения свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Перевод с английского. – М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2009. – 868 с.
5. Density and magnetic susceptibility of major rock types within the Abitibi greenstone belt: a compilation with examples of its use in constraining inversion / E. Eshaghi, R. Vayavur, R.S. Smith, C. Mancuso, F. Della Justina, J. Ayer // *Exploration Geophysics*. – 2023. – Vol. 54. – Iss. 6. – P. 647–669.
6. Amigun J.O., Ako B.D. Rock density – a tool for mineral prospecting: a case study of Ajabanoko Iron Ore Deposit, Okene SW Nigeria // *Pacific Journal of Science and Technology*. – 2009. – Vol. 10. – Iss. 2. – P. 733–741.
7. Zappone A., Kissling E. SAPHYR: Swiss Atlas of Physical Properties of Rocks: the continental crust in a database // *Swiss J Geosci*. – 2021. – Vol. 114. – Iss. 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s00015-021-00389-3>
8. Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework / M. Dentith, R.J. Enkin, W. Morris, C. Adams, B. Bourne // *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Vol. 68. – P. 178–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12882>
9. Pears G., Fullagar P., Andrews P. 3D Gravity modelling and interpretation for the 1:250,000 Boulia map sheet, Queensland // *ASEG Extended Abstracts*. – 2001. – Vol. 1. – P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1071/ASEG2001ab106>
10. Petrophysical properties (density and magnetization) of rocks from the suhbaatar-Ulaanbaatar-dalandzadgad geophysical profile in Mongolia and their implications / T. Yang, J. Gao, Z. Gu, B. Dagva, T. Tserenpil // *The Scientific World Journal*. – 2013. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/791918>
11. Chandler V.W., Lively R.S. Density, magnetic susceptibility, and natural remanent magnetization of rocks in Minnesota: an mgs rock properties database // *Minnesota Geological Survey*. Retrieved from the University of Minnesota digital conservancy. – 2011. DOI: <https://hdl.handle.net/11299/175580>
12. Henkel H. Studies of density and magnetic properties of rocks from Northern Sweden // *Pure and Applied Geophysics*. – 2011. – Vol. 114. – P. 235–249.
13. Petrophysical constraints on gravity/magnetic interpretation in Israel / M. Rybakov, V. Goldshmidt, Y. Rotshtein, L. Fleischer // *Leading Edge*. – 1999. – Vol. 18. – P. 269–272.
14. Distribution of petrophysical properties for sandy-clayey reservoirs by fractal interpolation / M. Lozada-Zumaeta, R.D. Arizabalo, G. Ronquillo-Jarillo, E. Coconi-Morales, D. Rivera-Recillas, F. Castrejon-Vacio // *Nonlin. Processes Geophys.* – 2012. – Vol. 19 – P. 239–250. DOI: <https://doi.org/10.5194/npg-19-239-2012>
15. Hamd-Allah S.M., Abbas O.S., Dhaidan M.K. Distribution of petrophysical properties based on conceptual facies model, Mishrif Reservoir/South of Iraq // *Journal of Petroleum Research and Studies*. – 2022. – Vol. 12. – P. 51–70. DOI: <https://doi.org/10.52716/jprs.v12i3.556>
16. Alkersan H. Depositional environment and geological history of the Mishrif formation in the south of Iraq // *9th Arab petroleum Congress*. – 1975. – Vol. 121. – P. 1–18.
17. Quinto S., Torino P., Weltje G.J. How to integrate basin-scale information into reservoir models // *Annual EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE Europec*. – 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/164830-MS>
18. Mohammad A. Al-Khalifa, Payenberg Tobias H.D., Lang S.C. Overcoming the challenges of building 3D stochastic reservoir models using conceptual geological models – a case study // *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. – 2007. DOI: <https://doi.org/10.2118/104496-MS>
19. Petrophysics analysis for determination of density porosity and neutron-density porosity on carbonate rock in East Java Basin / D. Juliantu, Fatkhan, E. Dinanto, A.S. Murtani // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1031/1/012023>
20. Ardebili P.N., Jozanikohan G., Moradzadeh A. Estimation of porosity and volume of shale using artificial intelligence, case study of Kashafud Gas Reservoir, NE Iran // *J Petrol Explor Prod Technol*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01729-9>

Информация об авторах

Михаил Олегович Коровин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. korovinmo@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3270-2408>

Анна Олеговна Алеева, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; научный сотрудник отдела геологического сопровождения бурения и ЗБС АО «ТомскНИПИнефть», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72. rastorguewa90@tpu.ru

Поступила в редакцию: 18.01.2024

Поступила после рецензирования: 11.03.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Romanovskiy S.I. *Dynamic sedimentation regimes. Cyclogenesis*. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 263 p. (In Russ.)
2. Ivanov M.K., Burlin Y.K., Kalmikov G.A., Karniyshina E.E., Korobova N.I. *Petrophysical methods for studying core material (Terrigenous deposits)*. Moscow, Moscow University Publ., 2008. B. 1, 112 p. (In Russ.)
3. Ivanov M.K., Kalmikov G.A., Belokhin V.S., Korost D.V., Khamidullin R.A. *Petrophysical methods for studying core material. B. 2: Laboratory methods for petrophysical studies of core material*. Moscow, Moscow University Publ., 2008. 113 p. (In Russ.)
4. Tiab J., Donaldson E.C. *Petrophysics theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Kidlington, Gulf Professional Publ., 2009. 918 p.
5. Eshaghi E., Vayavur R., Smith R.S., Mancuso C., Della Justina F., Ayer J. Density and magnetic susceptibility of major rock types within the Abitibi greenstone belt: a compilation with examples of its use in constraining inversion. *Exploration Geophysics*, 2023, vol. 54, pp. 647–669.
6. Amigun J.O., Ako B.D. Rock density – a tool for mineral prospection: a case study of Ajabanoko Iron Ore Deposit, Okene SW Nigeria. *Pacific Journal of Science and Technology*, 2009, vol. 10, Iss. 2, pp. 733–741.
7. Zappone A., Kissling E. SAPHYR: Swiss Atlas of Physical Properties of Rocks: the continental crust in a database. *Swiss J Geosci*, 2021, vol. 114. DOI: <https://doi.org/10.1186/s00015-021-00389-3>
8. Dentith M., Enkin R.J., Morris W., Adams C., Bourne B. Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework. *Geophysical Prospecting*, 2020, vol. 68, pp. 178–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12882>
9. Pears G., Fullagar P., Andrews P. 3D Gravity modelling and interpretation for the 1:250,000 Boulia map sheet, Queensland. *ASEG Extended Abstracts*, 2001, vol. 1, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1071/ASEG2001ab106>
10. Yang T., Gao J., Gu Z., Dagva B., Tserenpil T. Petrophysical properties (density and magnetization) of rocks from the subbaatar-Ulaanbaatar-dalandzadgad geophysical profile in Mongolia and their implications. *The Scientific World Journal*, 2013, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/791918>
11. Chandler V.W., Lively R.S. Density, magnetic susceptibility, and natural remanent magnetization of rocks in Minnesota: an mgs rock properties database. *Minnesota Geological Survey*. Retrieved from the University of Minnesota digital conservancy, 2011. DOI: <https://hdl.handle.net/11299/175580>
12. Henkel H. Studies of density and magnetic properties of rocks from Northern Sweden. *Pure and Applied Geophysics*, 2011, vol. 114, pp. 235–249.
13. Rybakov M., Goldshmidt V., Rotshtein Y., Fleischer L. Petrophysical constraints on gravity/magnetic interpretation in Israel. *Leading Edge*, 1999, vol. 18, pp. 269–272.
14. Lozada-Zumaeta M., Arizabalo R.D., Ronquillo-Jarillo G., Coconi-Morales E., Rivera-Recillas D., Castrejon-Vacio F. Distribution of petrophysical properties for sandy-clayey reservoirs by fractal interpolation. *Nonlin. Processes Geophys*, 2012, vol. 19, pp. 239–250. DOI: <https://doi.org/10.5194/npg-19-239-2012>
15. Hamd-Allah S.M., Abbas O.S., Dhaidan M.K. Distribution of petrophysical properties based on conceptual facies model, Mishrif Reservoir/South of Iraq. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 2022, vol. 12, pp. 51–70. DOI: <https://doi.org/10.52716/jprs.v12i3.556>
16. Alkersan H. Depositional environment and geological history of the Mishrif formation in the south of Iraq. *9th Arab petroleum Congress*, 1975, vol. 121, pp. 1–18.
17. Quinto S., Torino P., Weltje G.J. How to integrate basin-scale information into reservoir models. *Annual EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE Europe*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/164830-MS>
18. Mohammad A. Al-Khalifa, Payenberg Tobias H.D., Lang S.C. Overcoming the challenges of building 3d stochastic reservoir models using conceptual geological models – a case study. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2118/104496-MS>
19. Juliantu D., Fatkhan, Dinanto E., Murtani A.S. Petrophysics analysis for determination of density porosity and neutron-density porosity on carbonate rock in East Java Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023. DOI: [10.1088/1755-1315/1031/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1031/1/012023)
20. Ardebili P.N., Jozanikohan G., Moradzadeh A. Estimation of porosity and volume of shale using artificial intelligence, case study of Kashafud Gas Reservoir, NE Iran. *J Petrol Explor Prod Technol*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01729-9>

Information about the authors

Mikhail O. Korovin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. korovinmo@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3270-2408>

Anna O. Aleeva, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; TomskNIPIneft JSC, 72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russian Federation. rastorguewa90@tpu.ru

Received: 18.01.2024

Revised: 11.03.2024

Accepted: 22.03.2024

УДК 622.245.7
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4295
Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Численный анализ поля распределения давления и векторов скорости потока жидкости вблизи отверстий кумулятивной перфорации

С.Н. Попов^{1✉}, С.Е. Чернышов²

¹ Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Россия, г. Москва

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉ popov@ipng.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью определения достоверного поля распределения давления и векторов скорости фильтрации флюида внутри перфорационного канала и в окружающей его породе-коллекторе. *Цель:* на основе численного конечно-элементного моделирования течения флюида внутри перфорационного канала и фильтрации его в окружающей породе-коллекторе выявить закономерности распределения давления и векторов фильтрации жидкости в перфорационном канале, на его стенках и в околоскважинной зоне. *Объекты:* околоскважинная зона карбонатного коллектора одного из нефтяных месторождений юга Пермского края, включающая перфорационные каналы. *Методы:* численный конечно-элементный метод расчета течения и фильтрации жидкости в околоскважинной зоне с учетом геометрии перфорационных каналов. *Результаты.* Рассмотрены основные соотношения, используемые при численном моделировании течения и фильтрации жидкости в программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS. Разработана конечно-элементная схема околоскважинной зоны, включающая кумулятивные перфорационные каналы и учитывающая их геометрические характеристики, а также тот факт, что внутри отверстий моделируется течение жидкости в открытом пространстве с помощью уравнений Навье–Стокса, а в окружающей их породе-коллекторе – на основе уравнений фильтрации и закона Дарси. Проведены численные расчеты, на основе которых получено распределение давления, скоростей течения и фильтрации флюида внутри каналов и в околоскважинной зоне в целом. Расчеты производились при вариации величины давления в скважине (или депрессии на пласт), а также для различной величины проницаемости коллектора 50 мД величина изменения давления внутри перфорационного канала не превысит 0,01 МПа, т. е. можно предположить, что внутри отверстия оно практически не меняется. Отмечено, что максимальное значение скорости фильтрации соответствует вершине перфорационного канала, и затем ее значение уменьшается по мере приближения к стенке скважины. Сделан вывод о том, что при дальнейшем моделировании напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с учетом каналов кумулятивной перфорации на поверхности отверстий допустимо задавать постоянную величину давления, равную давлению в скважине, а не логарифмическое или какое-либо другое его распределение.

Ключевые слова: перфорационное отверстие, давление, скорость фильтрации, численный метод, метод конечных элементов, скважина, околоскважинная зона

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания «Экспериментальные и теоретические исследования межфазных явлений, термодинамических, физико-химических и геомеханических свойств нефтегазовых пластовых систем для повышения эффективности освоения трудноизвлекаемых запасов углеводородов» (FMME-2022-0008, Рег. № НИОКТР 122022800364-6).

Для цитирования: Попов С.Н., Чернышов С.Е. Численный анализ поля распределения давления и векторов скорости потока жидкости вблизи отверстий кумулятивной перфорации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 80–87. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4295

UDC 622.245.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4295

Numerical analysis of a pressure distribution field and fluid flow velocity vectors near cumulative perforation holes

S.N. Popov^{1✉}, S.E. Chernyshov²

¹ Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ popov@ipng.ru

Abstract. Relevance. The need to determine a reliable pressure distribution field and fluid filtration velocity vectors inside the perforation hole and the reservoir rock surrounding it. **Aim.** On the basis of numerical finite element modeling of the fluid flow inside the perforation holes and its filtration in the surrounding reservoir rock, to reveal the patterns of pressure distribution and fluid filtration vectors in the perforation hole, on its walls and in the near-wellbore zone. **Objects.** Near-wellbore zone of a limestone reservoir of one of the oil fields in the south of the Perm Region, including perforations. **Methods.** Numerical finite element method for calculating the flow and filtration of liquid in the near-wellbore zone, taking into account the geometry of perforation holes. **Results.** The paper considers the main relationships used in numerical simulation of fluid flow and filtration in the ANSYS finite element modeling software package. The authors have developed the finite element scheme of the near-wellbore zone, including cumulative perforation holes and taking into account their geometric parameters, as well as the fact that inside the holes the fluid flow is modeled in open space using the Navier-Stokes equations, and in the surrounding reservoir rock based on the filtration equations and Darcy's law. Numerical calculations were carried out, on the basis of which the distribution of pressure, flow velocities and fluid filtration inside the holes and in the near-wellbore zone as a whole was obtained. Calculations were made with varying pressure in the well (or pressure drawdown), as well as for different values of reservoir permeability. The calculation results showed that for the actual drawdown values of 10 MPa and the reservoir permeability of 50 mD, the value of pressure change inside the perforation holes will not exceed 0.01 MPa, i.e. it can be assumed that it practically does not change inside the hole. It is noted that the maximum value of the filtration rate corresponds to the top of the perforation holes and then its value decreases as it approaches the borehole wall. It is concluded that in further modeling of the stress-strain state of the near-wellbore zone, taking into account the holes of cumulative perforation on the surface of the holes, it is permissible to set a constant pressure value equal to the pressure in the well, and not logarithmic or any other distribution of it.

Keywords: perforation hole, pressure, filtration rate, numerical method, finite element method, well, near-wellbore zone

Acknowledgements: The paper was completed with support of the state task "Experimental and theoretical studies of interfacial phenomena, thermodynamic, physicochemical and geomechanical properties of oil and gas reservoir systems to improve the efficiency of development of hard-to-recover hydrocarbon reserves" (FMME-2022-0008, Reg. No. NIOKTR 122022800364-6).

For citation: Popov S.N., Chernyshov S.E. Numerical analysis of a pressure distribution field and fluid flow velocity vectors near cumulative perforation holes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 80–87. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4295

Введение

В процессе освоения нефтяных и газовых скважин применяют различные методы интенсификации притока (создание трещины гидроразрыва, радиальное бурение, кислотные обработки (появление червоточин) и др.), а также производят вторичное вскрытие продуктивного объекта с помощью различных методов перфорации: кумулятивной, щелевой, пулевой, сверлящей и др. [1–4]. Подобные явления приводят к трансформации напряженно-деформированного состояния пород-коллекторов вблизи скважины [5–8], а также к изменению поля распределения давления и скорости потока флюида в околоскважинной зоне [9–13].

Как известно, при расчетах продуктивности скважины или приемистости нагнетательной скважины применяется широко известная формула Дюпюи, позволяющая аналитически, с использованием небольшого числа характеристик пласта и флюида, определить вышеперечисленные основные параметры работы скважин. С помощью данной формулы также можно получить логарифмическую зависимость распределения давления вблизи скважины в так называемой «депрессионной воронке». Несмотря на то, что данная формула применяется повсеместно, с определенной степенью достоверности она может быть использована только для вертикальной скважины с открытым стволом, т. к.

не учитывает широкий спектр различных факторов: геометрию перфорационных каналов, несовершенство по степени и характеру вскрытия пласта и др. В связи с этим расчет фильтрации жидкости необходимо вести именно для каналов, а не для всей поверхности вскрытия.

Такая проблема может быть решена за счет использования численных методов расчета, которые позволяют определить основные гидродинамические параметры флюида и вычислить суммарный поток жидкости через поверхности перфорационных отверстий. На основе численных методов также появляется возможность проанализировать трансформацию фильтрационно-емкостных свойств, вызванную изменением эффективных напряжений [14–17]. В то же время при моделировании напряженно-деформированного состояния пород-коллекторов возникает проблема с выбором граничных условий на поверхности каналов перфорации, т. е. какую величину давления задавать на их свободной поверхности и должно давление быть постоянным или меняться в зависимости от удаления от стенки скважины по линейной, логарифмической или какой-либо другой зависимости. В данной публикации на основе численного расчета с применением метода конечных элементов определен характер распределения давления и векторов скорости потока жидкости после создания перфорационных отверстий, а также граничные условия при решении упругой и пороупругой задачи для определения поля распределения напряжений и трансформации фильтрационно-емкостных свойств в околоскважинной зоне пласта-коллектора.

Численный метод расчета течения и фильтрации жидкости

Как уже было отмечено выше, обычно принимается, что давление в коллекторе вблизи вертикальной скважины распределяется по известной логарифмической зависимости:

$$p = p_b - \Delta p \frac{\ln\left(\frac{r}{r_b}\right)}{\ln\left(\frac{r_w}{r_b}\right)}, \quad (1)$$

где p – определяемая величина давления; p_b – давление на контуре питания; Δp – депрессия на пласт; r_b – радиус контура питания; r_w – радиус скважины; r – радиус от оси скважины, для которого определяется величина давления.

Очевидно, что образование полостей в породе в виде перфорационных отверстий должно привести к перераспределению давления и скоростей фильтрации жидкости. Достоверное распределение данных гидродинамических характеристик может быть определено с помощью методов численного моделирования, в частности метода конечных элементов. Моделируемую область при этом можно разделить на две составляющих:

- область перфорационных каналов, где течение жидкости происходит по аналогии с течением жидкости в трубопроводах и в общем случае может быть описано дифференциальными уравнениями Навье–Стокса;
- область пород-коллекторов, где флюид фильтруется через поры, и ее поведение может быть описано с помощью закона Дарси.

Для решения данной задачи была разработана конечно-элементная схема околоскважинной зоны, учитывающая вышеперечисленные особенности (рис. 1). Модель была реализована в программном комплексе ANSYS, в котором для решения задач гидродинамики, а также фильтрации жидкости в пористой среде используется встроенный модуль FLOTRAN [18–20]. Данный модуль включает специальный параметр, называемый распределенным стационарным сопротивлением, который добавляется в уравнение Навье–Стокса. Постановка задачи для несжимаемой жидкости включает в себя уравнение неразрывности:

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

и уравнение Навье–Стокса:

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial (v_i v_j)}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + R_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu^e \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (3)$$

где g_i – вектор ускорений; ρ – плотность; μ^e – эффективная вязкость; R_i – распределенное сопротивление пористой среды; v – скорость течения жидкости.

Сопротивление пористой среды – вектор R_i из уравнения Навье–Стокса:

$$R_i = -C \mu v_i, \quad (4)$$

где μ – вязкость.

Как видно из соотношений (2)–(4), в них включен закон Дарси:

$$v_i = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (5)$$

где k – проницаемость горной породы; μ – вязкость жидкости; P – давление; $\frac{\partial P}{\partial x_i}$ – градиент давления. Из сравнения (4) и (5) видно, что $C=1/k$.

В соотношениях (2)–(5) для области породы-коллектора v_i – это скорость фильтрации жидкости в породе; для области внутри перфорационного канала это скорость течения жидкости в открытом пространстве. Так, для области течения жидкости внутри канала перфорации параметр проницаемости не задается, поэтому в соотношении (3) параметр распределенного сопротивления равен нулю.

Для расчета течения флюида в околоскважинной зоне с учетом отверстий кумулятивной перфорации была разработана трехмерная конечно-элементная схема, учитывающая геометрию перфорационных каналов. При создании трехмерной конечно-элементной схемы использовались конечные элементы fluid142, которые, согласно соотношениям (2)–(5), можно использовать для моделирования течения жидкости и ее фильтрации в пористой среде. При этом предполагалось, что моделируется однофазная жидкость, в силу того в программном комплексе не заложена возможность задания фазовых проницаемостей.

На основе предварительных расчетов были определены величины чисел Рейнольдса и Фруда, которые показали, что для моделируемых условий течение является ламинарным, а воздействием силы тяжести можно пренебречь. Рассматривалась изотермическая стационарная задача с установившимся течением в канале перфорации и фильтрации в породе. Температура системы предполагалась постоянной и одинаковой во всей области. В связи с тем, что выполняется расчет фильтрации

нефти из пласта, вязкость и плотность жидкости постоянны и не зависят от давления.

На рис. 1 область фильтрации жидкости в горной породе выделена голубым цветом, область течения жидкости в канале перфорации – фиолетовым.

В качестве граничных условий задавались следующие:

- на верхней (граница № 1), нижней (граница № 6), правой (граница № 2) и левой (граница № 3) гранях модели задавалась нулевая скорость потока жидкости по направлению нормали к свободной поверхности;
- на стенке скважины (граница № 4) задавались нулевые скорости потока жидкости по всем направлениям, имитируя непроницаемую стенку обсаженной скважины (помимо области перфорационных каналов);
- на внешней стенке (граница № 7) модели задавалась постоянная величина давления, определенная на основе зависимости (1);
 в области, соответствующей входу в перфорационный канал на стенке скважины (граница № 5), задавалось давление в скважине с учетом депрессии на пласт.

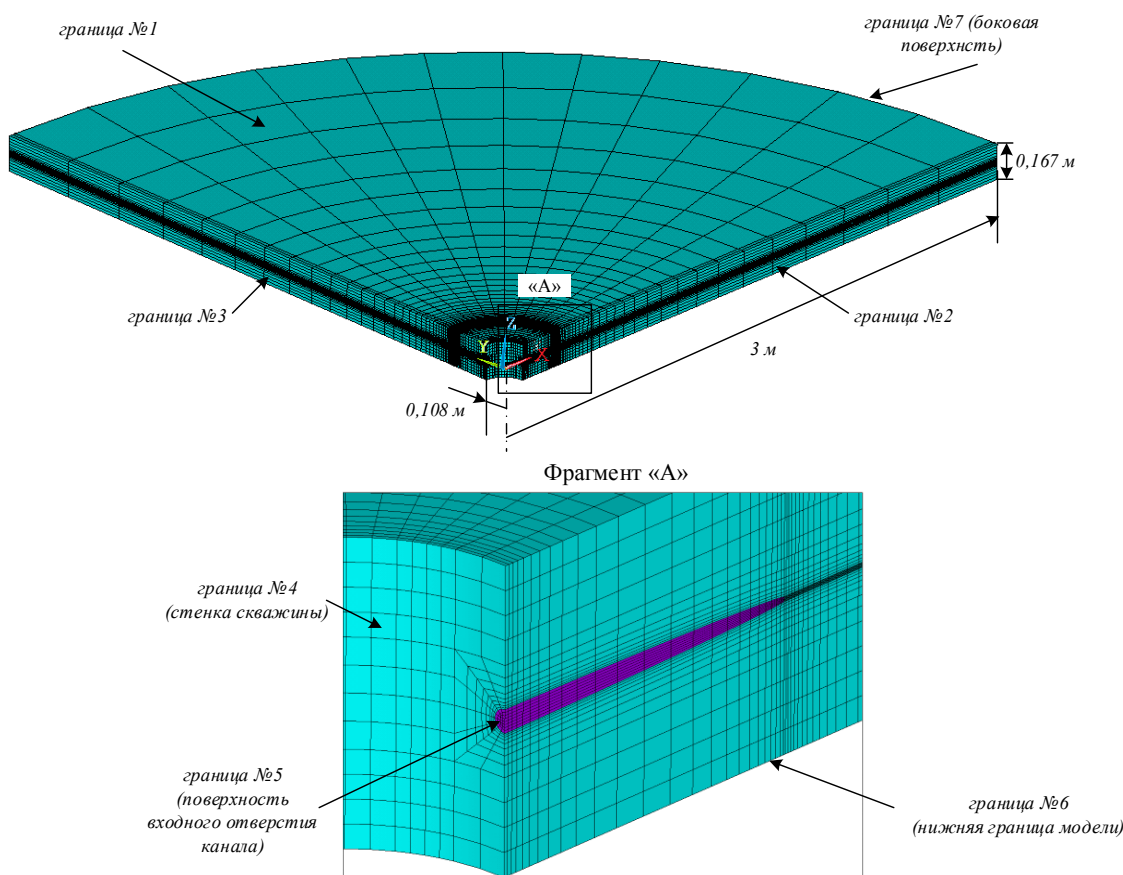


Рис. 1. Конечно-элементная схема околоскважинной зоны с отверстиями кумулятивной перфорации (фиолетовым цветом выделена область отсутствия породы)

Fig. 1. Finite element scheme of the near-wellbore zone with cumulative perforation holes (the holes area is highlighted in purple)

В модели перфорационные каналы были заданы в виде эллипсоида с радиусами 20 и 300 мм (рис. 1). Моделирование осуществлялось для условий турней-фаменских карбонатных отложений юга Пермского края. В таблице приведены основные геометрические и физические характеристики модели.

Таблица. Геометрические и физические параметры модели, используемые в расчетах

Table. Geometrical and physical parameters of the model used in calculations

Параметр Parameters	Единицы измерения Units	Значение Value
радиус скважины/well radius	мм/mm	108
внешний радиус области коллектора outer radius of the reservoir section	м/m	3
максимальный радиус перфорационного канала maximum radius of the perforation hole	мм/mm	20
длина перфорационного канала perforation hole length	мм/mm	300
проницаемость/permeability	мД/mD	50
вязкость жидкости/fluid viscosity	мПа·с/mPa·s	5
давление на контуре питания supply pressure	МПа/MPa	17,6
давление в скважине/bottom hole pressure	МПа/MPa	7,6

Предполагалось, что пластовое давление равно 17,6 МПа, и скважина работает на депрессии 10 МПа, поэтому давление на поверхности в начале перфорационного канала, соответствующего стенке скважины, задавалось равным 7,6 МПа.

Результаты численного моделирования

С помощью разработанной конечно-элементной модели было проведено многовариантное численное моделирование. В расчетах варьировались параметры, которые в большей степени могут повлиять на распределение давления и скорость течения жидкости: проницаемость, вязкость жидкости и депрессия на пласт. На рис. 2, 3 показаны основные результаты

расчетов. Точность расчетов задавалась по величине давления и была равной 10^{-8} Па, скорости течения жидкости определялись с точностью 10^{-8} м/с.

Как видно из рис. 2, б, в породе-коллекторе, окружающей перфорационное отверстие, происходит весьма существенное перераспределение давления. При создании депрессии на пласт зона минимальных давлений соответствует стенкам перфорационных отверстий и возрастает при удалении от них, переходя в логарифмическую зависимость от радиальной координаты.

Также было установлено, что внутри перфорационного канала давление флюида изменяется весьма незначительно (рис. 2, а). Так, для проницаемости 50 мД перепад давления между началом перфорационного канала на стенке скважины и его вершиной составил всего 0,01 МПа. С увеличением проницаемости перепад давления внутри канала прямопропорционально увеличивался. Если задать величину проницаемости коллектора равной 1 Д, его величина уже составит 0,2 МПа, что в то же время также является весьма незначительным по отношению к величине пластового или забойного давления, хотя такой результат получен для весьма завышенной проницаемости пласта. Было определено, что перепад давления в канале изменяется прямо пропорционально величине депрессии.

Таким образом, на основе полученного распределения давления можно сделать вывод о том, что при моделировании перфорации в упругой и поропругой среде для реальных значений проницаемости пласта на стенке перфорационных каналов можно задавать граничное условие в виде одинакового давления на всей свободной поверхности отверстий, а не логарифмическую или какую-либо другую зависимость от радиальной координаты. В таком случае задавать давление необходимо для каждого канала с учетом толщины пласта и глубины расположения каналов вдоль ствола скважины. В конечном итоге дебит скважины может быть рассчитан путем суммирования дебитов по всем перфорационным отверстиям.

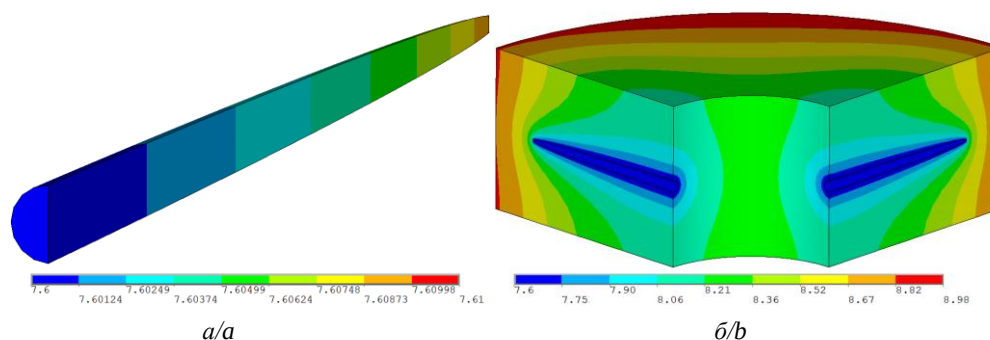


Рис. 2. Распределение давления (МПа) в перфорационном канале (а) и в окружающей породе-коллекторе (б) при депрессии 10 МПа

Fig. 2. Pressure distribution (MPa) in the perforation hole (a) and in the surrounding reservoir rock (b) at a pressure draw-down of 10 MPa

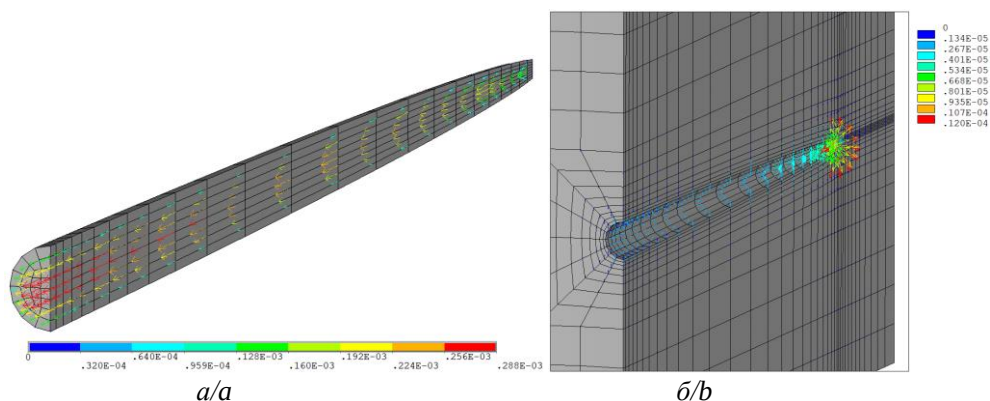


Рис. 3. Распределение векторов скорости течения жидкости (м/с) в перфорационном канале (а) и в окружающей породе-коллекторе (б) при депрессии 10 МПа

Fig. 3. Distribution of fluid flow velocity vectors (m/s) in the perforation hole (a) and in the surrounding reservoir rock (b) at a pressure drawdown of 10 MPa

Если учитывать в расчетах изменение фильтрационно-емкостных свойств пород под воздействием изменяющихся эффективных напряжений, то оно не должно существенно повлиять на распределение давления в перфорационном канале, но повлияет на перераспределение давления в окружающей породе-коллекторе.

При варьировании вязкостью жидкости было получено, что изменение данного параметра не влияло на распределение давления, но пропорционально изменялась скорость течения и фильтрации жидкости. Из рис. 3, а видно, что максимальная скорость течения флюида соответствует оси перфорационного канала и его сечению на стенке скважины, что сочетается с течением жидкостей в трубопроводах и круглых каналах. При удалении от стенки скважины скорость течения жидкости в отверстии уменьшается.

Если рассматривать скорость фильтрации нефти в породе-коллекторе вблизи перфорации, то наблюдается противоположная картина. Из рис. 3, б видно, что ее максимальное значение соответствует вершине перфорационного канала и затем ее значение уменьшается по мере приближения к стенке скважины. Если сопоставлять максимальные значения скорости течения флюида в канале и фильтрации жидкости в породе, то из рис. 3 видно, что максимальная скорость течения жидкости в перфорационном отверстии примерно в 20 раз выше максимальной скорости фильтрации флюида в породе.

Следует также отметить, что с помощью разработанной численной модели можно учитывать изменения проницаемости в зависимости от распределения эффективных напряжений и влияние такого эффекта на распределение давления и скорости потока флюида вблизи перфорационных каналов. В рамках дальнейших исследований планируется провести сопоставление полученных расчетов с реальными промысловыми данными: значениями

дебитов скважин для геометрических характеристик перфорационных каналов и их количеством, имеющим место при создании перфорации.

Выводы

В данной публикации рассмотрены результаты численного конечно-элементного моделирования фильтрации и течения жидкости вблизи каналов кумулятивной перфорации. Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. В статье представлены соотношения для численного конечно-элементного расчета течения и фильтрации жидкости в программном комплексе ANSYS. Отмечается, что внутри каналов перфорации моделируется течение жидкости в открытом пространстве с помощью уравнений Навье–Стокса, а в окружающей их породе-коллекторе – на основе уравнений фильтрации и закона Дарси.
2. При использовании реальных значений депрессии в 10 МПа и проницаемости коллектора 50 мД было определено, что величина изменения давления внутри перфорационного канала не превысит 0,01 МПа, это говорит о том, что внутри отверстия перепад давления практически отсутствует.
3. При численном моделировании напряжений вблизи скважины с учетом перфорационных отверстий на их поверхности можно задавать постоянную величину давления, равную давлению в скважине, а не логарифмическое или какое-либо другое его распределение.
4. Результаты численного моделирования показали, что максимальное значение скорости фильтрации соответствует вершине перфорационного канала и затем ее значение уменьшается по мере приближения к стенке скважины.

5. Варьирование величиной проницаемости, депрессии на пласт и вязкости жидкости приводит к прямо пропорциональному изменению величины снижения давления в канале перфорации, но в то же время остается достаточно малой величиной по сравнению со значением пластового или забойного давления.
6. Разработанную модель околоскважинной зоны можно применять в дальнейшем для расчета поля давлений, скорости фильтрации и величины продуктивности/приемистости скважины с учетом изменяющейся проницаемости в зависимости от величины эффективных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научное обоснование методов вторичного вскрытия фаменских отложений юго-востока Пермского края на основании геомеханического моделирования / С.Е. Чернышов, С.Н. Попов, С.В. Варушкин, А.А. Мелехин, С.Н. Кривошеков, Ш. Рен // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – № 5. – С. 732–743.
2. Kritsanaphak K., Tirichine S., Abed M.L. Using hydrajet perforating technique as an effective alternative to explosive perforating for algerian oil and gas fields // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. – Ho Chi Minh City, Vietnam, 1–3 November 2007. OnePetro, 2007. SPE-136066-MS. – P. 1–14.
3. Quantifying the skin factor for estimating the completion efficiency of perforation tunnels in petroleum wells / M.A. Rahman, S. Mustafiz, M. Koksai, M.R. Islam // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2007. – Vol. 58. – Iss. 1–2. – P. 99–110.
4. Омелянюк М.В., Уколов А.И. Пахляя И.А. Численное моделирование турбулентных затопленных струй, бьющих в тупик перфорационных каналов, при обработках скважин // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 5. – С. 72–76.
5. Попов С.Н., Чернышов С.Е., Кривошеков С.Н. Сопоставительный анализ аналитического и численного методов расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны на основе упругой модели с учетом основных конструктивных элементов скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 94–102.
6. Study of downhole shock loads for ultra-deep well perforation and optimization measures / Q. Deng, H. Zhang, J. Li, X. Hou, B. Zhao // Energies. – 2019. – Vol. 12. – Iss. 14. – № 2743. – P. 1–23.
7. Расчет устойчивости ствола скважины для предотвращения осложнений при бурении / С.В. Лукин, С.В. Есипов, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.Ю. Хомутов, Т.Н. Шевчук, И.В. Сусялков // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 70–73.
8. Numerical simulation of sand production in oil wells using the CFD-DEM-IBM approach / A. Rakhimzhanova, C. Thoknton, Y. Amanbek, Y. Zhao // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 208. – Part C. 09529. – P. 1–24.
9. Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У. Оценка соответствия результатов компьютерного моделирования притока жидкости к трещине гидроразрыва пласта реальным данным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 210–217.
10. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Математическая модель закачки вязкоупругих составов в продуктивный пласт // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 218–228.
11. Рудяк В.Я., Бочаров О.Б., Кушнир Д.Ю. Эффективный алгоритм расчета притока флюида в скважину через систему перфорационных каналов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18. – № 2. – С. 72–83.
12. Григулецкий В.Г. Направленный многостадийный гидравлический разрыв пласта. Течение вязкой технологической жидкости через перфорационные отверстия и каналы некруговой формы. Часть 2. Новое приближенное решение задачи // Нефтепромысловое дело. – 2018. – № 11. – С. 18–26.
13. Шагапов В.Ш., Нагаева З. М., Аносова Е.П. Упругий режим фильтрации жидкости к скважине через перпендикулярную ей трещину, образовавшуюся при гидроразрыве пласта // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – № 4 (374). – С. 105–115.
14. Zoback M.D. Reservoir geomechanics. – Cambridge, U.K.: Cambridge University press, 2007. – 505 p.
15. Попов С.Н. Определение коэффициента запаса прочности цементного камня на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с учетом изменения упруго-прочностных свойств цемента в процессе его твердения и под воздействием кислотного реагента // SOCAR Proceeding. – 2021. – SI № 2. – С. 8–16.
16. Petroleum related rock mechanics / E. Fjear, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risnes. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 492 p.
17. Попов С.Н., Чернышов С.Е., Гладких Е.А. Влияние деформаций терригенного коллектора в процессе снижения забойного и пластового давления на изменение проницаемости и продуктивности скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 148–157.
18. Геомеханический анализ деформирования и разрушения конструктивных элементов скважин ОАО «Сургутнефтегаз» / Ю.А. Кашников, С.В. Гладышев, С.Г. Ашихмин, Г.Б. Проводников // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 11. – С. 39–43.
19. Ying Z. Effect of velocity of fluid field of 3-spacer nozzle in roll-casting models using coupled fluid-thermal finite element analysis // Applied mechanics and materials. – 2010. – Vol. 29–32. – P. 1481–1487.
20. Modified Reynolds' equation and analytical analysis of squeeze-film air damping of perforated structures / M. Bao, Y., Sun, H. Yang, P.J. French // Journal of micromechanics and microengineering. – 2003. – Vol. 13. – № 6. – P. 795–800.

Информация об авторах

Сергей Николаевич Попов, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией нефтегазовой механики и физико-химии пласта Института проблем нефти и газа Российской академии наук, Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. popov@ipng.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1110-7802>

Сергей Евгеньевич Чернышов, доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. nirgnf@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2034-3014>

Поступила в редакцию: 15.06.2023

Поступила после рецензирования: 18.09.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Chernyshov S.E., Popov S.N., Varushkin S.V., Melekhin A.A., Krivoshchekov S.N., Ren S. Scientific justification of the perforation methods for the Famennian deposits in the southeast of the Perm region. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 257, no. 5, pp. 732–743. (In Russ.)
2. Kritsanaphak K., Tirichine S., Abed M.L. Using hydrajet perforating technique as an effective alternative to explosive perforating for algerian oil and gas fields. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Ho Chi Minh City, Vietnam, 1–3 November 2007. OnePetro, 2007, SPE-136066-MS. pp. 1–14.
3. Rahman M.A., Mustafiz S., Koksai M., Islam M.R. Quantifying the skin factor for estimating the completion efficiency of perforation tunnels in petroleum wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, vol. 58, Iss. 1–2, pp. 99–110.
4. Omelyanyuk M.V., Ukolov A.I., Pakhlyan I.A. Numerical simulation of turbulent submerged jets hitting a dead end when processing bottom-hole zones. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2020, no. 5, pp. 72–76. (In Russ.)
5. Popov S.N., Chernyshov S.E., Krivoshchekov S.N. Comparative analysis of the analytical and numerical methods for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone based on the elastic model taking into account the main structural elements of the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 5, pp. 94–102. (In Russ.)
6. Deng Q., Zhang H., Li J., Hou X., Zhao B. Study of downhole shock loads for ultra-deep well perforation and optimization measures. *Energies*, 2019, vol. 12, Iss. 14, no. 2743, pp. 1–23.
7. Lukin S.V., Esipov S.V., Zhukov V.V., Ovcharenko Yu.V., Khomutov A.Yu., Shevchuk T.N., Suslyakov I.V. Borehole stability prediction to avoid drilling failures. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 6, pp. 70–73. (In Russ.)
8. Rakhimzhanova A., Thoknton C., Amanbek Y., Zhao Y. Numerical simulation of sand production in oil wells using the CFD-DEM-IBM approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, P. C. 09529, pp. 1–24.
9. Yamkin M.A., Safiullina E.U. Assessment of compliance of the computer simulation results of liquid flow to fracture formation with real data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 210–217. (In Russ.)
10. Gasumov R.A., Gasumov E.R. Mathematical model for injecting viscoelastic compositions into the productive formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 218–228. (In Russ.)
11. Rudyak V.Y., Bocharov O.B., Kushnir D.Y. Effective algorithm for calculating fluid inflow to borehole via system of perforation tunnels. *Computational Technologies*, 2013, vol. 18, no. 2, pp. 72–83. (In Russ.)
12. Griguletsky V.G. Directed multi-stage hydraulic fracturing of a formation. Flow of viscous process fluid through perforation opening and channels of noncircular shape. Part 2. A new approximate solution of the problem. *Oilfields Engineering*, 2018, no. 11, pp. 18–26. (In Russ.)
13. Shagapov V.Sh., Nagaeva Z.M., Anosova E.P. Elastic filtration to a wellbore through a perpendicular crack formed during hydraulic fracturing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2022, vol. 63, no. 4 (374), pp. 105–115. (In Russ.)
14. Zoback M.D. *Reservoir geomechanics*. Cambridge, U.K., Cambridge University press, 2007. 505 p.
15. Popov S.N. Geomechanical modeling and the casing stability analysis in conditions of partial absence of cement stone. *SOCAR Proceeding*, 2021, S.I. no. 2, pp. 34–40. (In Russ.)
16. Fjear E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. *Petroleum related rock mechanics*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 492 p.
17. Popov S.N., Chernyshov S.E., Gladkikh E.A. Influence of sandstone reservoir deformations during bottomhole and reservoir pressure decreasing on the permeability and well productivity changes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 148–157. (In Russ.)
18. Kashnikov Y.A., Gladyshev S.V., Ashikhmin S.G., Provodnikov G.B. Geomechanical analysis of deformation and failure of structural elements of wells of OJSC “Surgutneftegas”. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2002, no. 11, pp. 39–43. (In Russ.)
19. Ying Z. Effect of velocity of fluid field of 3-spacer nozzle in roll-casting models using coupled fluid-thermal finite element analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, vol. 29–32, pp. 1481–1487.
20. Bao M., Sun Y., Yang H., French P.J. Modified Reynolds’ equation and analytical analysis of squeeze-film air damping of perforated structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, vol. 13, no. 6, p. 795–800.

Information about the authors

Sergey N. Popov, Dr. Sc., Senior Researcher, Head of the Laboratory, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science, 3, Gubkin street, Moscow, 119333, Russian Federation. popov@ipng.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1110-7802>

Sergey E. Chernyshov, Dr. Sc., Head of the Departement, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. nirgnf@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2034-3014>

Received: 15.06.2023

Revised: 18.09.2023

Accepted: 22.03.2024

УДК 662.276.53:621.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4330
Шифр специальности ВАК: 1.6.11, 2.4.5

Энергопотребление электроцентробежных насосных установок при добыче высокообводненных нефтей

Р.И. Вахитова^{1✉}, Д.А. Сарачева¹, К.Р. Уразакوف²

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, г. Альметьевск

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

✉ roza-w@mail.ru

Аннотация. Актуальность. В настоящее время нефтяные месторождения России в основном разрабатываются с применением метода искусственного поддержания пластового давления для достижения высокой нефтеотдачи пластов. Применение на продуктивные пласты искусственного воздействия методом закачки воды способствует преждевременному обводнению добывающих скважин. Обводненность продуктивных пластов на нефтяных месторождениях значительно осложняет технологии добычи нефти. С ростом обводненности пластовой жидкости увеличивается мощность, потребляемая двигателем. Минимизация энергозатрат достаточно актуальна, так как добыча нефти осуществляется со значительными расходами электрической энергии. Важно исследовать зависимости расхода электрической энергии от обводненности скважин. **Цель:** изучение зависимости энергопотребления погружных электроцентробежных установок, эксплуатирующихся в нефтедобывающих скважинах, от обводненности. **Объект:** погружные электроцентробежные установки для добычи нефти. **Результаты.** Чтобы изучить влияния обводненности пластовой жидкости на удельный расход электрической энергии, были выбраны скважины с обводненностью более 90 %. Рассчитали по формуле удельный расход электрической энергии на добычу нефти. Анализ результатов расчетных данных показал, что на добывающих скважинах с обводненностью нефти до 90 % среднее значение удельного расхода электрической энергии на добычу нефти находится в пределах рекомендуемых норм, а в скважинах, где обводненность нефти превышает 90 %, среднее значение удельного расхода электрической энергии на добычу нефти больше, чем рекомендуемые удельные нормы расхода электрической энергии при эксплуатации нефтедобывающих скважин, оснащенных электроцентробежными установками. По расчетным данным построена зависимость удельного расхода электрической энергии на добычу нефти от величины обводненности пластовой продукции, при этом были выбраны скважины, имеющие обводненность более 90 %. Анализ графической зависимости показал, что на скважинах с обводненностью нефти более 90 % величина удельного расхода электроэнергии достигает максимальных значений (удельный расход электрической энергии увеличивается на 40 %).

Ключевые слова: центробежный насос, метод искусственного поддержания пластового давления, обводненность скважин, энергетические затраты, удельный расход электрической энергии на добычу нефти

Для цитирования: Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Уразакوف К.Р. Энергопотребление электроцентробежных насосных установок при добыче высокообводненных нефтей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 88–94. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4330

UDC 662.276.53:621.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4330

Power consumption of electric centrifugal pumping plants under extraction of highly watered oil

R.I. Vakhitova^{1✉}, D.A. Saracheva¹, K.R. Urazakov²

¹ Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk, Russian Federation

² Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russian Federation

✉ roza-w@mail.ru

Abstract. Relevance. Currently, oil fields in Russia are mainly developed using the method of artificial maintenance of reservoir pressure to achieve high oil recovery. The use of artificial impact on productive formations by the method of water injection contributes to the premature irrigation of production wells. Water content of productive layers in oil fields significantly complicates the technology of oil production. With the increase in water content of the surface fluid, the power consumed by the engine increases. Minimization of energy consumption is quite relevant, as oil is produced with significant expenditures of electrical energy. It is important to investigate the dependences of the electric energy consumption on the well water cut. **Aim.** To study the dependence of energy consumption of submersible electric centrifugal units operated in oil production wells on water cut. **Methods.** Submersible electric centrifugal installations for oil production. **Results.** In order to study the effects of formation water cut on electrical energy specific consumption, wells with a water cut of more than 90% were selected. Using the formula, the authors have calculated the electrical energy specific consumption for oil production. The analysis of the results of the calculated data showed that in producing wells with a water cut of up to 90%, the average specific electric power consumption for oil production is within the recommended standards. In wells with the water cut more than 90%, the average specific electric power consumption for oil production exceeds recommended specific norms of electric energy consumption during operation of oil producing wells equipped with electric centrifugal installations. Based on calculated data, the dependence of the specific electrical energy consumption for oil production on the water cut of reservoir products was plotted, and wells with a water cut of more than 90% were selected. The analysis of the graphical dependence showed that in wells with an oil water cut of more than 90%, the specific energy consumption reaches maximum values (the specific energy consumption increases by 40%).

Keywords: centrifugal pump, method of artificial maintenance of reservoir pressure, water cut, energy costs, electrical energy specific consumption for oil production

For citation: Vakhitova R.I., Saracheva D.A., Urazakov K.R. Power consumption of electric centrifugal pumping plants under extraction of highly watered oil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 88–94. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4330

Введение

При разработке нефтяных месторождений в Российской Федерации со временем наблюдается структурное ухудшение нефтяных запасов, разработка ранее не освоенных месторождений связана с суровыми климатическими условиями и со сложным геологическим строением. Важно отметить, что основным источником углеводородного сырья в настоящее время остаются ранее разрабатываемые объекты, которые находятся на поздней стадии разработки. Для длительно эксплуатируемых нефтяных месторождений в современных условиях характерна тенденция увеличения количества находящихся уже в разработке сложных залежей, доли с малым и средним дебитом добывающих скважин.

Технико-экономические показатели установок электроцентробежных насосов на разных месторождениях отличаются друг от друга, а причины такой ситуации в основном кроются в условиях эксплуатации, которые определяются свойствами добываемой из скважин пластовой жидкости и конструкцией ствола скважины [1].

В настоящее время нефтяные месторождения страны в основном разрабатываются с помощью метода искусственного поддержания пластового давления для достижения высокой нефтеотдачи пластов и интенсификации выработки запасов нефти. Наибольшее распространение среди методов искусственного воздействия на пласты получил гидродинамический метод, который связан с управлением давлением пласта путем закачки раз-

личных флюидов в залежь. В большинстве случаев добыча нефти в России характеризуется применением методов регулирования давления пласта способом закачки воды в залежь. Этот метод называется методом поддержания пластового давления (ППД) заводнением [2]. В то же время отмечается, что применение искусственного воздействия методом закачки воды и способы форсированной добычи пластовой жидкости на продуктивные пласты способствуют преждевременному обводнению добывающих скважин [3–5].

Обводнение скважин – это существенный фактор, осложняющий условия эксплуатации. Появление пластовой воды в продукции скважин значительно меняет свойства всей системы. Изменяется вязкостная характеристика добываемой продукции, а к этому, как известно, достаточно чувствительны особенно центробежные насосы [6, 7]. Наличие высокоминерализованной воды, которая обладает повышенной коррозионной активностью, способствует возникновению в работе погружной установки различных осложнений, связанных с образованием солевых отложений, преждевременным выходом из строя отдельных деталей и узлов установки [8, 9].

Обводнение пластовой жидкости способствует увеличению числа отказов установок [10]. С ростом обводненности пластовой жидкости увеличивается мощность, потребляемая двигателем, а это ведет к энергонапряженности установки по электрической части. В случае попадания воды через сальниковое уплотнение в погружной двигатель

и протектор возможен пробой обмотки, износ уплотнительных элементов и вала. Возрастает аварийность электрических кабелей в пластовой среде из-за падения сопротивления изоляции. Наблюдается увеличение количества прогаров токоввода электрического двигателя. Увеличение значения крутящего момента на валу погружного двигателя вследствие гидравлических сопротивлений способствует более раннему выходу из строя электрической части погружной установки, а иногда и слому вала протектора или насоса [11].

Низкая эффективность применяющихся систем заводнения для нефтяных пластов способствует тому, что закачка жидкости в качестве вытесняющего агента не дает требуемых темпов добычи пластовой жидкости, а ее обводненность интенсивно растет и достигает 90 % и более. Необходимо отметить, что наблюдается постоянный реальный рост обводненности пластовой продукции [12].

Обводненность продуктивных пластов на нефтяных месторождениях значительно осложняет технологии добычи механизированными способами, сбора и подготовки нефти [11]. В исследованиях, посвященных добыче обводненных нефтей, отмечается, что появление воды в продукции добывающей скважины в целом увеличивает напряженность работоспособности системы «пласт–насос», снижает технико-экономические показатели процесса эксплуатации установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) [13].

Постановка проблемы

При снижении объемов добычи нефти актуальна оптимизация режимов работы добывающих скважин по экономическим критериям, а именно, по себестоимости добываемой нефти. В структуре себестоимости добычи нефти энергетические затраты в некоторых нефтегазодобывающих организациях достигают до 30–40 %, это обуславливается резким увеличением обводненности пластовой жидкости и необходимостью закачивания большого количества воды и добычи в таких же количествах нефтесодержащей жидкости. В современных условиях важно анализировать затраты на энергопотребление, разрабатывать мероприятия по их снижению [14]. Необходимо адекватно оценивать энергопотребление оборудования нефтедобывающих скважин [15].

В процессах добычи нефти оптимальность энергозатрат не является самоцелью. Необходимо вести добычу нефти в оптимальном технологическом режиме, в заданные сроки обеспечивать при минимальных затратах максимально возможное извлечение углеводородных запасов.

Энергетические затраты при добыче пластовой жидкости на нефтяных месторождениях зависят,

прежде всего, от геологических показателей месторождений и технологических условий добычи. При общей тенденции увеличения энергопотребления каждое месторождение по мере его разработки характеризуется определенной закономерностью между энергопотреблением и добычей пластовой жидкости.

Для освоения нефтяных регионов на поздних стадиях разработки, когда добыча нефти снижается, а отбор нефтесодержащей жидкости возрастает, увеличение энергопотребления в процессе добычи нефти является объективным фактором. Минимизация энергозатрат достаточно актуальна, так как добыча нефти осуществляется со значительными расходами электрической энергии [16].

Наиболее энергоёмкими технологическими процессами являются извлечение пластовой жидкости из скважин на дневную поверхность и поддержание пластового давления, что составляет большую часть расходов на добычу нефти [14].

Из анализа энергоёмких технологических процессов (закачивание попутной воды для поддержания давления пласта, извлечение пластовой жидкости из скважин на дневную поверхность) следует, что темпы снижения добычи нефти более интенсивны, чем темпы снижения объемов закачивания и поднятия попутной воды [17].

К повышению удельного расхода ведет завышение установленной мощности трансформаторного и электромеханического оборудования. Причиной этого процесса является снижение энергетической эффективности сооружений и оборудования из-за истощения в результате разработки углеводородных запасов.

На основании вышеизложенного можно выделить основные причины роста удельного расхода электрической энергии при добыче нефти:

- увеличение объемов добычи попутной воды;
- увеличение удельных объемов закачки попутной воды для ППД;
- появление «излишка мощностей» [14].

По мере разработки месторождения даже при постоянной глубине скважин удельный расход электроэнергии на добычу пластовой жидкости имеет тенденцию к увеличению [16].

Представляют интерес исследования, проведенные В.Я. Чароновым по изучению зависимости удельного расхода энергии от обводненности пластовой жидкости [14]. На рис. 1 приведена графическая зависимость удельного расхода электрической энергии на добычу нефти на добывающих скважинах, которые оснащены электроцентробежными и штанговыми насосами, при различных значениях уровней, от обводненности жидкости.

Из анализа рис. 1 видно, что рост расхода электроэнергии начинается со значения обводненности

80 %, а при обводненности более 95 % следует ожидать, что расход электрической энергии для извлечения на дневную поверхность такой жидкости даже может не окупаться выручкой от реализации добываемой нефти. Исследования [14] показывают, что, начиная с обводненности нефти 98 %, ее добыча (даже не учитывая сокращение эксплуатационных затрат на скважину и высвобождение ее основного оборудования) становится неэффективной.

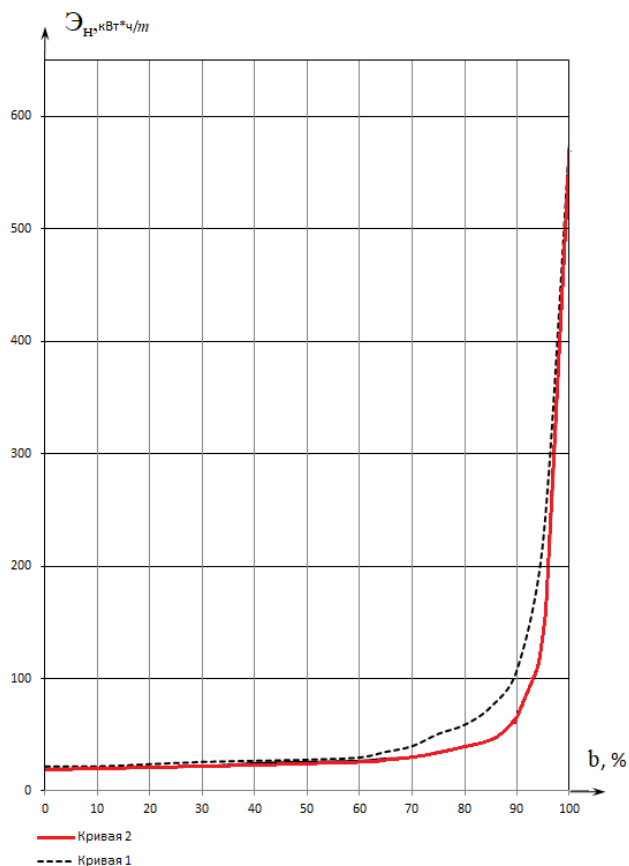


Рис. 1. Зависимость удельного расхода электрической энергии от величины обводненности пластовой жидкости при следующих условиях: кривая 1 – $H_D + H_{ГЗУ} = 1000$ м, кривая 2 – $H_D + H_{ГЗУ} = 600$ м

Fig. 1. Dependence of electrical energy specific consumption on the value of formation fluid water cut under the following conditions: curve 1 – $H_D + H_{GMP} = 1000$ m, curve 2 – $H_D + H_{GMP} = 600$ m

Учитывая, что технологии подъема нефти в скважинах, оснащенных скважинными штанговыми насосами и электроцентробежными насосами, различаются и электроцентробежные насосы эксплуатируются на добывающих скважинах с высокой обводненностью, а также отсутствие других альтернативных способов эксплуатации для высокообводненных скважин, представляет интерес изучение энергетических параметров на скважинах, оснащенных УЭЦН, с обводненностью 90 % и более.

Большинство нефтяных месторождений Российской Федерации разрабатывается на поздней стадии, увеличивается фонд высокообводненных скважин с малыми и средними дебитами, растет энергоемкость добычи нефти. Эксплуатация таких скважин сопровождается различными осложнениями, поэтому в процессе работы необходима оптимизация режимов добывающих скважин. Важно исследовать зависимости расхода электрической энергии от технологических параметров УЭЦН.

Одним из важных параметров работы установок погружных центробежных насосов является показатель энергозатрат.

Промысловые исследования

Для проведения промысловых исследований были выбраны несколько скважин. С целью исследования режимов работы электронасосных центробежных установок на этих скважинах определили следующие параметры:

- динамический уровень H_D , м;
- расход активной энергии W_a , кВт·ч;
- глубины подвески насоса $H_{П}$, м;
- дебит жидкости $Q_{ж}$, м³/сут;
- обводненность нефти b , %.

Чтобы изучить влияние обводненности пластовой жидкости на удельный расход электрической энергии, были выбраны в основном скважины с обводненностью 90 % и более.

Удельный расход электрической энергии на добычу нефти рассчитаем по формуле:

$$\mathcal{E}_H = \frac{W_a}{Q_{ж} \rho (1-b)}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т},$$

где ρ – удельный вес жидкости, т/м³; b – обводненность нефти, %.

Результаты расчетов удельного расхода электроэнергии на добычу нефти сведены в таблице.

Имеется рекомендуемое значение удельного расхода электрической энергии при добыче нефти с помощью установок ЭЦН, оно находится в интервале 70–120 кВт·ч/т (РД 39-3-934-83 «Методика расчета норм расхода электрической энергии на добычу нефти»).

Анализ результатов расчетных данных показал, что на добывающих скважинах с обводненностью нефти до 90 % среднее значение удельного расхода электрической энергии на добычу нефти составляет 94 кВт·ч/т, в то же время на скважинах, где обводненность нефти превышает 90 %, среднее значение удельного расхода электрической энергии на добычу нефти составляет 369 кВт·ч/т, а это превышает рекомендуемые удельные нормы расхода электрической энергии при эксплуатации нефтедобывающих скважин, оснащенных УЭЦН [18–20].

Таблица. Результаты расчетов удельного расхода электроэнергии на добычу нефти ($\mathcal{E}_n$)

Table. Results of calculations of specific electricity consumption for oil production

№ скважин (обезличен- ные) Well no. (anonimized)	$\mathcal{E}_n$, кВт·ч/т kWt·h/t	№ скважин (обезличен- ные) Well no. (anonimized)	$\mathcal{E}_n$, кВт·ч/т kWt·h/t	№ скважин (обезличен- ные) Well no. (anonimized)	$\mathcal{E}_n$, кВт·ч/т kWt·h/t	№ скважин (обезличен- ные) Well no. (anonimized)	$\mathcal{E}_n$, кВт·ч/т kWt·h/t	№ скважин (обезличен- ные) Well no. (anonimized)	$\mathcal{E}_n$, кВт·ч/т kWt·h/t
1	70,387	11	501,85	21	43,069	31	426,25	41	417,55
2	50,328	12	139,35	22	1806,7	32	167,85	42	299,56
3	151,05	13	288,567	23	177,37	33	113,452	43	147,125
4	224,04	14	183,6	24	212,525	34	231,73	44	359,975
5	151,05	15	1063,2	25	227,51	35	117,9	45	689,96
6	81,75	16	138,614	26	163,367	36	84,26	46	134,82
7	60,45	17	327,1375	27	53,588	37	411,8	47	171,25
8	80,592	18	231,97	28	207,44	38	637,55	48	117,43
9	129,78	19	163,569	29	73,455	39	369,875	49	936,8
10	165,22	20	204,4625	30	707,55	40	37,609		

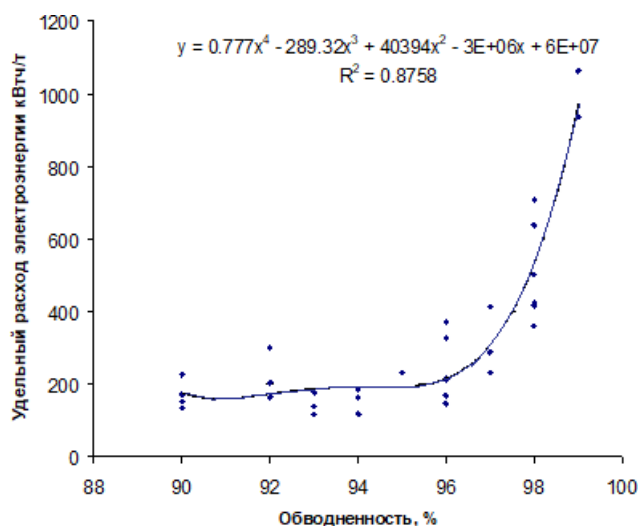


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электроэнергии на добычу нефти на скважинах, оборудованных УЭЦН, от обводненности продукции

Fig. 2. Dependence of the specific electricity consumption for oil production at wells equipped with installations of electric centrifugal pumps on the water cut of the products

Построена зависимость удельного расхода электрической энергии на добычу нефти от величины обводненности пластовой продукции, при этом были выбраны скважины, имеющие обводненность более 90 % (рис. 2).

Из анализа рис. 2 следует, что на скважинах с обводненностью нефти более 90 % завышена удельная величина расхода электрической энергии. Зависимость удельного расхода электроэнергии на добычу нефти от глубины подвески насоса и динамического уровня не рассматривается.

Вывод

Промысловые исследования показали, что на скважинах, оборудованных установками центробежных насосов и имеющих обводненность пластовой продукции, превышающую 90 %, увеличивается удельная величина расхода электрической энергии на 40 %. Важно отметить, что на скважинах, имеющих обводненность 99 %, величина удельного расхода электроэнергии достигает максимума – 1063 кВт·ч/т, на добывающих скважинах, имеющих обводненность 98 %, удельный расход электроэнергии в среднем составил 530 кВт·ч/т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сарачева Д.А., Вахитова Р.И. О повышении эффективности эксплуатации нефтяных скважин с высоким газовым фактором // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 2 (100). – С. 91–98.
2. Goldman H., Goldman E., Goldman Ch. Creating the future: integrated resource planning for electric utilities // Annual Review of Energy. – 1991. – Vol. 16. – № 1. – P. 91–121. DOI: 10.1146/annurev.eg.16.110191.000515
3. Кандакова Т.В., Старцев И.С. Анализ влияния геологического строения на обводненность продукции Турнейской залежи Этышского месторождения // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 153–155.
4. Ge Y., Li S., Xiaodong Z. Optimization for asp flooding based on adaptive rationalized Haar function approximation // Hinese journal of chemical engineering. – 2018. – Vol. 26. – № 8. – P. 1758–1765. DOI: 10.1016/j.cjche.2018.06.015
5. Application potential of in situ emulsion flooding in the high-temperature and high-salinity reservoir / W. Pu, C. Shen, Y. Yang, R. Liu, D. Du, Z. Mei // Journal of dispersion science and technology. – 2018. – Vol. 68. – P. 347–368. DOI: 10.1080/01932691.2018.1491858
6. Обводненность как один из факторов, влияющих на экономическую эффективность проекта / Н.А. Джумязова, Е.Д. Кузнецова, С.А. Никель, А.О. Лобовиков // Актуальные проблемы экономики и управления на предприятиях

машиностроения, нефтяной и газовой промышленности в условиях инновационно-ориентированной экономики. – 2017. – Т. 1. – С. 33–38.

7. Acosta-Coll M., Ballester-Merelo F., Martínez-Peiró M. Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin // *Natural hazards*. – 2018. – Vol. 92. – № 2. – P. 1237–1265. DOI: 10.1007/s11069-018-3249-4
8. Si Q., Cui Q., Yuan S. Tests for flow induced characteristics of a centrifugal pump under air-water two-phase inflow condition // *Journal of Vibration and Shock*. – 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/240/3/032016
9. Experimental evaluation of different strategies for improving oil recovery at high-water-cut by quantitative etched-glass micro-models / D. Wu, B. Ju, E.T. Brantson, X. Chen, Y. Fu // *Energy Exploration and Exploitation*. – 2016. – Vol. 34. – № 4. – P. 586–605.
10. Karambeigi M.S., Asl A.H., Nasiri M. Multi-objective optimization of microemulsion flooding for chemical enhanced oil recovery // *Oil and Gas Science and Technology*. – 2018. – Vol. 73. – P. 73.
11. Лигинькова Я.С. Исследование влияния геолого-промысловых характеристик турнейского пласта на обводненность продукции скважин // *Недропользование*. – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 15–20.
12. Тиллоева Х.Ф., Тошев Ш.О. Изучение влияния на обводненность скважин при эксплуатации нефтяной скважины фонтанным способом // *Аллея науки*. – 2022. – Т. 1. – № 12 (75). – С. 625–629.
13. Li S., Ge Y. A numerical computation approach for the optimal control of asp flooding based on adaptive strategies // *Mathematical problems in engineering*. – 2018. – Vol. 175. – P. 223–228. DOI: 10.1155/2018/1040476
14. Чаронов В.Я. Автоматизация работы основного оборудования и проблемы энергосбережения на объектах нефтегазодобычи. – Альметьевск: «ТатАСУнефть» АО «Татнефть», 1988. – 330 с.
15. Hasan A.R., Kabir C.S. Two-phase flow in vertical and inclined annuli // *Int. J. Multiphase Flow*. – 1992. – Vol. 18. – P. 279–293.
16. Энергосберегающие технологии эксплуатации обводненных скважин / В.М. Воровский, Г.Ю. Басов, К.В. Воровский, Р.Г. Заббаров // *Нефтяное хозяйство*. – 2011. – № 11. – С. 84–88.
17. Ziganshina P.A. Development of pump units energy efficiency increasing techniques in reservoir pressure maintenance system // *Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности*. – 2016. – Т. 1. – С. 39–42.
18. Ивановский В.Н., Карелина С.А. Еще раз к вопросу об энергоэффективности электроприводных лопастных насосов // *Территория Нефтегаз*. – 2022. – № 1–2. – С. 34–38.
19. Зудин Б.Г., Савенок О.В. Подбор электроцентробежного насоса на скважину Восточно-Ламбейшорского месторождения // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. – 2021. – № 3. – С. 109–125.
20. Пурсова И.Ю. Фактическая производительность погружных насосов // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2019. – № 4 (120). – С. 26–28.

Информация об авторах

Роза Ильгизовна Вахитова, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, 423450, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2. roza-w@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6563-1095>

Диана Азатовна Сарачева, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, 423450, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2. elite@agni-rt.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7639-8954>

Камил Рахматуллин Уразакон, доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. UrazakK@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2202-396X>

Поступила в редакцию: 11.07.2023

Поступила после рецензирования: 07.11.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Saracheva D.A., Vakhitova R.I. On improving the efficiency of operation of oil wells with a high gas factor. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products*, 2015, no. 2 (100), pp. 91–98. (In Russ.)
2. Goldman H., Goldman E., Goldman Ch. Creating the future: integrated resource planning for electric utilities. *Annual Review of Energy*, 1991, vol. 16, no. 1, pp. 91–121.
3. Kandakova T.V., Startsev I.S. Analysis of the influence of the geological structure on the water content of the Turneiskoe reservoir of the Etyshskoe field. *Problems of development of deposits of hydrocarbon and ore minerals*, 2017, no. 1, pp. 153–155. (In Russ.)
4. Ge Y., Li S., Xiaodong Z. Optimization for asp flooding based on adaptive rationalized Haar function approximation. *Hinese journal of chemical engineering*, 2018, vol. 26, no. 8, pp. 1758–1765.
5. Pu W., Shen C., Yang Y., Liu R., Du D., Mei Z. Application potential of in situ emulsion flooding in the high-temperature and high-salinity reservoir. *Journal of dispersion science and technology*, 2018, vol. 68, pp. 347–368.
6. Dzhumyazova N.A., Kuznetsova Ye.D., Nikel S.A., Lobovikov A.O. Water cut as one of the factors affecting the economic efficiency of the project. *Actual problems of economics and management at the enterprises of mechanical engineering, oil and gas industry in the conditions of an innovation-oriented economy*, 2017, vol. 1, pp. 33–38. (In Russ.)
7. Acosta-Coll M., Ballester-Merelo F., Martínez-Peiró M. Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin. *Natural hazards*, 2018, vol. 92, no. 2, pp. 1237–1265.

8. Si Q., Cui Q., Yuan S. Tests for flow induced characteristics of a centrifugal pump under air-water two-phase inflow condition, *Journal of Vibration and Shock*, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/240/3/032016
9. Wu D., Ju B., Brantson E.T., Chen X., Fu Y. Experimental evaluation of different strategies for improving oil recovery at high-water-cut by quantitative etched-glass micro-models. *Energy Exploration and Exploitation*, 2016, vol. 34, no. 4, pp. 586–605.
10. Karambeigi M.S., Asl A.H., Nasiri M. Multi-objective optimization of microemulsion flooding for chemical enhanced oil recovery. *Oil and Gas Science and Technology*, 2018, vol. 73, p. 73.
11. Liginkova Ya.S. Investigation of the influence of geological and commercial characteristics of the Tournaisian reservoir on the water cut of well production. *Subsoil use*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 15–20. (In Russ.)
12. Tilloeva Kh.F., Toshev Sh.O. Study of the influence on the water cut of wells during the operation of an oil well by the flowing method. *Alley of Science*, 2022, vol. 1, no. 12 (75), pp. 625–629. (In Russ.)
13. Li S., Ge Y. A numerical computation approach for the optimal control of asp flooding based on adaptive strategies. *Mathematical problems in engineering*, 2018, vol. 175, pp. 223–228.
14. Charonov V.Ya. *Automation of the main equipment and energy saving problems at oil and gas production facilities*. Almet'yevsk, «TatASUnef» AO «Tatneft» Publ., 1988. 330 p. (In Russ.)
15. Hasan A.R., Kabir C.S. Two-phase flow in vertical and inclined annuli. *Int. J. Multiphase Flow*, 1992, vol. 18, pp. 279–293.
16. Valovskiy V.M., Basos G.Yu., Valovskiy K.V., Zabbarov R.G. Energy-saving technologies for the operation of flooded wells. *Oil Industry*, 2011, no. 11, pp. 84–88. (In Russ.)
17. Ziganshina P.A. Development of pump units energy efficiency increasing techniques in reservoir pressure maintenance system. *Innovative processes in research and educational activities*, 2016, vol. 1, pp. 39–42.
18. Ivanovsky V.N., Karelina S.A. Once again to the question of the energy efficiency of electric vane pumps. *Neftegaz Territory*, 2022, no. 1–2, pp. 34–38. (In Russ.)
19. Zudin B.G., Savenok O.V. Selection of an electric centrifugal pump for the well of the Vostochno-Lambeishorskoe field. *Science. Technique. Technologies (polytechnic bulletin)*, 2021, no. 3, pp. 109–125. (In Russ.)
20. Purusova I.Yu. Actual performance of submersible pumps. *Energy saving and water treatment*, 2019, no. 4 (120), pp. 2–28. (In Russ.)

Information about the authors

Roza I. Vakhitova, Cand. Sc., Associate Professor, Almet'yevsk State Oil Institute, 2, Lenin street, Almet'yevsk, 423450, Russian Federation. roza-w@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6563-1095>

Diana A. Saracheva, Cand. Sc., Senior Lecturer, Almet'yevsk State Oil Institute, 2, Lenin street, Almet'yevsk, 423450, Russian Federation. elite@agni-rt.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7639-8954>

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., Professor, Ufa State Oil Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russian Federation. UrazakK@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2202-396X>

Received: 11.07.2023

Revised: 07.11.2023

Accepted: 22.03.2024

УДК 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4298

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Токсичность парогазовых потоков от техногенного вещества

С.Б. Бортникова^{1✉}, А.В. Мыщик², А.В. Еделев¹, А.А. Хващевская³

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Новосибирск

² Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Роспотребнадзора, Россия, г. Новосибирск

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Аннотация. **Актуальность** Парогазовые потоки от техногенного вещества (складированных отходов горнорудной промышленности), переносящие значительное количество потенциально токсичных элементов, представляют большую проблему для окружающей среды и населения, т. к. металлы и металлоиды в составе эманаций находятся в легкоусвояемой биодоступной форме и способны легко проникать в живые организмы. **Цель:** оценка токсичности для живых организмов воздушных смесей, содержащих газообразные продукты, выделяемые техногенным веществом, свободно расположенным вблизи населенных пунктов и находящимся под воздействием климатических факторов и микроорганизмов. **Объекты:** вещество арсенидных отходов комбината Тувакобальт и парогазовые эманации от него. **Методы:** проведение экспериментов с белыми крысами-самцами линии Вистар, анализ органов на содержание широкого круга элементов методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) (Проблемная научно-исследовательская лаборатория гидрогеохимии «Вода» Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета). В эксперименте использовалась объединенная проба вещества отходов. Проба была проанализирована на содержание оксидов силикатной группы методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation, Switzerland) в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, элементный анализ проводился методом ИСП-МС на приборе ELAN-9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA (ХАЦ «Плазма»). **Результаты.** При воздействии парогазовых эманаций от вещества арсенидных отходов комбината Тувакобальт на группу крыс-самцов линии Вистар в опытной группе произошли патологические изменения. В легких образовались мелкие очаги кровоизлияний, ткани стали отечными и воспалены. Печень у всех животных увеличилась, стало резко выражено долевое строение, цвет стал светло-бежевым. В почках обнаружены единичные кровоизлияния. Сосуды мозговых оболочек расширены, наблюдаются петехиальные кровоизлияния. Была нарушена синтетическая функция клеток и стабильность клеточных и внутриклеточных мембран, в первую очередь пострадал эндотелий кровеносных сосудов, было нарушено физиологическое функционирование органов и тканей с накоплением промежуточных продуктов биохимических реакций, определяемое макроскопически. Также определялась дистрофия внутренних органов, в частности печени, легких, почек, головного мозга. Элементный анализ органов животных показал накопление токсичных элементов по сравнению с контрольной группой. Наиболее характерные элементы, превышение по которым зафиксировано в большинстве случаев, – это ртуть и мышьяк. Они неравномерно распределялись по органам. Ртуть главным образом накапливалась в легких, почках и печени, а мышьяк – преимущественно в печени и мозге. Это может свидетельствовать о попадании ионов ртути и мышьяка в биологически доступной форме в кровоток ингаляционным путём, причём локальное раздражающее и токсическое воздействие на легкие не было преобладающим, а наиболее повреждённым органом являлась печень по результатам токсикохимического и морфологического исследований. Гомеостаз микро- и макроэлементов тонко отрегулирован, и любой концентрационный дисбаланс в виде дефицита приводит к прогрессирующему снижению и нарушению нормальной биологической функции, к тяжелым физиологическим и клиническим исходам, что и наблюдалось по результатам опыта. Полученные данные доказали острое токсичное воздействие парогазовых потоков на живые организмы, а также подтвердили возможность выноса многих химических элементов в легкодоступной и усвояемой формах.

Ключевые слова: арсенидные отходы, парогазовые потоки, металлы и металлоиды, крысы-самцы линии Вистар, токсический эффект

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию Минобрнауки РФ Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук № 0266-2022-0028.

Для цитирования: Токсичность парогазовых потоков от техногенного вещества / С.Б. Бортникова, А.В. Мыщик, А.В. Еделев, А.А. Хващевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 95–107. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4298

UDC 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4298

Toxicity of vapor-gas flows from technogenic substance

S.B. Bortnikova^{1✉}, A.V. Mytsik², A.V. Edelev¹, A.A. Khvachevskaya³

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Research Institute of Hygiene Rospotrebnadzor, Novosibirsk, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. Vapor-gas flows from technogenic substances (storage wastes of the mining industry), carrying a high amount of potentially toxic elements, are a big problem for the environment and the population, because metals and metalloids in the composition of emanations are in easily digestible bioavailable forms and are able to easily penetrate into living organisms. **Aim.** Assessment of toxicity for living organisms of air mixtures containing gaseous products emitted by a surface of mine tailings freely located near settlements and under the influence of climatic factors and microorganisms. **Objects.** Arsenide waste material from the Tuvacobalt plant and steam-gas emanations from it. **Methods.** Experiments with white rats male Wistar, analysis of organs for the content of a wide range of elements by ICP-MS on a NexION 300D mass spectrometer (PerkinElmer, USA) (Problem-based research laboratory of hydrogeochemistry "Water" of the School of Natural Resources Engineering of Tomsk Polytechnic University). In the experiment, a pooled sample of the waste substance was used. The sample was analyzed for the content of oxides of the silicate group by XRF using an X-ray fluorescence spectrometer ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation, Switzerland) at the Laboratory of X-ray Spectral Analysis Methods of the IGM SB RAS; elemental analysis was carried out by ICP-MS using an ELAN-9000 DRC-e instrument Perkin Elmer, USA (HAC Plasma). **Results.** Under the influence of vapor-gas emanations from the substance of arsenide tailings of the Tuvacobalt plant on a group of rats male Wistar, pathological changes occurred in the experimental group. Small foci of hemorrhages formed in the lungs, the tissues became edematous and inflamed. The liver of all animals increased, the share structure became sharply expressed, the color became light beige. Single hemorrhages were found in the kidneys. The vessels of the meninges are dilated, petechial hemorrhages are observed. The synthetic function of cells and the stability of cellular and intracellular membranes were disrupted, first of all, the endothelium of blood vessels was affected, the physiological functioning of organs and tissues was disrupted with the accumulation of intermediate products of biochemical reactions, determined macroscopically. Also, dystrophy of internal organs was determined, in particular, the liver, lungs, kidneys, and brain. Elemental analysis of animal organs showed the accumulation of toxic elements in comparison with the control group. The most characteristic elements, the excess of which was recorded in most cases, are mercury and arsenic. They were unevenly distributed throughout the organs. Mercury was accumulated mainly in the lungs, kidneys and liver, while arsenic was accumulated mainly in the liver and brain. This may indicate the entry of mercury and arsenic ions in a biologically available form into the bloodstream by inhalation, and local irritating and toxic effects on the lungs were not prevailing, and the liver was the most damaged organ according to the results of toxicological and morphological studies. The homeostasis of micro- and macroelements is finely regulated, and any concentration imbalance in the form of a deficiency leads to a progressive decrease and disruption of normal biological function, to severe physiological and clinical outcomes, which we observed from the results of the experiment. The data obtained proved the acute toxic effect of vapor-gas flows on living organisms, and also confirmed the possibility of the removal of many chemical elements in easily accessible and assimilable forms.

Keywords: arsenide waste, vapor-gas flows, metals and metalloids, male Wistar rats, toxic effect

Acknowledgements: This research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, grant number FWZZ-2022-0028 of IPGG SB RAS (Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences).

For citation: Bortnikova S.B., Mytsik A.V., Edelev A.V., Khvachevskaya A.A. Toxicity of vapor-gas flows from technogenic substance. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 95–107. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4298

Введение

Отходы горнодобывающей и металлургической промышленности, содержащие высокие количества металлов и металлоидов, оказывают серьезное

негативное воздействие на окружающую среду, биоту и человека [1–4]. Большое внимание исследователей направлено на изучение шахтных вод и дренажных потоков вследствие высоких концен-

траций токсичных элементов [5, 6] и влияния на природные воды, почвы, растительность и население [7, 8].

Загрязнение воздуха – это не современное понятие, оно существовало на протяжении многих веков. В мире широко изучаются проблемы воздействия загрязнения атмосферного воздуха на здоровье людей. Известно, что оно является причиной смерти более 2 млн человек каждый год [9]. Исследователи подсчитали, что ежегодный материальный ущерб, связанный с воздействием одних только взвешенных частиц на здоровье людей (совокупно по смертности и заболеваемости), в 1990-х – начале 2000-х гг. имел следующие показатели: 3,6 млрд долл. в Австрии, 24,3 млрд долл. во Франции, 3 млрд долл. в Швеции, 21,2 млрд долл. в Великобритании. В США ущерб от воздействия атмосферных взвесей составил 40–50 млрд долл. в год, а Китае – 61 млрд долл. [10, 11].

Металлургическая и горная промышленность является одним из крупнейших источников загрязнения атмосферного воздуха [12–16]. Сети метеорологических станций наблюдения могут использоваться для мониторинга метеорологических параметров и определения воздействия загрязнителей воздуха на компоненты окружающей среды. Для изучения антропогенного воздействия на окружающую среду используются различные косвенные показатели, такие как изменение химического состава почв [17–20], снежного покрова [21–25], а также растения-индикаторы [26–30]. В дополнение к биоиндикаторным исследованиям в городах для оценки воздействия загрязнения широко используются методы активного биомониторинга и оценки накопления загрязняющих веществ в мхах и лишайниках [31–35]. В частности, оценки качества мха стандартизированы и рекомендованы для исследования загрязнения атмосферы [33, 36].

Техногенные выбросы металлов в виде аэрозолей поступают в атмосферу и переносятся на огромные расстояния, провоцируя тем самым глобальное загрязнение.

Серьезной экологической проблемой является поступление многих химических элементов в составе парогазовых потоков от техногенных тел (складированных отходов обогащения горнорудной промышленности) [37, 38]. При этом показано, что при эмиссии от техногенных тел химические элементы способны переноситься в истинном газовом потоке либо в виде нано-размерных частиц <3 нм [39], что означает их высокую биодоступность. Не все металлы в любом количестве являются токсичными. Некоторые тяжелые металлы важны в качестве микроэлементов во внутриклеточных биохимических реакциях. Необходимым считают такой химический элемент, при недостатке которого в организме человека возникают функциональные

нарушения (гипомикроэлементозы), такие как болезнь Менкеса (дефицит меди) [40], врожденные пороки развития по причине дефицита цинка [41], диабет в связи с дефицитом марганца [42] и др. Ионы некоторых металлов служат терапевтическими агентами. Карбоксилаты цинка, например, используются против бактерий, вызывающих заболевание «ноги атлета», а лития – при лечении маниакальной депрессии [43]. Однако при накоплении тяжелых металлов в организме токсические эффекты многих из них вызывают серьезную озабоченность.

Некоторые опасные вещества явно не обнаруживаются, но многочисленные жалобы на изменения органолептических свойств воздуха и увеличение удельной доли определенных заболеваний на территориях, примыкающих к крупным обогастительным предприятиям, позволяют предположить неблагоприятное влияние пока неустановленных, вновь образованных соединений, в том числе различных металлов и металлоидов, перемещающихся с воздушными массами из зон складирования промышленных отходов в места нахождения людей [44]. На сегодня отсутствуют исчерпывающие знания о трансформации потенциально опасных веществ и соединений в экологической системе. Это приводит порой к серьезным последствиям: кажущиеся безопасными продукты человеческой деятельности в биогеоценозе могут стать токсикантами.

Цель данной работы состояла в оценке токсичности для живых организмов воздушных смесей, содержащих газообразные продукты, выделяемые техногенным веществом, свободно расположенным вблизи населенных пунктов и находящимся под воздействием климатических факторов и микроорганизмов.

Материалы и методы

Для экспериментов было выбрано вещество арсенидных отходов комбината Тувакобальт. Основанием для проведения экспериментов именно с этими отходами служили полученные ранее результаты по составу конденсатов парогазовых потоков от поверхности карт захоронения, в которых были определены многие элементы в летучей форме [45].

Характеристика вещества для экспериментов

Пробы для экспериментов были отобраны на картах №№ 4 и 5 хранилищ отходов комбината Тувакобальт. Расположение карт захоронения и состав отходов в них показаны ранее [45]. Собранные пробы были объединены и тщательно перемешаны. Из полученной смеси методом квартования отобраны навески для анализов и экспериментов. Оксиды силикатной группы определены методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation) в лабо-

ратории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, элементный анализ проводился методом ИСП-МС на приборе ELAN-9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA (ХАЦ «Плазма»).

Для определения состава эманаций от экспериментального вещества были получены конденсаты парогазовой смеси, отделяющейся при небольшом нагревании. Навеска вещества пробы ~100 г была помещена в термостойкий стакан, накрытый воронкой, которая соединялась с барботером силиконовым шлангом. Воздушная смесь откачивалась обратным компрессором, присоединенным ко второму выходу барботера. Стакан с пробой нагревался до температуры 60 °С на термостатической плитке в течение 8–10 часов, и конденсат поступал в барботер. Концентрации основных ионов в конденсате определялись методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 105-М» (Люмэкс, Санкт-Петербург). На микроэлементный состав пробы анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии «Вода» Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Постановка эксперимента

Эксперимент провели на белых крысах-самцах линии Wistar общей массой 250–280 г. Животных содержали в условиях лабораторного вивария по 10 особей в полипропиленовых клетках, накрытых сверху высокой металлической решёткой, не менее двух недель до начала экспериментов на стандартной диете, при свободном доступе к воде и нормальном световом режиме. На каждое животное приходилось 270 см² площади клетки. Эксперимент проводился соответственно правилам, принятым на Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и иных научных целей [46], правилам лабораторной практики [47]. В эксперименте задействовано 20 лабораторных животных, две группы по 10 особей, контрольная и опытная.

Экспериментальных животных помещали в стандартные 200-литровые затравочные камеры, которые дважды сообщались между собой с помощью химических силиконовых трубок для постоянной диффузии пара, во время ингаляционной затравки использовали насос «Кип-Консалт» (рис. 1).

За час до исследования в первую камеру помещали пробу вещества массой 1500 г в лабораторной фарфоровой емкости, установленной на электропечь. В пробу добавляли дистиллированную воду в количестве 100–150 мл для испарения. Для нагрева вещества использовали лабораторную электропечь с контролируемым датчиком температуры. Температуру поверхности электропечи выставляли на 120 °С

для постоянного нагрева образца до 50 °С по всему объему до получения устойчивой концентрации пара в первой камере. Мониторинг нагрева вещества выполняли с помощью ртутного градусника ТЛ-2.

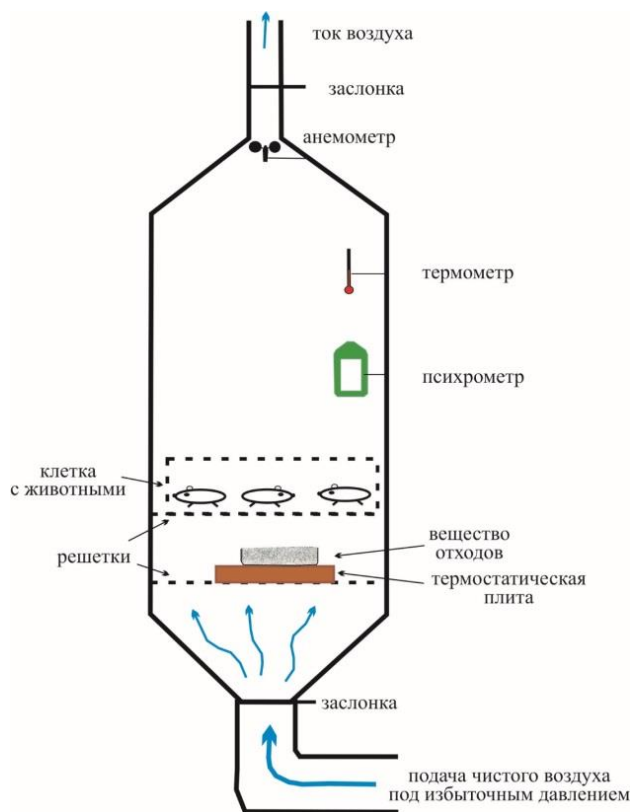


Рис. 1. Схема эксперимента

Fig. 1. Setup of the experiment

После этого во вторую камеру помещали лабораторных животных и экспонировали в течение 4 часов с 10:00 до 14:00. Во время затравки в камерах каждые полчаса снимали показатели (табл. 1):

- В первой камере – температуру нагревающейся поверхности электроплитки (°С), температуру нагревающегося грунта (°С), влажности ϕ , %.
- Во второй камере – температуру воздуха (°С) и влажности ϕ (%).

После трехдневной ингаляции опытную группу лабораторных животных выводили методом усыпления диэтиловым эфиром и последующей цервикальной дислокацией. Осуществляли вскрытие и проводили осмотр внутренних органов сразу после забоя. После вскрытия изымались мозг, печень, легкие, почки для диагностики содержания тяжелых металлов и металлоидов в тканях. На четвертые сутки контрольную группу выводили, осуществляли вскрытие, проводили осмотр и изымали органы так же, как и в опытной группе.

Таблица 1. Условия эксперимента по определению токсичности паров от вещества Хову-Аксинских хранилищ

Table 1. Conditions of the experiment to determine the toxicity of vapors from the Khovu-Aksu tailings

Опытная группа/Experimental group					Контрольная группа/Control group		
Время Time	Температура/Temperature of, T, °C			φ, %	Время Time	Т воздуха (air) °C	φ, %
	поверхности электроплитки electric stove surface	грунта ground	воздуха air				
10:00	80	Ниже 30 Below 30	26,2	73	10:00	26,2	83
10:30	82		27,8	87	10:30	26,2	85
11:00	82		28,5	90	11:00	26,2	85
11:30	82	38	28,8	91	11:30	26,3	87
12:00	82	42	28,8	91	12:00	26,4	91
12:30	82	46	28,9	92	12:30	26,4	91
13:00	82	47	28,9	95	13:00	26,4	92
13:30	Отключили электроплитку/Turned off the electric stove				13:30	26,6	93
14:00	Подача воздуха/Air supply				14:00	Подача воздуха/Air supply	
Добавили H2O 100 мл/Added H2O 100 ml							
10:00	120	59	25,8	67	10:00	26,0	78
10:30	120	68	27,9	99	10:30	26,0	79
11:00	120	69	27,9	99	11:00	26,1	80
11:30	120	70	28	99	11:30	26,1	81
12:00	120	72	28	99	12:00	26,2	82
12:30	119	74	28	99	12:30	26,3	81
13:00	119	72	28	99	13:00	26,4	85
13:30	Отключили электроплитку/Turned off the electric stove				13:30	26,5	92
14:00	Подача воздуха/Air supply				14:00	Подача воздуха/Air supply	
Перемешали грунт, добавили H2O 150 мл Ground was mixed, H2O 150 ml was added							
10:00	125	47	25	90	10:00	26,0	79
10:30	125	51	25,5	93	10:30	26,1	80
11:00	125	56	26,4	98	11:00	26,2	85
11:30	126	59	26,7	99	11:30	26,3	87
12:00	125	60	26,9	99	12:00	26,4	91
12:30	125	60	27	99	12:30	26,4	93
13:00	125	61	27	99	13:00	26,4	95
13:30	Отключили электроплитку/Turned off the electric stove				13:30	26,6	97
14:00	Подача воздуха/Air supply				14:00	Подача воздуха/Air supply	

Органы животных (контрольной и опытной группы) были высушены в сушильном шкафу при T 105 °C до постоянной массы и проанализированы методом ИСП МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) с ячейкой устранения фона UCT в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии «Вода» Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Навеску пробы 0,4–0,5 г помещали в пластиковую пробирку объемом 50 см³, проверенную на чистоту. Далее проводилось мокрое озоление образца добавлением 2 см³ особо чистой концентрированной азотной кислоты и 1 см³ перекиси водорода, последующее микроволновое разложение с использованием микроволновой системы со встроенными бесконтактными датчиками температуры и давления «Speedwave four» при температуре 190 °C в течение 15 минут. Полученная смесь доводилась до объема 50 см³ 3 % раствором азотной кислоты. Подготовка «холостой пробы» (blank) проводится аналогичным способом с использованием вместо пробы деионизованной воды. Контроль качества результатов анализа проводился с использованием мультиэлементных калибровочных образцов № 2–5 (PerkinElmer, США).

Относительная погрешность определений составляет 15–30 % в зависимости от содержания элементов.

Результаты

Состав вещества и конденсата

Состав пробы, принятой для эксперимента, соответствует усредненному составу отходов комбината Тувакобальт, складированных в пяти картах захоронения и старых траншеях [45, 48] (табл. 2). В соответствии с составом руд месторождения Хову-Аксы, в отходах сохранились сравнительно высокие концентрации As, Co, Ni, Cu.

Состав парогазовых эманаций был оценен по составу собранного конденсата, являющегося ультрапресным слабощелочным раствором (pH=8,00), в соответствии с классификацией природных вод, сульфатно-гидрокарбонатного класса, кальций-натриевой группы (табл. 3). Летучие формы, отделяющиеся от вещества отходов с парогазовыми потоками, образуют многие элементы, ведущие из которых – катионы (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) и цинк, концентрации которого (0,74 мг/л) сопоставимы с содержанием катионов (табл. 3). Mn, Cu, Ni, As и Ba определены в конденсатах в меньшем количе-

стве. Основной анион – гидрокарбонат (4,1 мг/л), сульфат составляет меньшую концентрации – 2,4 мг/л. При этом в анионном составе заметную роль играют органические лиганды – оксалат и формиат (0,27 и 1,2 мг/л, соответственно), что указывает на участие микробиоты в процессе трансформации вещества и формировании подвижных форм элементов, а также их перенос в виде металл-органических комплексов [37, 38].

Таблица 2. Состав вещества Хову-Аксинских отходов для эксперимента по определению токсичности парогазовых потоков: SiO₂ – LOI в %, Cr – Hg в г/м

Table 2. Composition of the Khovu-Aksu tailings for the experiment to determine the toxicity of vapor-gas flows: SiO₂ – LOI in %, Cr – Hg in ppm

Компонент Component	Содержание Content	Элемент Element	Содержание Content
SiO ₂	30,34	Cr	83
TiO ₂	0,30	Co	1500
Al ₂ O ₃	7,95	Ni	1500
Fe ₂ O ₃	7,28	Cu	670
MnO	0,25	Zn	270
MgO	5,67	Pb	41
CaO	15,80	Cd	1,1
Na ₂ O	0,84	Ag	7,6
K ₂ O	1,45	Sb	100
P ₂ O ₅	0,22	Se	7,5
BaO	0,03	Mo	3,2
S _{tot}	0,20	Rb	26
As	2,37	Sr	110
LOI	16,6	Hg	2,0

Таблица 3. Состав конденсата объединенной экспериментальной пробы отходов: SO₄²⁻ – K в мг/л, Fe – Sr в мг/л

Table 3. Condensate composition of the experimental tailings sample: SO₄²⁻ – K in mg/L, Fe – Sr in µg/L

Компонент Component	Концентрация Concentration	Элемент Element	Концентрация Concentration
pH	8,00	Fe	2,3
SO ₄ ²⁻	2,4	Al	9,0
Cl ⁻	0,91	Mn	40
NO ₃ ⁻	0,48	Cu	50
C ₂ O ₄ ²⁻ (оксалат oxalate)	0,27	Zn	740
HCOO ⁻ (формиат formate)	1,2	Pb	0,27
HCO ₃ ⁻	4,1	Ni	21
Ca ²⁺	1,9	Co	4,6
Mg ²⁺	0,30	As	23
Na ⁺	0,96	Ba	45
K ⁺	0,44	Sr	7,1

Отметим, что ртуть в конденсате оказалась в концентрациях ниже предела обнаружения. Однако при проведении ртутной съёмки в ходе полевых

работ на поверхности карт №№ 4 и 5 обнаружены аномалии ртути в приземном слое атмосферы до 3000 нг/м³, что свидетельствует об активном эманировании её газовых форм от вещества отходов.

Морфологические изменения у экспериментальных животных

После окончания эксперимента и вскрытия животных при макроскопическом описании в группе КОНТРОЛЯ морфологических изменений не отмечалось.

В ОПЫТНОЙ группе у всех из 10 лабораторных животных обнаружили патологические изменения. В легких – мелкие очаги кровоизлияний, преимущественно в субплевральных отделах легких, ткани легких отечны, воспалены. Печень у всех животных увеличена, светло-бежевого цвета, резко выражено долевое строение. На разрезе светло-бежевого цвета, дряблой консистенции. Морфологически – признаки жировой дистрофии печени. В почках единичные кровоизлияния под капсулой и на разрезе. Ткани почек уплотнены, темного цвета, граница между корковым и мозговым веществом выражена нечетко. Сосуды мозговых оболочек расширены, в их толще наблюдаются петехиальные кровоизлияния размером около 0,5 мм.

Накопление элементов в тканях

Элементный анализ органов животных показал накопление токсичных элементов по сравнению с контрольной группой (табл. 4, рис. 2). У большинства опытных животных произошло накопление (в среднем): Hg (в 1,7 раз), Ni (в 6,5 раз) и Fe (в 1,5 раз) в легких; Mg (в 1,6 раз), Mn (в 1,6 раз), Fe (в 2 раза), As (в 2 раза) в мозге; Mg (в 1,2 раза), Mn (в 1,2 раза), Hg (в 1,4 раза) в печени; Mg (в 1,3 раза), Ni (в 2,4 раза), Fe (в 2 раза), As (в 2,2 раза), Hg (в 1,6 раз), Pb (в 1,7 раз) в почках.

Таблица 4. Накопление и вынос элементов в органах белых крыс в эксперименте

Table 4. Accumulation and removal of elements in the organs of white rats in the experiment

Орган Organ	Повышенные по сравнению с контролем Elevated compared to control	Пониженные по сравнению с контролем Decreased compared to control
Легкие Lungs	Mg (9), Hg (10), Ni (10), As (4), Fe (7)	Na (9), P (8), Si (8), K (8), Br (8), I (8)
Мозг Brain	Mg (10), Mn (10), Fe (8), As (9), Hg (5)	Na (8), Si (8), P (8), S (8), K (8), Br (7)
Печень Liver	Mg (6), Mn (5), Fe (6), As (2), Hg (9)	Na (9), Si (8), P (8), S (9), K (9), Ca (10), Br (10)
Почки Kidneys	Mg (10), Mn (4), Fe (8), Ni (10), As (10), Hg (10), Pb (4)	Na (6), P (8), S (8), K (8), Ca (8)

Примечание: в скобках показано количество животных, у которых обнаружено повышение/понижение концентраций элементов.

Note: the numbers in parentheses show the number of animals with increase/decrease in the concentrations of elements.

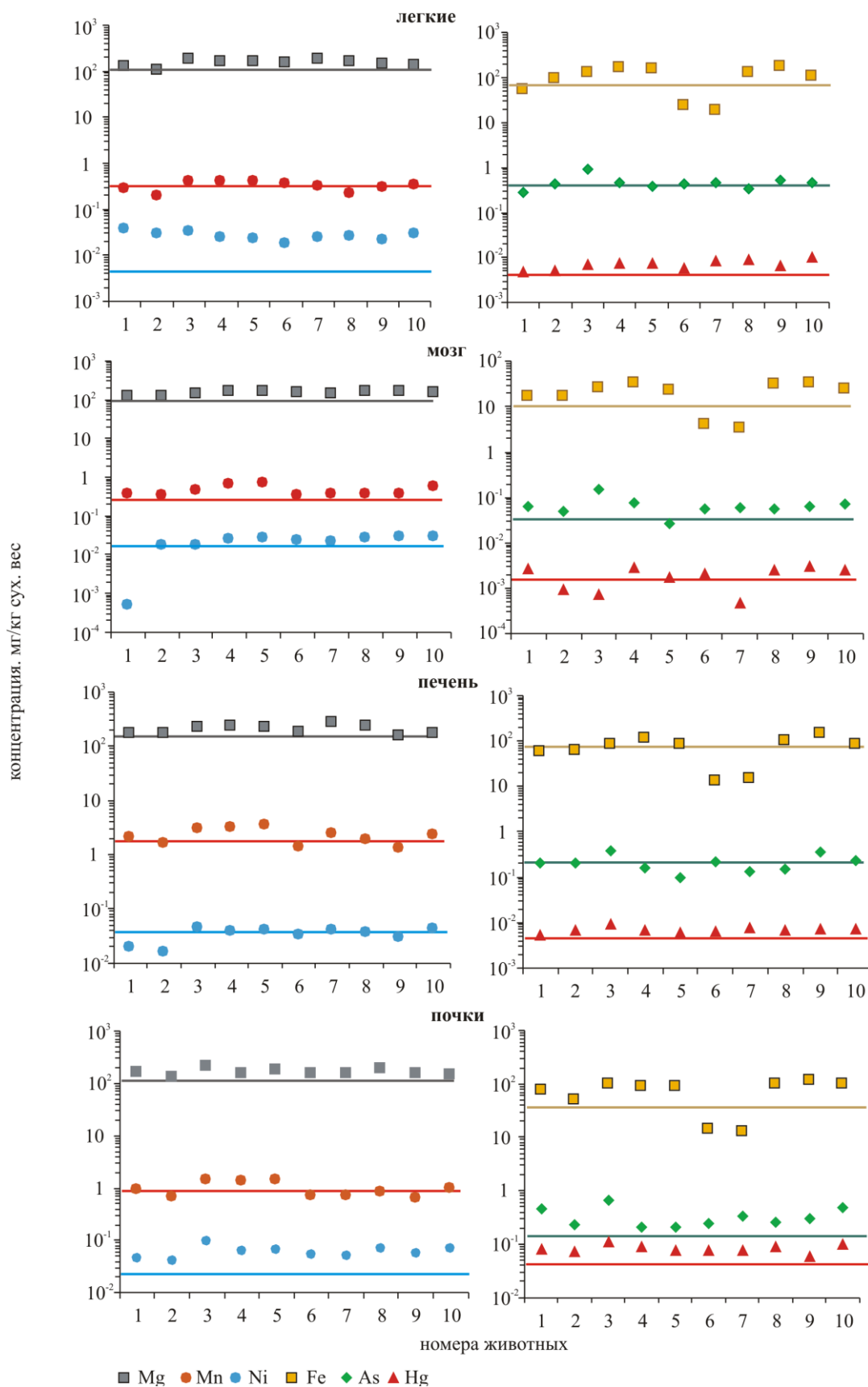


Рис. 2. Концентрации некоторых элементов в органах опытных животных по сравнению с контрольной группой. Линиями на графиках показан уровень концентраций в контроле

Fig. 2. Concentrations of some elements in the organs of experimental animals compared with the control group. The lines on the graphs show the level of concentrations in the control

Отметим, что у отдельных животных превышение концентраций в органах было существенно больше (рис. 2). Максимальное накопление никеля в легких почти на порядок превышало контроль, в почках – в 4 раза; мышьяка – более чем в 4 раза в мозге, легких и почках. Элементы неравномерно распределялись по органам. Ртуть главным образом накапливалась в легких, печени и в почках, мышьяк – в мозге и почках, никель – в легких и почках. У всех животных во всех органах отмечено превышение содержания магния. Наиболее уязвимым органом оказались почки, в которых шло наибольшее накопление элементов, а кроме отмеченных выше, свинца (в 1,7 раз выше контроля в среднем и в 7 раз – максимальные концентрации). При этом, вероятно, имела место не совсем равномерная экспозиция паров на разных животных. Например, во всех органах животных №№ 6 и 7 отмечается минимальная концентрация железа по выборке, а у животного № 3 – максимальное содержание мышьяка.

Видимо, сочетанное накопление различных металлов и мышьяка в органах животных произвело эффект взаимного усиления токсического действия, которое превысило компенсаторные возможности биологических систем и явилось причиной их острого поражения, проявившегося морфологически.

Одновременно с накоплением определенных элементов, характерных для парогазовых эманаций от вещества Хову-Аксинских отходов, происходило заметное обеднение некоторыми биогенными элементами (Na, P, K, S, Br, I), вынос которых, предположительно, осуществлялся за счет замещения токсичными тяжелыми металлами и мышьяком. В среднем биогенных элементов стало на 20–30 % меньше в органах опытных животных по сравнению с контролем.

Взаимодействие биологических объектов с металлами и металлоидами вызывает особый интерес, поскольку одни из них входят в состав живых организмов как макроэлементы, выполняя физиологическую роль (Cu, Zn, Se), а другие являются ксенобиотиками (Hg, Ag, As). Парогазовые эманации (а вместе с ними химические элементы в биодоступной форме), в отличие от пылевых фракций различной дисперсности, могут проникать в респираторные отделы легких, повреждая эпителий, обеспечивающий газообмен, и изменять состав крови со скоростью, сопоставимой с непосредственным парентеральным введением. Сочетание этих факторов резко повышает биологическую доступность и токсические эффекты, которые сложно предсказать при совместном воздействии переносимых газовыми потоками веществ. Запуск каскадов патологических реакций приводит к различным

проявлениям нарушения функций клеток, органов и тканей тем более сложных, чем более многофакторно альтерирующее действие и состав токсических смесей [49].

В целом полученные результаты свидетельствуют об остром токсическом эффекте парогазовых эманаций от вещества отходов, высокой биодоступности летучих форм элементов, быстром проникании их в органы живых организмов и накоплении за счет биогенных компонентов. Проблема генерации и распространения в приземном слое атмосферы эманаций, выносящих легко усвояемые металлы и металлоиды, требует пристального внимания и дальнейшего изучения, т. к. эти процессы практически не исследованы, а масштабы неизвестны.

Заключение

При воздействии парогазовых эманаций от вещества арсенидных отходов комбината Тувакобальт на группу крыс-самцов линии Вистар в опытной группе произошли патологические изменения. В легких образовались мелкие очаги кровоизлияний, ткани стали отечны и воспалены. Печень у всех животных увеличилась, стало резко выражено долевое строение, цвет стал светло-бежевым. В почках обнаружены единичные кровоизлияния. Сосуды мозговых оболочек расширены, наблюдаются петехиальные кровоизлияния.

Была нарушена синтетическая функция клеток и стабильность клеточных и внутриклеточных мембран, в первую очередь пострадал эндотелий кровеносных сосудов, было нарушено физиологическое функционирование органов и тканей с накоплением промежуточных продуктов биохимических реакций, определяемое макроскопически. Также определялась дистрофия внутренних органов, в частности печени, легких, почек, головного мозга.

Элементный анализ органов животных показал накопление токсичных элементов по сравнению с контрольной группой. Наиболее характерные элементы, превышение по которым зафиксировано в большинстве случаев, – это ртуть и мышьяк. Они неравномерно распределялись по органам. Ртуть главным образом накапливалась в легких, почках и печени, а мышьяк – преимущественно в печени и мозге. Это может свидетельствовать о попадании ионов ртути и мышьяка в биологически доступной форме в кровоток ингаляционным путём, причём локальное раздражающее и токсическое воздействие на легкие не было преобладающим, а наиболее повреждённым органом являлась печень по результатам токсикохимического и морфологического исследований.

Одновременно шло обеднение некоторыми биогенными элементами (Na, P, K, S, Br, I), вынос ко-

торых, предположительно, осуществлялся за счет замещения токсичными тяжелыми металлами и мышьяком.

Гомеостаз микро- и макроэлементов тонко регулирован, и любой концентрационный дисбаланс в виде дефицита приводит к прогрессирующему снижению и нарушению нормальной биологиче-

ской функции, к тяжелым физиологическим и клиническим исходам, что мы и наблюдали по результатам опыта. Полученные данные доказали острое токсичное воздействие парогазовых потоков на живые организмы, а также подтвердили возможность выноса многих химических элементов в легкодоступной и усвояемой формах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Helser J., Vassilieva E., Cappuyns V. Environmental and human health risk assessment of sulfidic mine waste: Bioaccessibility, leaching and mineralogy // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – Vol. 424. – Article No. 127313.
2. Rahman Z., Singh V.P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr) (VI), mercury (Hg), and lead (Pb) on the total environment: an overview // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – Vol. 191. – P. 1–21.
3. Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health / W.P. Covre, S.J. Ramos, W.V. da Silveira Pereira, E.S. de Souza, G.C. Martins, O.M.M. Teixeira, C.B. do Amarante, Y.N. Dias, A.R. Fernandes // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – Vol. 421. – Article No. 126688.
4. Mobilization of toxic elements from an abandoned manganese mine in the arid metropolitan Las Vegas (NV, USA) area / J.H. Park, V. Hodge, S. Gerstenberger, K. Stave // *Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 4. – P. 240–254.
5. Hydrogeochemical evolution induced by long-term mining activities in a multi-aquifer system in the mining area / C. Wang, F. Liao, G. Wang, S. Qu, H. Mao, Y. Bai // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 854. – Article No. 158806.
6. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // *Applied Geochemistry*. – 2015. – Vol. 57. – P. 3–16.
7. Current state of the gold mining waste from the ores of the Ursk deposit (Western Siberia, Russia) / N. Yurkevich, P. Osipova, L. Tsimizov, E. Tsimizova, I. Fadeeva, S. Volynkin, K. Tulisova, T. Kuleshova // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – No. 10610.
8. Transfer and distribution of metals and metalloids in carassius auratus organs from tailings pond and their influence on morphological characteristics / E.N. Yadrenkina, S.B. Bortnikova, N.V. Yurkevich, T.V. Korneeva, A.Y. Shevko, V.V. Olenchenko, A.A. Khvachevskaya // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – No. 12446.
9. Remoundou K., Koundouri P. Environmental effects on public health: an economic perspective // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2009. – Vol. 8. – Iss. 6. – P. 2160–2178.
10. Pearce D. Economic valuation and health damage from air pollution in the developing world // *Energy Policy*. – 1996. – Vol. 7. – Iss. 24. – P. 627–630.
11. Рахманин Ю.А., Новиков С.М., Румянцев Г.И. Методологические проблемы оценки угроз здоровью человека факторов окружающей среды // *Гигиена и санитария*. – 2003. – № 6. – С. 5–9.
12. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia / D. Gregurek, E. Melcher, V.A. Pavlov, C. Reimann, E.F. Stumpf // *Mineralogy and Petrology*. – 1999. – Vol. 4. – Iss. 65. – P. 87–111.
13. The empirical relationship between mining industry development and environmental pollution in China / G. Li, Y. Lei, J. Ge, S. Wu // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2017. – Vol. 14. – Iss. 3. – Article 254.
14. Phytoindicational properties of the vegetation in landscape transformation studies on Sibay Chalcopyrite deposits (southern Urals) / M.G. Opekunova, A.Ju. Opekunov, E.E. Papyan, V.V. Somov // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2017. – Vol. 10. – № 3. – P. 301–314.
15. Timofeev I.V., Kosheleva N.E. Geochemical disturbance of soil cover in the nonferrous mining centers of the Selenga River basin // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2017. – Vol. 39. – P. 803–819.
16. Metal mining's environmental pressures: a review and updated estimates on CO₂ emissions, water use, and land requirements / M. Tost, B. Bayer, M. Hitch, S. Lutter, P. Moser, S. Feiel // *Sustainability*. – 2018. – Vol. 10. – Iss. 8. – Article 2881.
17. Carlon C. Derivation methods of soil screening values in Europe: a review and evaluation of national procedures towards harmonization. EUR 22805-EN. – Ispra: Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission, 2007. – 306 p.
18. Weissenstein K., Sinkala T. Soil pollution with heavy metals in mine environments, impact areas of mine dumps particularly of gold- and copper mining industries in Southern Africa // *Arid Ecosystems*. – 2011. – Vol. 1. – P. 53–58.
19. Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes / E. Cruzado-Tafur, L. Torró, K. Bierla, J. Szpunar, E. Tauler // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 106. – Article No. 103107.
20. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: a case study in the Pearl River Delta, south China / J. Zhang, H. Li, Y. Zhou, L. Dou, L. Cai, L. Mo, J. You // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 235. – P. 710–719.
21. Multiple effects of changes in Arctic snow cover / T.V. Callaghan, M. Johansson, R.D. Brown, P.Ya. Groisman, N. Labba, V. Radionov, R.S. Bradley, S. Blangy, O.N. Bulygina, T.R. Christensen, J.E. Colman, R.L.H. Essery, B.C. Forbes, M.C. Forchhammer, V.N. Golubev, R.E. Honrath, G.P. Juday, A.V. Meshcherskaya, G.K. Phoenix, J. Pomeroy, A. Rautio, D.A. Robinson, N.M. Schmidt, M.C. Serreze, V.P. Shevchenko, A.I. Shiklomanov, A.B. Shmakina, P. Sköld, M. Sturm, M. Woo, E.F. Wood // *Ambio*. – 2011. – Vol. 40. – P. 32–45.
22. Gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula / V.P. Shevchenko, S.N. Vorobyev, V.V. Krickov, R.M. Manasyrov, N.V. Politova, S.G. Kopysov, O.M. Dara, Y. Auda, L.S. Shirokova, L.G. Kolesnichenko,

- V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin, E. Steinnes, N.V. Lukina, V.V. Nikonov, D. Aamlid, O.A. Røyset // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2000. – Vol. 60. – Iss. 1. – P. 71–88.
23. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби / В.П. Шевченко, В.Н. Воробьев, С.Н. Кирпотин, И.В. Крицков, Р.М. Манасыпов, О.С. Покровский, Н.В. Политова // *Оптика атмосферы и океана*. – 2015. – Т. 28. – № 6. – С. 499–504.
24. Mercury pollution in snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk Regions, Russia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, N.A. Osipova, E.E. Lyapina, V.V. Litay, G. Metreveli, J. Kim // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2019. – Vol. 12. – № 4. – P. 132–147.
25. Таловская А.В., Языков Е.Г., Филимоненко Е. А. Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных районов Томской области по данным изучения снегового покрова // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2014. – № 5. – С. 408–417.
26. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. – 344 p.
27. Geochemical atlas of the Eastern Barents Region / R. Salminen, V. Chekushin, M. Tenhola, I. Bogatyrev, S.P. Glavatskikh, E. Fedotova, V. Gregorauskiene, G. Kashulina, H. Niskavaara, A. Polischuok, K. Rissanen, L. Selenok, O. Tomilina, L. Zhdanova. – Amsterdam: Elsevier B.V., 2004. – 548 p.
28. Pirintos A.S., Loppi S. Biomonitoring atmospheric pollution the challenge of times in environmental policy on air quality // *Environmental Pollution*. – 2008. – Vol. 151. – P. 269–271.
29. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2010. – 548 p.
30. Geosphere-biosphere circulation of chemical elements in soil and plant systems from a 100 km transect from southern central Norway / C. Reimann, K. Fabian, B. Flem, M. Andersson, P. Filzmoser, P. Englmaier // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 639. – P. 129–145.
31. Vasconcelos M.T.S.D., Tavares H.M.F. Atmospheric metal pollution (Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn) in Oporto city derived from results for low-volume aerosol samplers and for the moss *Sphagnum auriculatum* bioindicator // *Science of the Total Environment*. – 1998. – Vol. 212. – P. 11–20.
32. Salo H., Makinen J. Magnetic biomonitoring by moss bags for industry-derived air pollution in SW Finland // *Atmospheric Environment*. – 2014. – Vol. 97. – P. 19–27.
33. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: a systematic evaluation in three European countries / F. Capozzi, S. Giordano, J.R. Aboal, P. Adao, R. Bargagli, T. Boquete, A. Di Palma, C. Real, R. Reski, V. Spagnuolo, K. Steinbauer, M. Tretiach, Z. Varela, H. Zechmeister, J.A. Fernandez // *Environmental Pollution*. – 2016. – Vol. 214. – P. 362–373.
34. Implication of vitality, seasonality and specific leaf area on PAH uptake in moss and lichen transplanted in bags / F. Capozzi, M.C. Sorrentino, A. Di Palma, F. Mele, C. Arena, P. Adamo, V. Spagnuolo, S. Giordano // *Ecological Indicators*. – 2020. – Vol. 108. – Article 105727.
35. The effect of “moss bag” shape in the air monitoring of metal(oid)s in semi-arid sites: influence of wind speed and moss porosity / V. Morales-Casa, J. Rebolledo, R. Ginocchio, C. Saéz-Navarrete // *Atmospheric Pollution Research*. – 2019. – Vol. 10. – Iss. 6. – P. 1921–1930.
36. Arsenic accumulation and speciation in epilithic moss collected from an abandoned mercury mining area, south-western China / L. Liang, Z. Xu, G. Qiu, P. Wu, R. Zhang // *Atmospheric Pollution Research*. – 2019. – Vol. 10. – Iss. 2. – P. 455–461.
37. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste / S. Bortnikova, N. Yurkevich, A. Devyatova, O. Saeva, O. Shuvaeva, A. Makas, M. Troshkov, N. Abrosimova, M. Kirillov, T. Korneeva, T. Kremleva, N. Fefilov, G. Shigabaeva // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 647. – P. 411–419.
38. Element transfer by a vapor-gas stream from sulfide mine tailings: from field and laboratory evidence to thermodynamic modeling / S.B. Bortnikova, N.V. Yurkevich, O.L. Gaskova, A.Y. Devyatova, I.I. Novikova, S.S. Volynkin, A.V. Mytsik, V.A. Podolinnaya // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – Iss. 12. – P. 14927–14942.
39. Evidence of volatility metals and metalloids at environmental conditions / S.B. Bortnikova, N.V. Yurkevich, S.S. Volynkin, A.S. Kozlov, A.L. Makas // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 19. – Article No. 9942.
40. Наследственные болезни обмена веществ. / Р.Н. Мустафин, Е.В. Сайфуллина, С.Ш. Мурзабаева, А.К. Марданова, Э.К. Хуснутдинова. – Уфа: ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2020. – 89 с.
41. Сальникова Е.В. Потребность человека в цинке и его источники (обзор) // *Микроэлементы в медицине*. – 2016. – Т. 17. – № 4. – С. 11–15.
42. Агаджанян Н.А., Велданова М.В., Скальный А.В. Экологический портрет человека и роль микроэлементов. – М.: КМК, 2001. – 236 с.
43. Сульдина Т.И. Содержание тяжелых металлов в продуктах питания и их влияние на организм // *Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы*. – 2016. – № 1. – С. 136–140.
44. Elucidations of molecular mechanism and mechanistic effects of environmental toxicants in neurological disorders / H. Goel, K. Goyal, A.K. Pandey, M. Benjamin, F. Khan, P. Pandey, S. Mittan, D. Iqbal, M. Alsaweed, W. Alturaiki, Y. Madkhali, M.A. Kamal, P. Tanwar, T.K. Upadhyay // *CNS and Neurological Disorders Drug Targets*. – 2023. – Vol. 22. – Iss. 1. – P. 84–97.
45. Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage / S.B. Bortnikova, N.V. Yurkevich, O.L. Gaskova, S.S. Volynkin, A.V. Edelev, S.P. Grakhova, O.I. Kalnaya, A.Sh. Khusainova, M.P. Gora, A.A. Khvachchevskaya, O.P. Saeva V.A. Podolinnaya, V.V. Kurovskaya // *Chemical Geology*. – 2021. – Vol. 586. – Iss. 30. – Article No. 120623.
46. Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях ETS № 123. – Страсбург, 18 марта 1986 г. – 13 с. URL: <https://rm.coe.int/168007a6a8> (дата обращения: 15.06.2023).
47. Приказ Минздрава России от 01.04.2016 N 199н «Об утверждении Правил надлежащей лабораторной практики» (Зарегистрировано в Минюсте России 15.08.2016 N 43232). – М., 2016. – 7 с.

48. Bortnikova S., Bessonova E., Gaskova O. Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia // *Applied Geochemistry*. – 2012. – Vol. 27. – Iss. 11. – P. 2238–2250.
49. Andrade V.M., Aschner M., Marreilha dos Santos A.P. Neurotoxicity of Metal Mixtures // *Advances in Neurobiology*. – 2017. – Vol. 18. – P. 227–265.

Информация об авторах

Светлана Борисовна Бортникова, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующая лабораторией геоэлектрoхимии, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3. BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2395-7406>

Алексей Владимирович Мыщик, кандидат медицинских наук, Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Роспотребнадзора, Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7. telemedcare@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-1201-4699>

Алексей Викторович Еделев, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3. EdelevAV@ipgg.sbras.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0045-999X>

Альбина Анатольевна Хвощевская, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. unpс_voda@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Поступила в редакцию: 21.06.2023

Поступила после рецензирования: 28.09.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Helser J., Vassilieva E., Cappuyns V. Environmental and human health risk assessment of sulfidic mine waste: Bioaccessibility, leaching and mineralogy. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 424, article 127313.
2. Rahman Z., Singh V.P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr) (VI), mercury (Hg), and lead (Pb) on the total environment: an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, pp. 1–21.
3. Covre W. P., Ramos S.J., Da Silveira Pereira W.V., De Souza E.S., Martins G.C., Teixeira O.M.M., Do Amarante C.B., Dias Y.N., Fernandes A.R. Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 421, article 126688.
4. Park J.H., Hodge V., Gerstenberger S., Stave K. Mobilization of toxic elements from an abandoned manganese mine in the arid metropolitan Las Vegas (NV, USA) area. *Applied Sciences*, 2014, vol. 4, pp. 240–254.
5. Wang C., Liao F., Wang G., Qu S., Mao H., Bai Y. Hydrogeochemical evolution induced by long-term mining activities in a multi-aquifer system in the mining area. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 854, article 158806.
6. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16.
7. Yurkevich N., Osipova P., Tsibizov L., Tsibizova E., Fadeeva I., Volynkin S., Tulisova K., Kuleshova T. Current state of the gold mining waste from the ores of the Ursk deposit (Western Siberia, Russia). *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, article 10610.
8. Yadrenkina E.N., Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Korneeva T.V., Shevko A.Y., Olenchenko V.V., Khvachevskaya A.A. Transfer and distribution of metals and metalloids in carassius auratus organs from tailings pond and their influence on morphological characteristics. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, article 12446.
9. Remoundou K., Koundouri P. Environmental effects on public health: an economic perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2009, vol. 8, Iss. 6, pp. 2160–2178.
10. Pearce D. Economic valuation and health damage from air pollution in the developing world. *Energy Policy*, 1996, vol. 7, Iss. 24, pp. 627–630.
11. Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Rumyantsev G.I. Methodological problems of assessment of threats of environmental factors to human health. *Gigiena i sanitariya*, 2003, no. 6, pp. 5–9. (In Russ.)
12. Gregurek D., Melcher E., Pavlov V.A., Reimann C., Stumpf E.F. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia. *Mineralogy and Petrology*, 1999, vol. 4, Iss. 65, pp. 87–111.
13. Li G., Lei Y., Ge J., Wu S. The empirical relationship between mining industry development and environmental pollution in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, vol. 14, Iss. 3, article 254.
14. Opekunova M.G., Opekunov A.Ju., Papyan E.E., Somov V.V. Phytoindicational properties of the vegetation in landscape transformation studies on Sibay Chalcopyrite deposits (southern Urals). *Contemporary Problems of Ecology*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 301–314.
15. Timofeev I.V., Kosheleva N.E. Geochemical disturbance of soil cover in the nonferrous mining centers of the Selenga River basin. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, vol. 39, pp. 803–819.
16. Tost M., Bayer B., Hitch M., Lutter S., Moser P., Feiel S. Metal mining's environmental pressures: a review and updated estimates on CO₂ emissions, water use, and land requirements. *Sustainability*, 2018, vol. 10, Iss. 8, article 2881.

17. Carlon C. *Derivation methods of soil screening values in Europe: A review and evaluation of national procedures towards harmonization*. EUR 22805-EN. Ispra, Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission, 2007. 306 p.
18. Weissenstein K., Sinkala T. Soil pollution with heavy metals in mine environments, impact areas of mine dumps particularly of gold- and copper mining industries in Southern Africa. *Arid Ecosystems*, 2011, vol. 1, pp. 53–58.
19. Cruzado-Tafur E., Torró L., Bierla K., Szpunar J., Tauler E. Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, vol. 106, article 103107.
20. Zhang J., Li H., Zhou Y., Dou L., Cai L., Mo L., You J. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: a case study in the Pearl River Delta, south China. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 235, pp. 710–719.
21. Callaghan T.V., Johansson M., Brown R.D., Groisman P.Ya., Labba N., Radionov V., Bradley R.S., Blangy S., Bulygina O.N., Christensen T.R., Colman J.E., Essery R.L.H., Forbes B.C., Forchhammer M.C., Golubev V.N., Honrath R.E., Juday G.P., Meshcherskaya A.V., Phoenix G.K., Pomeroy J., Rautio A., Robinson D.A., Schmidt N.M., Serreze M.C., Shevchenko V.P., Shiklomanov A.I., Shmakin A.B., Sköld P., Sturm M., Woo M., Wood E.F. Multiple effects of changes in Arctic snow cover. *Ambio*, 2011, vol. 40, pp. 32–45.
22. Shevchenko V.P., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasypov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., Steinnes E., Lukina N.V., Nikonov V.V., Aamlid D., Røyset O.A. Gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, vol. 60, Iss. 1, pp. 71–88.
23. Shevchenko V.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N., Krickov I.V., Manasypov R.M., Pokrovsky O.S., Politova N.V. Study of insoluble particles in the snow cover of Western Siberia on the profile from Tomsk to the Ob estuary. *Atmospheric and ocean optics*, 2015, vol. 28, no. 6, pp. 499–504. (In Russ.)
24. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Osipova N.A., Lyapina E.E., Litay V.V., Metreveli G., Kim J. Mercury pollution in snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk Regions, Russia). *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 132–147.
25. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A. Assessment of atmospheric air pollution in urbanized areas of the Tomsk region according to the study of snow cover. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2014, no. 5, pp. 408–417. (In Russ.)
26. Bargagli R. *Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1998. 344 p.
27. Salminen R., Chekushin V., Tenhola M., Bogatyrev I., Glavatskikh S.P., Fedotova E., Gregorauskiene V., Kashulina G., Niskavaara H., Polischuk A., Rissanen K., Selenok L., Tomilina O., Zhdanova L. *Geochemical Atlas of the Eastern Barents Region*. Amsterdam, Elsevier B.V., 2004. 548 p.
28. Pirintso A.S., Loppi S. Biomonitoring atmospheric pollution the challenge of times in environmental policy on air quality. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 151, pp. 269–271.
29. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press/Taylor & Francis Group, 2010. 548 p.
30. Reimann C., Fabian K., Flem B., Andersson M., Filzmoser P., Englmaier P. Geosphere-biosphere circulation of chemical elements in soil and plant systems from a 100 km transect from southern central Norway. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 639, pp. 129–145.
31. Vasconcelos M.T.S.D., Tavares H.M.F. Atmospheric metal pollution (Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn) in Oporto city derived from results for low-volume aerosol samplers and for the moss *Sphagnum auriculatum* bioindicator. *Science of the Total Environment*, 1998, vol. 212, pp. 11–20.
32. Salo H., Makinen J. Magnetic biomonitoring by moss bags for industry-derived air pollution in SW Finland. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 97, pp. 19–27.
33. Capozzi F., Giordano S., Aboal J.R., Adao P., Bargagli R., Boquete T., Di Palma A., Real C., Reski R., Spagnuolo V., Steinbauer K., Tretiaich M., Varela Z., Zechmeister H., Fernandez J.A. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: a systematic evaluation in three European countries. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 214, pp. 362–373.
34. Capozzi F., Sorrentino M.C., Di Palma A., Mele F., Arena C., Adamo P., Spagnuolo V., Giordano S. Implication of vitality, seasonality and specific leaf area on PAH uptake in moss and lichen transplanted in bags. *Ecological Indicators*, 2020, vol. 108, article 105727.
35. Morales-Casa V., Rebolledo J., Ginocchio R., Saéz-Navarrete C. The effect of “moss bag” shape in the air monitoring of metal(oid)s in semi-arid sites: influence of wind speed and moss porosity. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, vol. 10, Iss. 6, pp. 1921–1930.
36. Liang L., Xu Z., Qiu G., Wu P., Zhang R. Arsenic accumulation and speciation in epilithic moss collected from an abandoned mercury mining area, south-western China. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, vol. 10, Iss. 2, pp. 455–461.
37. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva T., Fefilov N., Shigabaeva G. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 647, pp. 411–419.
38. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Devyatova A.Y., Novikova I.I., Volynkin S.S., Mytsik A.V., Podolinnaya V.A. Element transfer by a vapor-gas stream from sulfide mine tailings: from field and laboratory evidence to thermodynamic modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, Iss. 12, pp. 14927–14942.
39. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Volynkin S.S., Kozlov A.S., Makas A.L. Evidence of volatility metals and metalloids at environmental conditions. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, Iss. 19, article 9942.
40. Mustafin R.N., Saifullina E.V., Murzabaeva S.Sh., Mardanova A.K., Khusnutdinova E.K. *Hereditary metabolic diseases*. Ufa, FSBEI HE BSMU Minzdrav Russia Publ., 2020. 89 p. (In Russ.)
41. Salnikova E.V. Human need for zinc and its sources (review). *Microelements in medicine*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 11–15. (In Russ.)

42. Agadzhanian N.A., Veldanova M.V., Skalny A.V. *Ecological portrait of a person and the role of trace elements*. Moscow, KMK Publ., 2001. 236 p. (In Russ.)
43. Suldina T.I. The content of heavy metals in food and their effect on the organism. *Rational nutrition, nutritional supplements and biostimulants*, 2016, no. 1, pp. 136–140. (In Russ.)
44. Goel H., Goyal K., Pandey A.K., Benjamin M., Khan F., Pandey P., Mittan S., Iqbal D., Alsaweed M., Alturaiki W., Madkhali Y., Kamal M.A., Tanwar P., Upadhyay T.K. Elucidations of molecular mechanism and mechanistic effects of environmental toxicants in neurological disorders. *CNS and Neurological Disorders Drug Targets*, 2023, vol. 22, Iss. 1, pp. 84–97.
45. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kalnaya O.I., Khusainova A.Sh., Gora M.P., Khvachevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V. Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage. *Chemical Geology*, 2021, vol. 586, Iss. 30, article 120623.
46. *European convention for the protection of vertebrate animals used for experimental or other scientific purposes*. Strasburg, March, 18, 1986. 13 p. Available at: <https://rm.coe.int/168007a6a8> (accessed: 15 June 2023).
47. *Order of April 1, 2016 N 199n "On approval of the rules of good laboratory practice"*. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation Publ., 2016. 7 p. (In Russ.)
48. Bortnikova S., Bessonova E., Gaskova O. Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, Iss. 11, pp. 2238–2250.
49. Andrade V.M., Aschner M., Marreilha Dos Santos A.P. Neurotoxicity of metal mixtures. *Advances in Neurobiology*, 2017, vol. 18, pp. 227–265.

Information about the authors

Svetlana B. Bortnikova, Dr. Sc., Head of the Department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2395-7406>

Alexey V. Mytsik, Cand. Sc., Leading Researcher, Research Institute of Hygiene Rospotrebnadzor, 7, Parkhomenko street, Novosibirsk, 630108, Russian Federation. telemedcare@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-1201-4699>

Aleksey V. Edelev, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. EdelevAV@ipgg.sbras.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0045-999X>

Albina A. Khvachevskaya, Cand. Sc., Head of the Department, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. unpc_voda@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Received: 21.06.2023

Revised: 28.09.2023

Accepted: 22.03.2024

УДК 534.647

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583

Шифр специальности ВАК: 2.5.2

Твердотельный демпфер для снижения виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций

А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков[✉], Д.А. Дерусова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]dvermakov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Механические колебания – распространенный и технически важный процесс, который оказывает негативное акустическое влияние на здоровье человека и является вредным производственным фактором. В приборах и устройствах наличие вибрации обусловлено возбуждающими воздействиями различной физической природы: механической, электромагнитной, аэродинамической. Причиной их возникновения являются дефекты деталей и узлов, технический принцип устройства шарикоподшипников, а также совпадение рабочей частоты устройства с собственной частотой элементов конструкции. Поскольку полностью устранить виброактивность электромеханического устройства технически невозможно, актуальной задачей научных исследований становится в том числе и разработка демпфирующего устройства с определением его эффективности снижать виброактивность электромеханического устройства, тем самым минимизируя воздействия сопутствующих вредных производственных факторов на человека. Для решения этой задачи разработана 3Д-модель конструкции твердотельного демпфера на основе пеноалюминия по которой изготовлены два макета, различающиеся глубиной цилиндрических протоков, используемых для установки винтов. Из результатов измерения вибрационных характеристик следует, что материал, используемый в качестве гасителя колебаний, обладает демпфирующими свойствами и может быть применен для снижения уровня виброактивности электромеханического устройства. Сравнение результатов испытаний макетов твердотельного демпфера показало, что использование макета № 1 позволяет снизить амплитуду вибрации до 3 раз по сравнению с макетом № 2. **Объектом** исследования является фрагмент демпфирующего элемента – гасителя колебаний твердотельного демпфера – на основе пеноалюминия. **Цель:** разработать конструкцию макета твердотельного демпфера на основе пеноалюминия и определить эффективность его применения для снижения уровня виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций. **Методы:** современные подходы вибродиагностики, вычислительной математики и средств измерений. **Результаты** исследования показали возможность создания твердотельного демпфера на основе пеноалюминия для решения задач снижения амплитуды вибрации в диапазоне рабочих частот вращения ротора электромеханического устройства по сравнению с соответствующими вибрационными характеристиками без элементов демпфирования.

Ключевые слова: нефтегазовые станции, пеноалюминий, виброактивность, вибродиагностический комплекс, твердотельный демпфер

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 23-79-10107 (лабораторное оборудование, результаты исследования демпфирующих свойств материалов).

Для цитирования: Твердотельный демпфер для снижения виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций / А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков, Д.А. Дерусова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 108–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583

UDC 534.647

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583

Solid-state damper for reducing vibration activity of an electromechanical device of a life support system of oil and gas stations

A.N. Gavrilin, V.S. Dmitriev, D.V. Ermakov✉, D.A. Derusova

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉dvermakov@tpu.ru

Abstract. Relevance. Mechanical vibrations are a common and technically important process that has a negative acoustic effect on human health and in some cases is a harmful production factor. In devices, the presence of vibration is caused by exciting influences of various physical nature: mechanical, electromagnetic, aerodynamic. The reason for their occurrence are defects in parts and assemblies, the technical principle of the ball bearing device, as well as the coincidence of the operating frequency of the device with natural frequency of the structural elements. Since it is technically impossible to completely eliminate the vibration activity of an electromechanical device, the actual topic of scientific research is the technical task of developing a damping device with determining its effectiveness to reduce the vibration activity of an electromechanical device, thereby minimizing the effects of concomitant harmful production factors on humans. To study this problem, a 3D model of the construction of a solid-state damper based on aluminum foam has been developed, according to which two layouts are made with different depths of cylindrical ducts used to install screws. The results of measuring vibration characteristics showed that the material used as a vibration dampener has damping properties and can be used to reduce the level of vibration activity of an electromechanical device. A comparison of the test results of the solid-state damper layouts showed that using layout No. 1 reduces the vibration amplitude up to three times compared with layout No. 2. **Object.** Fragment of the damping element of the vibration damper of a solid-state damper based on aluminum foam. **Aim.** To develop a design for a solid-state damper based on aluminum foam and determine the effectiveness of its use to reduce the level of vibration activity of an electromechanical device of the life support system of oil and gas stations. **Methods.** Modern approaches of vibration diagnostics, computational mathematics and measuring instruments. **Results.** There is a possibility of creating a solid-state damper based on aluminum foam to solve the problems of reducing the amplitude of vibration in the operating frequency range of the rotor of an electromechanical device compared with the corresponding vibration characteristics without damping elements.

Keywords: oil and gas stations, aluminum foam, vibration activity, vibration diagnostic complex, solid-state damper

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation grant number 23-79-10107 (laboratory equipment, the results of experimental and theoretical studying on damping characteristics of materials).

For citation: Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A. Solid-state damper for reducing vibration activity of the electromechanical device of the life support system of oil and gas stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 108–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583

Введение

Снижение уровня вибраций производственных объектов и сопутствующих шумов является важной научно-технической проблемой в области технической акустики. Шум механизмов возникает вследствие упругих колебаний как механизмов в целом, так и отдельных элементов конструкции электромеханических устройств (ЭМУ), их деталей.

ЭМУ – это большой класс исполнительных механизмов, в которых двигателем является электрический двигатель любого типа с установленным на валу функциональным блоком, определяющим назначение ЭМУ.

Это очень широкая группа устройств от примитивного точила или дрели до прецизионных ЭМУ,

устанавливаемых на космических аппаратах. Общим функциональным признаком этой группы является наличие электродвигателя, определяющего динамические качества всего ЭМУ.

Системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций, такие как вентиляция и кондиционирование, содержат ЭМУ – вентиляторы, работа которых сопровождается производственным шумом. Это оказывает негативное влияние на износ оборудования, уменьшение срока его эксплуатации, а также на здоровье операторов, находящихся в помещении, так как наличие производственного шума является вредным производственным фактором.

Полностью устранить виброактивность ЭМУ технически не представляется возможным. Ее

можно только уменьшить до приемлемого уровня работы значений.

Для снижения виброактивности механизма применяются как теоретические способы расчета конструкции ЭМУ, так и практические решения по гашению вибраций. Оценка виброактивности ЭМУ [1–6] показывает, что источники колебаний имеют различную физическую природу: дисбалансы, электромагнитные явления в электродвигателе, погрешность шарикоподшипников, технологические погрешности деталей конструкции, качество сборки.

Как следует из результатов исследований [2, 3], вибрация ЭМУ имеет плотный спектр частот от десятков до десятков тысяч герц, содержащий множество гармоник вибрационных возмущений. В связи с этим следует использовать основные способы снижения виброактивности ЭМУ – вентиляторы:

1. Уменьшить виброактивность самой конструкции ЭМУ на этапе разработки:
 - увеличить число лопаток рабочего колеса, поскольку с уменьшением числа лопаток увеличивается беспорядочность движения отдельных струй, вытекающих из межлопаточных промежутков, влияющих на общий уровень шума, создаваемого рабочим колесом.
 - изменить диапазон собственных частот элементов конструкции и частот возмущающих воздействий;
 - снизить дисбаланс роторной системы;
 - заменить подшипники качения подшипниками скольжения.
2. Ограничить угловую скорость электродвигателя ЭМУ, но данный способ не является универсальным и не дает возможности использовать весь технический потенциал устройства.
3. Разработать виброзащиту, установив ее непосредственно в источник виброактивности.

Увеличение жесткости и веса конструкции в ряде случаев практически не влияет на аэродинамическое шумообразование. Поэтому очень часто увеличение жесткости и веса колеса и кожуха приводят к излишнему увеличению веса конструкции ЭМУ и ее стоимости, не влияя на акустические свойства.

Одним из новых направлений в области разработки демпферов является использование пенометаллов ввиду сочетания их низкой плотности, высокой удельной жесткости и прочности, а также способности поглощения энергии [7–10]. В частности, в работе [7] было показано, что пенометаллы могут превосходно поглощать и рассеивать энергию за счет деформации, что делает их идеальными материалами для поглощения ударов и ослабления вибрации. Причем оптимизация температуры, рабочего диапазона и амплитуды прикладываемых

напряжений позволяет регулировать демпфирующие способности пенометаллов. Также важно отметить, что демпфирующие свойства пористых металлов проявляются при пластических деформациях и уплотнении, а возникающие при этом напряжения меньше предела текучести «сплошных» металлов [11–24]. Особенность гистерезиса пористых материалов [11–24] заключается в наличии области, ограничивающей амплитуду силового возмущающего воздействия, передаваемого на пористый материал. Наличие пор в алюминии также вызывает существенное затухание вибраций из-за преобразования резонансных мод колеблющегося объекта. Отмеченные преимущества пенометаллов объясняют целесообразность их использования при создании демпферов для снижения виброактивности ЭМУ в различных практических применениях.

Настоящая работа посвящена созданию конструкции макета твердотельного демпфера на основе пеноалюминия и исследованию эффективности его применения для снижения уровня виброактивности ЭМУ системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций. С этой целью проведены экспериментальные исследования на примере анализа вибраций, возникающих в процессе функционирования ЭМУ.

Конструкция твердотельного демпфера

Основу конструкции разработанного твердотельного демпфера составляет пористый пеноалюминий размерами 100×100×40 мм (рис. 1). Пеноалюминий получен из сплава Д16 ГОСТ4784-97, что и определяет его основные механические свойства. Анализ технологии изготовления исследуемого образца пеноалюминия выходит за рамки данной исследовательской работы, но представлен в работах [17–19].

С использованием демпфирующего элемента, приведенного на рис. 1, спроектирован макет твердотельного демпфера (рис. 2, а).



Рис. 1. Фрагмент твердотельного демпфера на основе пеноалюминия

Fig. 1. Fragment of a solid-state damper based on aluminum foam

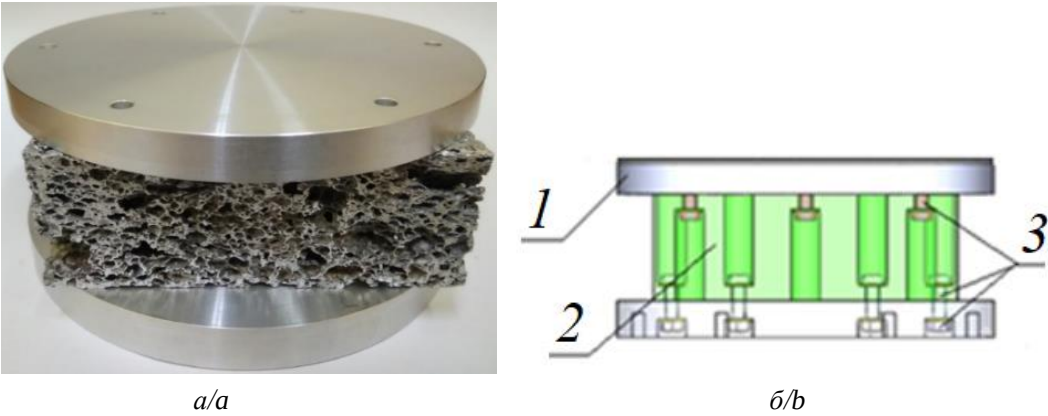
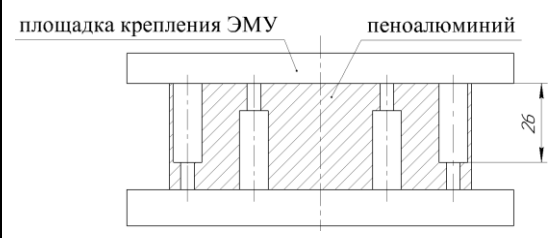
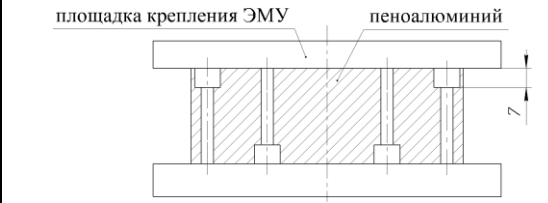


Рис. 2. Макет твердотельного демпфера (а), 3D-модель макета (б), 1 – основание крепления ЭМУ, 2 – фрагмент гасителя колебаний на основе пеноалюминия, 3 – крепежные детали макета
Fig. 2. Layout of a solid-state damper (a), 3D model of the layout (b), 1 – Electromechanical device mounting base, 2 – fragment of an oscillator based on aluminum foam, 3 – fasteners of the layout

Таблица 1. Конструкции макетов твердотельного демпфера на основе пеноалюминия
Table 1. Designs of solid-state damper layouts based on aluminum foam

№ макета Layout number	Конструкция макета Layout design	Глубина цилиндрических проточек, мм Depth of the cylindrical ducts, mm
1		26
2		7

Макет твердотельного демпфера (рис. 2, а) содержит основание для крепления ЭМУ и основание для крепления твердотельного демпфера с установленным на нем ЭМУ на виброизмерительном стенде (рис. 2, б). Крепление пеноалюминия к посадочной площадке ЭМУ и основанию осуществляется таким образом, чтобы обеспечить кинематическую развязку между техническим устройством и плоскостью его установки через фрагмент демпфирующего элемента гасителя колебаний твердотельного демпфера. Причем в исследовательских целях применены два фрагмента с разной глубиной проточек для установки винтов 7 и 26 мм (табл. 1) для обеспечения различного сопротивления деформации материала пеноалюминия под воздействием вибрационных сил.

Оборудование для проведения исследования эффективности применения твердотельного демпфера

Определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) твердотельного демпфера проводилось в соответствии с ГОСТ 30630.1.1-99. Макеты подверглись воздействию синусоидальной вибрации с плавной разверткой частоты в диапазоне частот 10–2000 Гц при значении амплитуды ускорения в контрольной точке 4,9 м/с² и скорости изменения частоты 1 окт./мин.

Общая схема испытаний состоит из вибрационной системы (вибратора), усилителя мощности, системы управления виброиспытаниями, а также виброизмерительных преобразователей (ВИП).

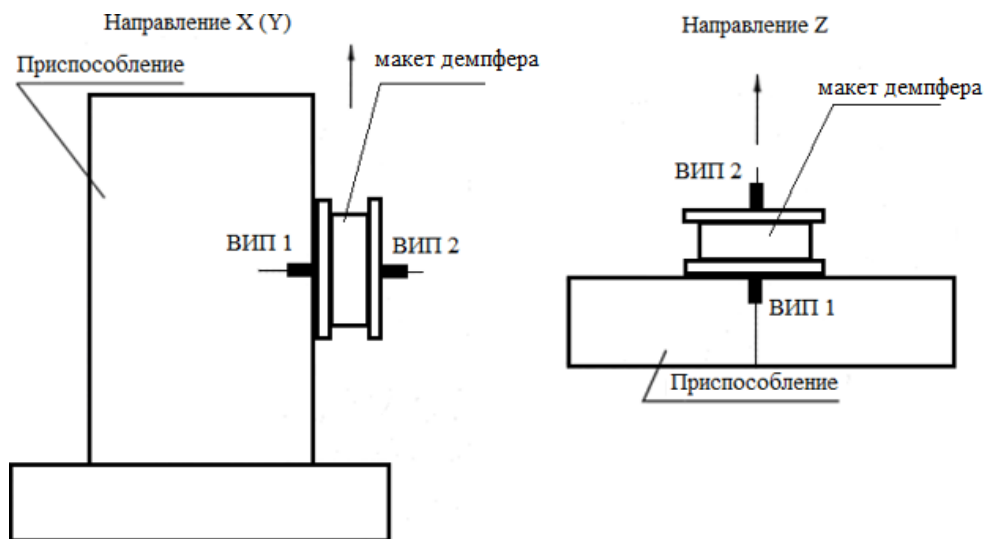


Рис. 3. Схема расположения ВИП на макетах твердотельного демпфера
Fig. 3. Layout of the vibration measuring transducer on the layouts of the solid-state damper

Для закрепления макетов на платформе вибрационной системы использовались специально разработанные приспособления (рис. 3), не имеющие собственных резонансных частот в диапазоне до 2000 Гц. Данное требование, предъявляемое к приспособлениям механических испытаний, позволяет исключить их собственные частоты колебаний из диапазона рабочих частот твердотельного демпфера.

Определение АЧХ макетов осуществлялось поочередно в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлениях (X, Y, Z) декартовой системы координат. При этом направления X и Y находятся в плоскости исследуемого объекта. ВИП устанавливались на макеты демпферов (рис. 3), рабочие оси которых ориентируются по направлению генерируемых стендом колебаний.

После определения АЧХ проведены виброиспытания твердотельных демпферов с помощью портативного вибродиагностического комплекса К-5101

[2], предназначенного для исследования и сбора данных, в том числе с отметками времени, при измерении общего уровня вибрации, базового и расширенного анализа динамических характеристик элементов конструкции. Блок-схема стенда и вибродиагностического комплекса для измерения вибрационных характеристик ЭМУ, а также методика определения эффективности снижения виброактивности подробно описаны в работе [2].

Результаты эффективности применения твердотельного демпфера

Проведенные исследования по определению АЧХ твердотельного демпфера на вибрационном стенде позволили сопоставить резонансные частоты разработанных макетов демпферов с диапазоном рабочих частот вращения ротора ЭМУ. Результаты исследований приведены на рис. 4, 5 и в табл. 2.

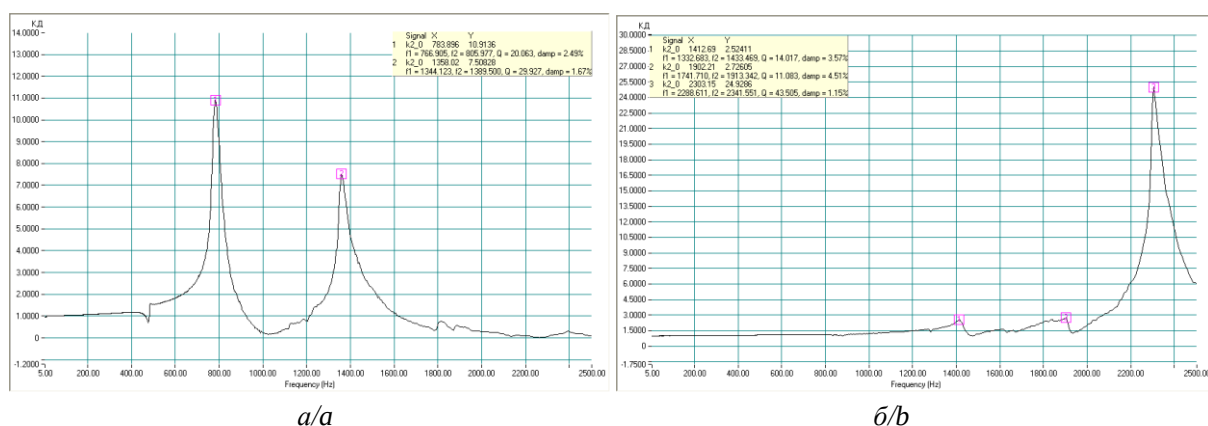


Рис. 4. АЧХ макета № 1 (а) по направлению X(Y), (б) по направлению Z
Fig. 4. Frequency response of layout no. 1 (a) in the X(Y) direction, (b) in the Z direction

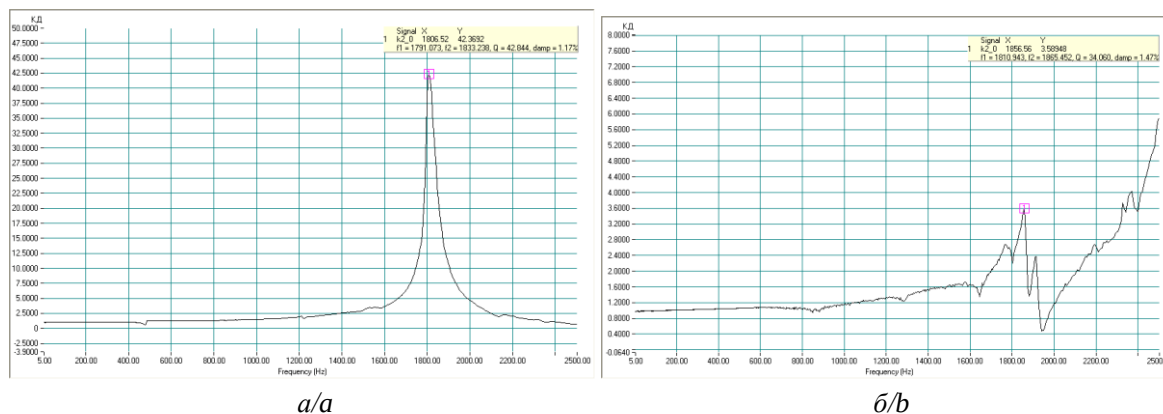


Рис. 5. АЧХ макета № 2 (а) по направлению X(Y), (б) по направлению Z
Fig. 5. Frequency response of layout no. 2 (a) in the X(Y) direction, (b) in the Z direction

Таблица 2. АЧХ макетов твердотельных демпферов в диапазоне частот от 5 Гц до 2,5 кГц

Table 2. Frequency response of models of solid-state dampers in the frequency range from 5 Hz to 2.5 kHz

Наименование параметра Parameter name	№ макета Layout number	
	1	2
Направление X (Y) / X (Y) direction		
Первая резонансная частота, Гц The first resonant frequency, Hz	783,9	1806,5
Коэффициент передачи/Transmission ratio	20,06	42,84
Коэффициент демпфирования Damping coefficient, %	2,49	1,17
Направление Z/Z direction		
Первая резонансная частота, Гц The first resonant frequency, Hz	1412,7	1856,6
Коэффициент передачи/Transmission ratio	14,02	34,06
Коэффициент демпфирования Damping coefficient, %	3,57	1,47

Из полученных вибрационных характеристик твердотельных демпферов (табл. 2) следует, что резонансные частоты разработанных макетов не входят в рабочий диапазон вращения ротора ЭМУ (1,666÷50 Гц). Причем макет № 1 имеет значительно меньшую жесткость, чем макет № 2. Это можно объяснить различием глубины проточек под винты

и, как следствие, разным сопротивлением деформации фрагмента гасителя колебаний под приложенной нагрузкой.

Сравнительный анализ по коэффициенту эффективности [2] показал наибольшую эффективность снижения виброактивности ЭМУ для макета № 1, глубина проточек которого значительно меньше, чем в макете № 2 (табл. 3) (рис. 6, 7). Это можно объяснить тем, что помимо механизмов, связанных с внутренним изменением микро- или макроструктур твердотельных материалов, а именно дислокаций, локальных дефектов кристаллических решеток, релаксаций напряжений на границах зерен, фазовых процессов и т. д., которые влияют на эффективность рассеивания энергии, необходимо учитывать и жесткость пеноалюминия. Конструкция макета № 2 имеет больше механизмов рассеивания энергии, чем макет № 1, под воздействием внешней нагрузки, поскольку глубина проточек меньше, но он также обладает и большим потенциалом сопротивления деформации, что подтвердили исследования вибрационных характеристик (табл. 2), а значит, и диссипация энергии в нем меньше.

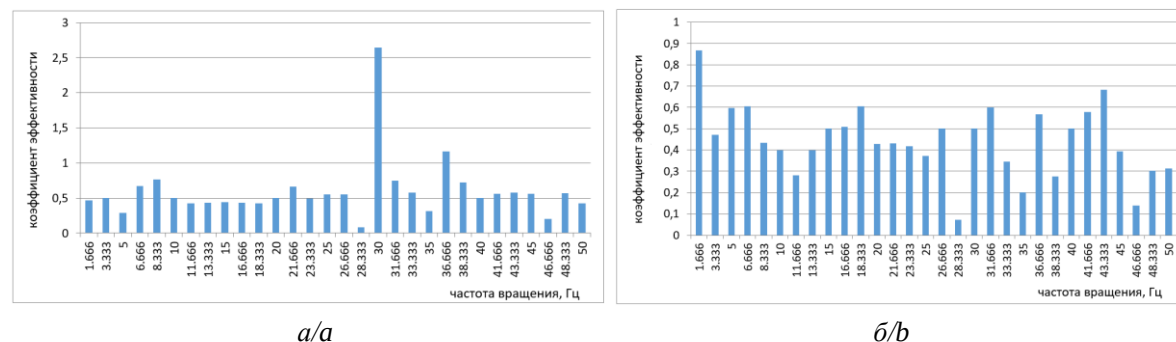


Рис. 6. Изменение коэффициента эффективности от частоты вращения ротора ЭМУ с макетом № 1 (а) по направлению X(Y), (б) по направлению Z
Fig. 6. Change in the efficiency coefficient depending on the rotation frequency of the EMU rotor with layout no. 1 (a) in the X (Y) direction, (b) in the Z direction

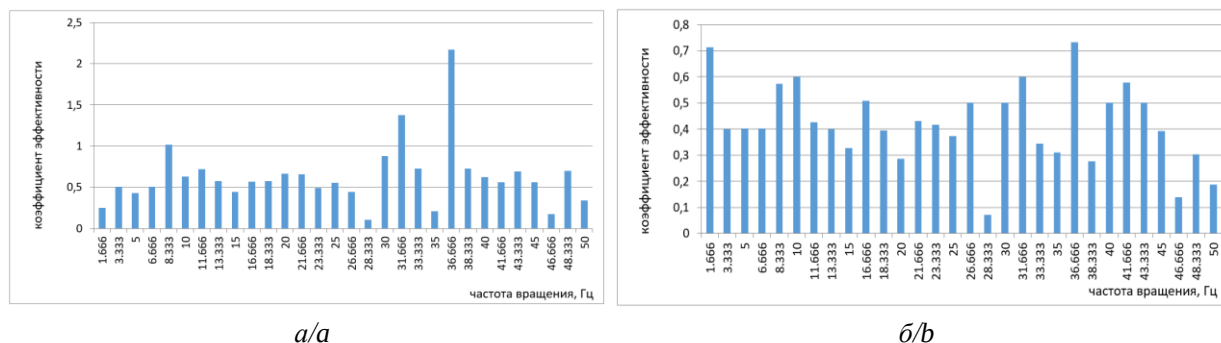


Рис. 7. Изменение коэффициента эффективности от частоты вращения ротора ЭМУ с макетом № 2 (а) по направлению X (Y), (б) по направлению Z

Fig. 7. Change in the efficiency coefficient depending on the rotation frequency of the EMU rotor with layout no. 2 (a) in the X (Y) direction, (b) in the Z direction

Таблица 3. Результаты испытаний макетов твердотельного демпфера

Table 3. Test results of solid-state damper layouts

Вариант применения макета Variants of the layout application	Амплитуда виброперемещения по осям (мм) Amplitude of vibration displacement along the axes (mm)		Диапазон частот вращения ротора, Гц (об/мин) Rotor speed range, Hz (rpm)
	X(Y)	Z	
ЭМУ без демпфера EMU without damper	0,479	0,287	1,66÷50 (100÷3000)
Макет № 1 Layout no. 1	0,121	0,119	
Макет № 2 Layout no. 2	0,224	0,145	

Результаты измерения вибрационных характеристик ЭМУ (табл. 3) с разработанными макетами твердотельного демпфера на основе пеноалюминия показали, что используемый материал обладает неплохими демпфирующими свойствами и может быть применен для снижения уровня вибрации с учетом его сопротивления деформационной нагрузке при—виброактивности ЭМУ. Амплитудные значения виброперемещения при использовании макета твердотельного демпфера снизились в 3 раза.

Заключение

Из приведенных в статье результатов исследований следует, что виброактивность ЭМУ представляет собой плотный спектр частот от десятков до десятков тысяч герц, который содержит множество гармоник вибрационных возмущений, возникающих в конструкции электрического двигателя, являющегося генератором указанных вибраций. С целью решения технических проблем снижения виброактивности ЭМУ системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций предложена конструкция твердотельного демпфера, а проведенные исследования двух макетов показали, что материал пеноалюминий обладает демпфирующими свойствами для эффективной минимизации виброактивности ЭМУ.

Эффективность демпфирования вибраций за счет применения твердотельных демпферов оценивалась с использованием лабораторного электродинамического вибростенда ET-139 и вибродиагностического комплекса К-5101. Результаты проведения виброиспытаний показали, что использование предложенного технического решения на основе разработанной конструкции твердотельного демпфера позволяет минимизировать виброактивность ЭМУ до 3 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices // Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control / Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. – 2023. – Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8
2. Снижение виброактивности вентилятора системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций / А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков, Д.А. Дерусова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 128–137. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293
3. Минимизация виброактивности малощумных вентиляторов / В.С. Дмитриев, Л.Я. Миньков, Т.Г. Костюченко, В.В. Дердященко, Д.С. Панфилов, Д.В. Ермаков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 76. – С. 101–117. DOI: 10.17223/19988621/76/8
4. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, С.В. Цурпал, Т.А. Глазырина // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 174–177.
5. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов,

- И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9 – С. 154–167. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365
6. Журавлев В.Ф., Бальмонт В.Б. Механика шарикоподшипников гироскопов / под ред. Д.М. Климова. – М.: Машиностроение, 1985. – 271 с.
 7. Madhu H.C., Satish V. Kailas exploring damping behavior of novel polymer-derived aluminum alloy foam // Materials Letters. – 2024. – Vol. 357. – Article number 135758.
 8. Local deformation on damping performance of integral-forming aluminum foam sandwich / N. Liu, Z. Zhang, X. Xia, T. Xu, Z. Wang, J. Ding, Y. Liu // Materials Letters. – 2022. – Vol. 323. – Article number 132545.
 9. Frequency dependence of the internal friction of the AMg6 alloy / A.K. Tomilin, F.Y. Kuznetsov, I.S. Konovalenko, V.A. Krasnovеikin, I.Y. Smolin // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Vol. 50 (3). – P. 243–250. DOI: 10.3103/S1052618821030158
 10. Tomilin A.K., Ziyakaev G.R. Natural vibrations of a spacecraft's solar array wing // Cosmic Research. – 2021. – Vol. 59 (1). – P. 53–58. DOI: 10.1134/S0010952521010081
 11. Lightweight open cell aluminum foam for superior mechanical and electromagnetic interference shielding properties / R. Kumar, H. Jain, S. Sriram, A. Chaudhary, A. Khare, V.A.N. Ch, D.P. Mondal // Mater. Chem. Phys. – 2020. – Vol. 40. – 122274. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122274
 12. Research on dynamic accumulation effect and constitutive model of aluminum foams under dynamic impact / H. Gao, C. Xiong, J. Yin, H. Deng // Int. Metalcas. – 2019. – Vol. 13. – P. 146–157. DOI: 10.1007/s40962-018-0245-0
 13. Improving the surface of titanium alloys with wave cutters / G. Korovin, A. Gavrilin, S. Petrushin, G. Odnokopylov, D. Ermakov // Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control // Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. – 2023. – Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_7
 14. Stress-strain states and energy absorption in open-cell aluminium foams under hypervelocity impact / S. Zhao, X. Zhang, R. Wang, R. Li // Composite Structures. – 2023. – Vol. 313. – 116885. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116885
 15. Energy-absorption analyses of grooved Al-sheet stacks using modified split Hopkinson pressure bar / S. Kim, H. Kang, M. Kim, K. Kim, J. Lee, H. Cheong, H. Kim, S. Lee // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Vol. 886. – 145721. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145721
 16. Analyses of impact energy-absorbing performance of open- and closed-cell Al foams using modified split Hopkinson pressure bar / S. Kim, D. Kim, M. Kim, K. Kim, J. Lee, J. Lee, H. Cheong, H. Kim, S. Lee // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 965. – 171349. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171349
 17. Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М. Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства // Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 7. – С. 53–58.
 18. Aluminum foam production, properties, and applications: a review / N. Patel, G. Mittal, M. Agrawal et al. // Inter Metalcast. – 2023. DOI: 10.1007/s40962-023-01174-8
 19. Biaxial characterization of open-cell aluminum foams from macro to micro responses / S. Huluka, A. Abdul-Latif, R. Baleh, A. Larbi, I. Deiab, K. Khanafer // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Vol. 868. – 144588. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144588
 20. Thorntor P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams // Met. Trans. A. – 1975. – Vol. 6A. – № 6. – P. 1253–1263.
 21. Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy // J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 22 (2). – P. 225–228.
 22. Об основных особенностях механических и амортизирующих свойств высокопористых алюминиевых сплавов / В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XVI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. – Ярополец, 15–19 февраля 2010. – Чебоксары: ГУП «ИПК «Чувашия», 2010. – Т. 2. – С. 218–225.
 23. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, А.Н. Сообщииков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 1 (74). – С. 58–66.
 24. Селиванов В.В. О механических свойствах высокопористых алюминиевых сплавов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – Ч. 4. – С. 1760–1762.

Информация об авторах

Алексей Николаевич Гаврилин, доктор технических наук, профессор отделения машиностроения Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gawral@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>.

Виктор Степанович Дмитриев, доктор технических наук, профессор, экс-профессор Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dmitriev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9108-9845>.

Дмитрий Владимирович Ермаков, кандидат технических наук, ассистент отделения машиностроения Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dvermakov@tpu.ru

Дарья Александровна Дерусова, доктор технических наук, старший научный сотрудник Центра промышленной томографии Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследова-

тельского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. red@tpu.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-2142-856X>.

Поступила в редакцию: 15.02.2024

Поступила после рецензирования: 29.02.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices. *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. 2023, vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8
2. Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A. Reduction of a fan vibration activity in a life support system of oil and gas stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 128–137. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293
3. Dmitriev V.S., Minkov L.Ya., Kostyuchenko T.G., Derdiyashchenko V.V., Panfilov D.S., Ermakov D.V. Minimization of vibration activity of low-noise fans. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2022, no. 76, pp. 101–117. (In Russ.) DOI: 10.17223/19988621/76/8
4. Glazyrin A.S., Timoshkin V.V., Tsurpal S.V., Glazyrina T.A. Identification of parameters of a mechanical system by the example of a vibrating electromechanical energy converter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 174–177. (In Russ.)
5. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Optimization of the order of a reduced dynamic model of an unloaded oil-submersible cable based on the approximation of the amplitude-frequency response. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365
6. Zhuravlev V.F., Balmont V.B. *Mechanics of ball bearings of gyroscopes*. Ed. by D.M. Klimov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 271 p. (In Russ.)
7. Madhu H.C., Kailas S.V. Exploring damping behavior of novel polymer-derived aluminum alloy foam. *Materials Letters*, 2024, vol. 357, article number 135758.
8. Liu N., Zhang Z., Xia X., Xu T., Wang Z., Ding J., Liu Y. Local deformation on damping performance of integral-forming aluminum foam sandwich. *Materials Letters*, 2022, vol. 323, article number 132545.
9. Tomilin A.K., Kuznetsov F.Y., Konovalenko I.S., Krasnoveikin V.A., Smolin I.Y. Frequency dependence of the internal friction of the AMg6 alloy. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2021, vol. 50 (3), pp. 243–250. DOI: 10.3103/S1052618821030158
10. Tomilin A.K., Ziyakaev G.R. Natural vibrations of a spacecraft's solar array wing. *Cosmic Research*, 2021, vol. 59 (1), pp. 53–58. DOI: 10.1134/S0010952521010081
11. Kumar R., Jain H., Sriram S., Chaudhary A., Khare A., Ch V.A.N., Mondal D.P. Lightweight open cell aluminum foam for superior mechanical and electromagnetic interference shielding properties. *Mater. Chem. Phys.*, 2020, vol. 40, 122274. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122274
12. Gao H., Xiong C., Yin J., Deng H. Research on dynamic accumulation effect and constitutive model of aluminum foams under dynamic impact. *Int. Metalcast*, 2019, vol. 13, pp. 146–157. DOI: 10.1007/s40962-018-0245-0
13. Korovin G., Gavrilin A., Petrushin S., Odnokopylov G., Ermakov D. Improving the surface of titanium alloys with wave cutters. *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. Springer, Cham, 2023. Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_7
14. Zhao S., Zhang X., Wang R., Li R. Stress-strain states and energy absorption in open-cell aluminium foams under hypervelocity impact. *Composite Structures*, 2023, vol. 313, 116885. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116885
15. Kim S., Kang H., Kim M., Kim K., Lee J., Cheong H., Kim H., Lee S. Energy-absorption analyses of grooved Al-sheet stacks using modified split Hopkinson pressure bar. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, vol. 886, 145721. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145721
16. Kim S., Kim D., Kim M., Kim K., Lee J., Lee J., Cheong H., Kim H., Lee S. Analyses of impact energy-absorbing performance of open- and closed-cell Al foams using modified split Hopkinson pressure bar. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 965, 171349. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171349
17. Butarovich D.O., Smirnov A.A., Ryabov D.M., Aluminum foam as an energy-absorbing material and its mechanical properties. *Proceedings of higher educational institutions. Ser. Mechanical engineering*, 2011, no. 7, pp. 53–58. (In Russ.)
18. Patel N., Mittal G., Agrawal M. Aluminum foam production, properties, and applications: a review. *Inter Metalcast*, 2023. DOI: 10.1007/s40962-023-01174-8
19. Huluka S., Abdul-Latif A., Baleh R., Larbi A., Deiab I., Khanafer K. Biaxial characterization of open-cell aluminum foams from macro to micro responses. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, vol. 868, 144588. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144588
20. Thorntor P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams. *Met. Trans. A*, 1975, vol. 6A, no. 6, pp. 1253–1263.
21. Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy. *J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci.*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 225–228.
22. Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V. On the main features of the mechanical and shock-absorbing properties of highly porous aluminum alloys. *Proceedings of the XVI International Symposium named after A.G. Gorshkov*.

Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media. Yaropolets, February 15–19, 2010. Cheboksary, SUE IPK Chuvashia Publ., 2010. Vol. 2, pp. 218–225 (In Russ.)

23. Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshikov A.N. Mechanical and shock-absorbing properties of highly porous cellular aluminum. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mashinostroenie*, 2009, no. 1 (74), pp. 58–66. (In Russ.)
24. Selivanov V.V. On the mechanical properties of highly porous aluminum alloys. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*, 2011, no. 4, P. 4, pp. 1760–1762. (In Russ.)

Information about the authors

Alexey N. Gavrilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gawral@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>.

Viktor S. Dmitriev, Dr. Sc., ex-Professor National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dmitriev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9108-9845>.

Dmitry V. Ermakov, Cand. Sc., Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dvermakov@tpu.ru

Daria A. Derusova, Dr. Sc., Senior Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. red@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2142-856X>.

Received: 15.02.2024

Revised: 29.02.2024

Accepted: 22.03.2024

УДК 621.039.542.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536
Шифр специальности ВАК: 05.14.04

Характеристики горения капель водомазутной эмульсии со специализированными присадками

Н.Е. Шлегель[✉], А.Ю. Клименко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]nik.shlegel.ask@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Применение мазутного топлива на энергетических установках характеризуется повышенными значениями недожога и антропогенных выбросов. Одним из способов снизить антропогенные выбросы является использование водомазутных эмульсий. Также для сокращения антропогенных выбросов и улучшения характеристик горения топлива используются дополнительные специализированные присадки. **Цель.** Исследование направлено на определение оптимальной присадки к мазутному топливу для снижения антропогенных выбросов и времен задержки зажигания. **Методы.** В состав водомазутного топлива добавляли присадки: ИОН-М, Роснефть Р503В3, Роснефть Р502В1 (относительная массовая концентрация 0,5 %). Определены физико-химические свойства мазута М-100, а также элементарный состав CHNSO. Установлены реологические характеристики составов водомазутных топлив. С помощью высокоскоростной съемки определены времена задержки зажигания капель. С помощью газоанализатора определены антропогенные выбросы. **Результаты и выводы.** Результаты проведенных исследований показали, что присадка на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (ИОН М) снижает времена задержки зажигания на 20–60 % при варьировании температуры газовой среды в диапазоне от 700 до 900 °С. Добавление присадки на основе жирных растительных кислот (Р502В3) снижало времена задержки зажигания на 7–10 % при изменении температуры в диапазоне от 700 до 900 °С относительно водомазутного топлива. Установлено, что использование присадки Р502В1 в водомазутном топливе позволило снизить времена задержки зажигания на 15–50 %. Определено, что в присутствии катализаторов горения вода связывается с тяжелыми углеводородами и тем самым выход летучих веществ происходит быстрее, т. е. подведенная теплота не тратится на прогрев воды в капли, а равномерно воздействует на весь объем топлива. Результаты исследований антропогенных выбросов показали, что использование присадок при сжигании водомазутного топлива снижает концентрации CO, CO₂, NO, SO₂ на 8, 6, 10 и 13 %, соответственно, по сравнению с мазутом.

Ключевые слова: водомазутное топливо, присадки, характеристики горения, антропогенные газовые выбросы, газоанализатор

Благодарность: Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 22-79-00197 (<https://rscf.ru/project/22-79-00197/>).

Для цитирования: Шлегель Н.Е., Клименко А.Ю. Характеристики горения капель водомазутной эмульсии со специализированными присадками // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 118–130. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536

UDC 621.039.542.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536

Combustion characteristics of water-oil emulsion droplets with special additives

N.E. Schlegel[✉], A.Yu. Klimenko

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]nik.shlegel.ask@gmail.com

Abstract. Relevance. Fuel oil application in power plants is characterized by increased values of underburning and anthropogenic emissions. One way to reduce anthropogenic emissions is the use of oil-water emulsions. Also, additional specialized additives are used to reduce anthropogenic emissions and improve fuel combustion characteristics. **Aim.** To determine the optimal fuel oil additive to reduce anthropogenic emissions and ignition delay times. **Methods.** The following additives: ION-M, Rosneft R503V3, Rosneft R502V1 (relative mass concentration 0.5%) were added to the water-oil fuel. The physico-chemical properties of fuel oil M-100, as well as the elemental composition of CHNSO, were determined. The rheological characteristics of water-oil fuel compositions were established. Using high-speed photography, the droplet ignition delay times were determined. Using the gas analyzer, it was possible to prevent anthropogenic emissions. **Results and conclusions.** The results of the study showed that the additive based on a special combination of positively and negatively charged ions (ION M) reduces ignition delay times by 20–60%, when the gas temperature varies in the range from 700 to 900°C. The addition of the additive based on fatty vegetable acids (P502B3) reduced the ignition delay times by 7–10%, when the temperature changed in the range from 700 to 900°C relative to water-oil fuel. It was found that when using the P502B1 additive in water-oil fuel, it was possible to reduce the ignition delay times by 15–50%. It was determined that in the presence of combustion catalysts, water binds with heavy hydrocarbons and thus the release of volatile substances occurs faster, i. e. the supplied heat is not wasted on heating water into droplets, but evenly affects the entire volume of fuel. The results of the study of anthropogenic emissions showed that the use of additives when burning water-oil fuel reduces the concentrations of CO, CO₂, NO, SO₂ by 8, 6, 10 and 13%, respectively, compared to fuel oil.

Keywords: fuel oil/water emulsion, additives, combustion characteristics, anthropogenic gas emissions; gas analyzer

Acknowledgements: The research was supported by the RSF project (project no. 23-27-00039).

For citation: Schlegel N.E., Klimenko A.Yu. Combustion characteristics of water-oil emulsion droplets with special additives. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 118–130. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536

Введение

Топочный мазут М40 и М100 является основным жидким топливом в энергетических установках, поскольку обладает высокой теплотворной способностью и низкой стоимостью [1]. Как правило, при сжигании мазутного топлива образуются различные загрязняющие вещества, такие как остаточные золы, сажа и серная кислота [2–4]. Следует отметить, что мазутное топливо характеризуется высоким содержанием серы (до 4,5 %). При этом в мазуте содержатся различные концентрации микроэлементов тяжелых металлов, таких как ванадий, никель, свинец, медь. Такая концентрация приводит к высокотемпературной коррозии [2–4]. В настоящее время существует высокая потребность в мазутном топливе [5, 6]: для морских перевозок, выработки тепловой и электрической энергии. Для эффективного сжигания мазутного топлива энергетическая установка обязана иметь соответствующее оборудование, входящее в состав мазутного хозяйства. Вследствие чего предусматривается возможность приема, хранения, подготовки мазута к сжиганию и подаче к форсункам котлов [7]. Для улучшения эффективности сжигания мазута и снижения антропогенных выбросов используются дополнительные специализированные присадки [8, 9]. Они способствуют снижению затрат на производство тепловой энергии. Использование присадок в топливе имеет ряд преимуществ, а именно повышение КПД котла и предотвращение образования эвтектических смесей при сжигании топлива. Также введение присадок позволяет снизить температуру застывания (до 15–20 °С) и повы-

сить текучесть мазута [10]. Производство эффективных присадок включает смешивание, перемешивание ингредиентов в течение 5–10 минут и фильтрацию. Как правило, в присадку добавляют катализаторы горения, износостойкие, дымоудаляющие и энергосберегающие компоненты, а также регуляторы октанового числа [11, 12].

На данный момент существует несколько типов специализированных присадок, которые позволяют повысить КПД энергетической установки [13]. Например, катализаторы горения улучшают процесс горения, тем самым способствуют более равномерному распределению тяжело воспламеняющихся частей в капле мазута, что приводит к снижению недожога топлива [14]. Для уменьшения температуры застывания мазута используют депрессорные присадки. Как правило, они состоят из растворов сополимеров. Такие присадки применяются для уменьшения затрат на подогрев мазута, а также вследствие снижения вязкости топлива позволяют уменьшить расходы на перекачку его по трубопроводам [15].

Одним из основных направлений с целью повышения КПД котельной установки является сжигание мазута в виде водомазутной эмульсии [16]. Как правило, одной из главных проблем сжигания мазута является его обводнение. Известно, что после получения с нефтеперерабатывающего завода мазут содержит до 1,5 % воды [17]. При транспортировке содержание воды в мазуте повышается до 3–5 %. Но особенно сильное обводнение мазута происходит при его сливе и разогреве, так как наиболее распространенным способом его разогре-

ва является разогрев острым паром [7]. При этом содержание воды в мазуте может достигать 30 %. Стоит отметить, что распределение воды в мазуте имеет линзовый характер из-за малой разницы плотностей рассматриваемых фаз. При сжигании таких смесей образуются огромные количества газовых выбросов в окружающую среду, что приводит к понижению эффективности сжигания топлива, а также появляется опасность пульсаций и срыва факела [18]. Определено [19], что вязкость и высшая теплота сгорания водомазутных эмульсий зависят от содержания воды. Оптимальное содержание воды в водомазутных эмульсиях определяется на основе численных значений вязкости. Как правило, содержание воды в водомазутной эмульсии составляет около 10–15 % [19]. В [20, 21] установлено, что оптимальная концентрация воды в водомазутном топливе составляет около 10 %. При этой концентрации усиливается эффективность распыливания топлива, тем самым повышаются характеристики горения, а также снижается содержание антропогенных выбросов (оксиды азота, углерода и др). Еще одним важным параметром при сжигании эмульсии является содержание водорода в газовой фазе, т. е. отношение Н/С. При этом основным определяющим параметром является состав смеси, который характеризуется коэффициентом избытка воздуха и количеством воды в топливе. Тем самым гомогенизация воздушно-мазутной смеси на основе воды позволяет снизить концентрации сажи в дымовых газах [22].

Существует несколько способов получения водомазутной эмульсии. Одним из способов является интенсивная гидромеханическая обработка в кавитационном поле. При этом способе происходят глубокие структурные изменения в молекулярном составе углеводородов, вследствие чего повышается степень дисперсности асфальтенов, карбенов, карбоидов до размеров 2–3 мкм. В работе [23] показано исследование процесса приготовления топливных эмульсий в конических измельчителях. Проведенное исследование показывает возможность использования конических измельчителей в качестве эмульгаторов. При этом оптимальное содержание воды составляет 5–10 %. Но эти методы требуют дополнительных затрат на оборудование. Показано [10], что при добавлении присадки СПИХ-9777 расход топлива снижается на 3–5 %.

Присадки для водомазутного топлива используются в котельных агрегатах для улучшения работы горелки, снижения потребления топлива, повышения эффективности горения и сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду. Выбор оптимальных присадок для улучшения характеристик горения считается сложной задачей, так как на сегодняшний день есть множество при-

садок, которые могут влиять на реологические характеристики топлива и на его характеристики горения. Цель настоящего исследования – определение оптимальной присадки для сжигания водомазутного топлива в высокотемпературных условиях.

Методика проведения экспериментов, стенд и материалы

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда для проведения исследований по определению характеристик горения и концентраций антропогенных выбросов. Для проведения экспериментальных исследований приготавливалась водомазутная эмульсия (6) при помощи магнитного перемешивающего устройства (5) в течение 10–15 минут. В качестве лабораторной камеры сгорания использовалась муфельная печь R50/250/13 Nabertherm GmbH (максимальная рабочая температура 1100 °С, внутренний диаметр 30 мм). Эксперименты проводились при температуре газовой среды $T_g=700–900$ °С. Высокоскоростная видеокамера Phantom Miro C110 использовалась для визуализации и записи процессов горения (2). Эксперименты проведены при разрешении 1280×1024 пикселей, со скоростью съемки 915 кадров в секунду и межкадровой задержкой 1/10000. Высокоскоростная камера использовалась совместно с объективом Sigma 50mm f/1.4 EX DG OS HSM Macro Nikon F. Эксперименты по изучению характеристик горения проводились с одиночными каплями. Стоит отметить, что экспериментальная установка обеспечивала устойчивые условия горения без влияния потока окисляющей среды. С помощью электропривода (8) запускался координатный механизм (9), который помещал каплю (10) в муфельную печь (3). Координатный механизм (9) соединялся с компьютером (7), который отслеживал положение капли топлива. Для регистрации антропогенных выбросов в муфельную печь помещался щуп газоанализатора (4). Концентрации газов, выделяемых во время горения, измерялись с помощью газового анализатора Тест 1 (электрохимические – O₂ (0–25 %, ±0,2 %), SO₂ (0–1000 ppm, ±5 %), NO (0–2000 ppm, ±5 %), NO₂ (0–500 ppm, ±7 %), H₂S (0–500 ppm, ±5 %); оптические – CO₂ (0–30 %, ±2 %), CH₄ (0–50 %, ±5 %), CO (0–50 %, ±5 %), H₂ (0–30 %, ±5 %)). Газоанализ проводился при использовании небольшого количества топлива (0,2 мл). Исследуемый состав набирался с помощью шприца и помещался на держатель. После чего отправлялся в муфельную печь. Отбор проб дымовых газов производился с помощью насоса, встроенного в газоанализатор, и зонда, расположенного в камере сгорания. Для осушки дымовых газов и отделения крупных частиц сажи и летучей золы использовались фильтр и влагоотделитель. Расчет средних значений концентраций газов проведен по методике [24].

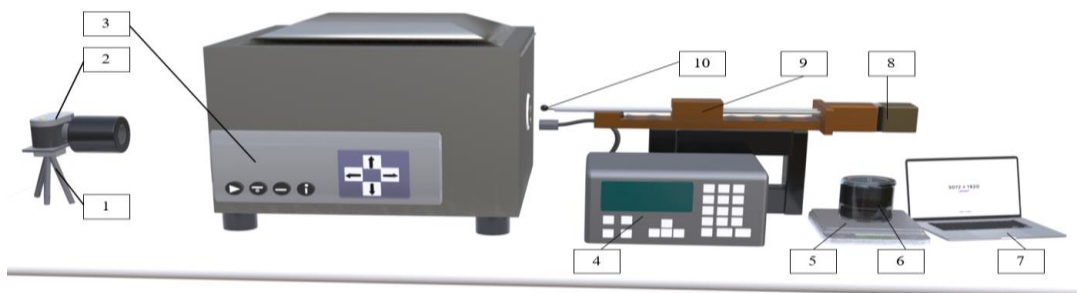


Рис. 1. Схема стенда: 1 – штатив для камеры; 2 – высокоскоростная видеокамера; 3 – муфельная печь; 4 – газоанализатор; 5 – перемешивающее устройство; 6 – исследуемый состав; 7 – компьютер; 8 – электропривод; 9 – координатный механизм; 10 – капля топлива

Fig. 1. Stand diagram: 1 – camera tripod; 2 – high-speed video camera; 3 – muffle furnace; 4 – gas analyzer; 5 – mixing device; 6 – composition under study; 7 – computer; 8 – electric drive; 9 – coordinate mechanism; 10 – drop of fuel

При помощи высокоскоростной съемки регистрировалось время задержки зажигания капли τ_d . Временем задержки зажигания считался интервал от начала нагрева образца топлива до появления пламени. Время задержки зажигания капли определялось как $\tau_d = \tau_b - \tau_n$. Где τ_b – время начала теплового воздействия, τ_n – момент времени, видимого начала горения. Время горения – это интервал от момента воспламенения газовой фазы до окончания горения. Капля водомазутной эмульсии с диаметром $2 \pm 0,3$ мм сжигалась в предварительно нагретой камере сгорания. Средний размер капель контролировался с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control. Функция измерения позволяла определять линейный размер объектов в кадре. С помощью этой функции измерялся диаметр капли суспензии в трех проекциях, после чего определялся средний диаметр капли.

Выполнена серия из 15 экспериментов. Далее по правилу трёх сигм отсеивались грубые ошибки. Также определялась средняя квадратичная погрешность $S_x = \sum_{i=1}^n \frac{(\tau_{da} - \tau_{di})^2}{n-1}$, где τ_{da} – среднее время задержки зажигания, n – количество измерений. После чего определялся доверительный интервал (абсолютная погрешность серии измерений) $\Delta\tau_d = S_x \cdot t(\alpha, n)$, где $t(\alpha, n)$ – коэффициент Стьюдента.

В результате экспериментальных исследований установлены зависимости концентраций газообразных веществ от времени при температуре муфельной печи около 800 °С. Для этого выполнена серия из пяти экспериментов для каждого состава. После чего рассчитывались средние содержания газов (1) в течение времени горения топлива:

$$X_i = (x_i + x_{i+1}) \cdot \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{2}. \quad (1)$$

После этого с помощью метода трапеции (2) определялось содержание газа как:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{\tau_n - \tau_k}, \quad (2)$$

где τ_n и τ_k – время начала и конца горения. Грубые ошибки в эксперименте отсеивались по правилу 3 сигм.

Для экспериментальных исследований использован мазут марки М100. Физико-химические характеристики мазута приведены в табл. 1. Состав мазута определялся с помощью элементного анализатора vario MICRO cube в соответствии с методами, описанными в статье [25]. Образец топлива сжигали в кислороде при температуре 1100 °С. Затем полученные газы хроматографически разделяли и анализировали с помощью детектора теплопроводности. Впоследствии были определены массовые доли С, Н, N и S и пересчитаны до сухого беззольного состояния. Свойства мазута определялись в соответствии с методами, указанными в [26]. Содержание золы и воды в маслах оценивалось с использованием стандартов ISO 3405-88. Температура вспышки и температура воспламенения мазута определялась с использованием стандартов ГОСТ 10585-99. В табл. 1, 2 представлены результаты исследования.

Таблица 1. Характеристики мазута

Table 1. Fuel oil characteristics

Характеристики исследуемого мазута М100 Characteristics of the studied fuel oil M100	Численные значения Numerical values
Массовая доля механических примесей, %, не более Mass fraction of mechanical impurities, %, no more	1
Зольность, %, не более/Ash content, %, no more	0,09
Массовая доля воды/Water mass fraction, %	1,51
Массовая доля серы/Sulfur mass fraction, %	2,6
Температура вспышки/Flash point, °C	122
Температура застывания/Pour point, °C	25

Таблица 2. Компонентный состав мазута

Table 2. Fuel oil component composition

Марка/Grade	W	A	S	C	N	O+H
М-100	1,51	0,09	2,6	85,2	9,9	0,7

Для измерения вязкости использовались: ротационный вискозиметр Brookfield DV3T (диапазон измерения от 1 до $6 \cdot 10^6$ мПа·с, точность ± 1 %, воспроизводимость $\pm 0,2$ %), шпиндель SC4-18 (диапазон измерения вязкости 50–100000 мПа·с) и термостат Термех КРИО-ВТ-12-01 (рабочая жидкость – Тосол, диапазон рабочих температур от -30 до $+200$ °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С) для поддержания температуры образца 20 и 80 °С, свойства которого измеряются за счет организации внешнего контура термостатирования для потребителя. Для измерения поверхностного натяжения использовался тензиометр Kruss K20 (диапазон измерения 1–999 мН·м, разрешение 0,01 мН·м, диапазон температур 1–130 °С). С помощью метода отрыва кольца вычисляется поверхностное натяжение по формуле: $\sigma = \frac{F_{max} - F_v}{L \cdot \cos(\theta)}$, где F_{max} – максимальное усилие, приложенное для отрыва кольца; F_v – сила гидростатического столба жидкости под кольцом; L – длина смачивания; θ – угол смачивания. Для определения поправок использовался метод Хаша–Масона. Также с помощью тензиометра определялась плотность топлив-

ной смеси. Измерение плотности основано на силе Архимеда. В табл. 3 представлены результаты реологических характеристик водомазутных топлив.

Катализаторы горения ИОН-М, Роснефть P503B3, Роснефть P502B1 – жидкие присадки для топочных и флотских мазутов. Они предназначены для повышения производительности в котлах и промышленных печах. Присадка ИОН-М имеет многокомпонентный состав, который оказывает влияние на структуру топлива и непосредственно на процесс горения. ИОН-М представляет собой особое сочетание положительных и отрицательных ионов. При этом электростатические поля оказывают структурирующее (упорядочивающее) воздействие на молекулы вещества среды (топлива), в которой он находится. Роснефть P503B3 и P502B1 – присадки, которые состоят из комплекса алифатических углеводородов, олеиновой и жирных кислот растительных масел.

В табл. 4 приведены реологические характеристики водомазутного топлива в зависимости от концентрации присадки ИОН М.

Таблица 3. Реологические характеристики исследуемых составов

Table 3. Rheological characteristics of the studied compositions

Наименование топливной смеси Fuel mixture	Температура состава Temperature of composition T_f , °С	Динамическая вязкость μ , мПа·с Dynamic viscosity μ , mPa·s	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м Surface tension σ , N/m
Мазут/Fuel oil	20/80	1795/130	1015/937	0,041/0,035
Мазут/Вода – 90/10 % Fuel oil/Water – 90/10%	20/80	1543/116	1021/933	0,044/0,033
Мазут/Вода/P503B3 – 89,5/10/0,5 % Fuel oil/Water/P503B3– 89,5/10/0,5%	20/80	1505/111	1020/934	0,042/0,030
Мазут/Вода/P502B1 – 89,5/10/0,5 % Fuel oil/Water/P502B1 – 89,5/10/0,5%	20/80	1515/112	1022/934	0,044/0,031
Мазут/Вода/ИОН М – 89,5/10/0,5 % Fuel oil/Water/ION M – 89,5/10/0,5%	20/80	1493/109	1016/933	0,041/0,029

Таблица 4. Реологические характеристики водомазутного топлива в зависимости от концентрации присадки ИОН М

Table 4. Rheological characteristics of water-oil fuel depending on the capacity of the ION M additive

Концентрация присадки ИОН М, % Additive ION M concentration, %	Температура состава Temperature composition T_f , °С	Динамическая вязкость μ , мПа·с Dynamic viscosity μ , mPa·s	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м Surface tension σ , N/m
0	20/80	1543/116	1021/933	0,044/0,033
0,25	20/80	1532/114	1020/933	0,044/0,032
0,5	20/80	1493/109	1016/933	0,041/0,029
1	20/80	1506/112	1018/933	0,042/0,030

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2, а показаны видеокадры горения капли водомазутного топлива при температуре газовой среды около 700 °С. Процесс горения можно разделить на несколько этапов. Сначала при нагреве капли выделялись летучие вещества и парафины, которые затем зажигались. В результате зажигания летучих веществ температура в зоне горения капли увеличивалась, вызывая ее диспергирование. Этот эффект обусловлен присутствием около 10 % воды в капле, которая испарялась и вызывала локальное повышение давления, что и приводило к микровзрывной фрагментации. В результате повышенного давления капля наполнялась пузырьками пара, тем самым образуя вторичные фрагменты. На следующем этапе эти вторичные фрагменты распространялись по всей камере сгорания и затем зажигались.

На рис. 2, б приведены кадры горения капли водомазутного топлива с добавлением присадки на основе жирных кислот растительных масел (P503B3, состав № 3). Установлено, что процесс зажигания протекал аналогично опытам с водомазутным топливом при добавлении около 10 % воды. Однако второй этап с зажиганием капель происходил иначе. При диспергировании капли водомазутного топлива с добавлением присадки на основе жирных кислот

растительных масел образованные вторичные фрагменты имели меньшие размеры относительно водомазутного топлива на 50 %. Такой эффект обусловлен тем, что при добавлении присадок к топливу вода, имеющаяся в его составе, связывается с углеводородами (снижается межфазное натяжение). Топливо становится более однородным.

На рис. 2, в представлены кадры горения капли водомазутного топлива при добавлении присадки на основе жирных кислот растительных масел (P503B1, состав № 4). Анализ кадров показал, что в течение второго этапа зажигания капли процесс диспергирования происходит практически мгновенно. Образуется большее количество вторичных фрагментов, в отличие от водомазутного топлива (рис. 2, а), на 20 %. На рис. 2, г представлены кадры горения капли водомазутного топлива при добавлении присадки на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (ИОН М, состав № 5). Анализ кадров показал, что процесс зажигания протекал аналогично топливной композиции № 4. Однако количество вторичных фрагментов возрастало на 15 %. При этом длительность процесса горения капли увеличивалась на 10 % относительно композиции № 4.

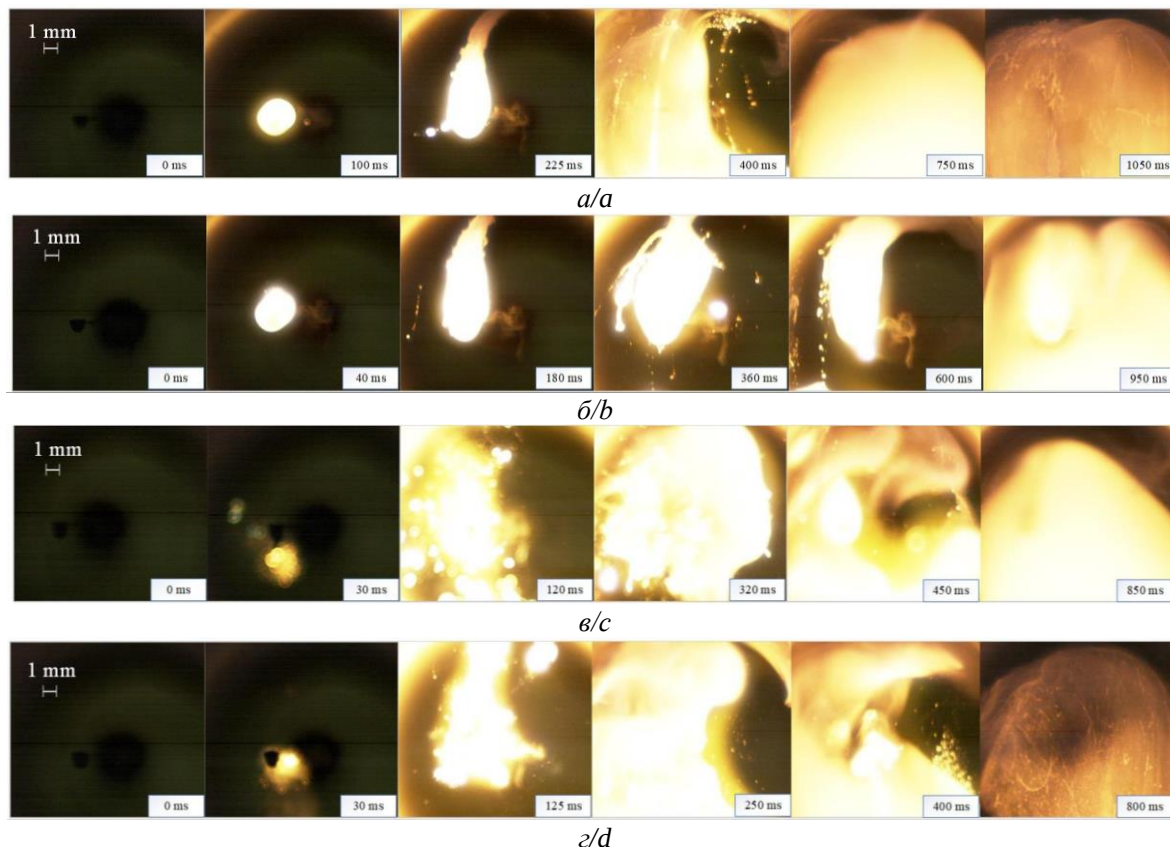


Рис. 2. Видеокадры горения капли при $T_g=700$ °С для составов: а) № 2; б) № 3; в) № 4; г) № 5
Fig. 2. Video frames of a drop burning at $T_g=700$ °C for compositions: а) no. 2; б) no. 3; в) no. 4; г) no. 5

Такой эффект связан с тем, что присадка на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов связывает углеводороды и снижает размер капли воды в эмульсии вследствие меньшего поверхностного натяжения. Такая присадка позволяет создавать ионные связи в эмульсии, что приводит к увеличению полноты сгорания топлива. Углеводороды при смешении с присадкой приобретают заданную ориентацию в объеме.

На рис. 3 показаны зависимости времени задержки зажигания капель водомазутных эмульсий от температуры газовой среды. Показано, что все исследуемые присадки способствуют снижению времен задержки зажигания капель. Такой эффект обусловлен тем, что присадки являются катализаторами горения. Поэтому такие присадки уменьшают пороговую энергию активации окисления топлива, что приводит к более полному выгоранию. Вследствие чего укрепляется связь в капле между водой и тяжелыми углеводородами, т. е. топливная смесь становится более однородной [27]. Благодаря такому воздействию катализаторы способствуют зажиганию топлива при более низких температурах окружающей среды. Анализ экспериментальных исследований показал, что минимальными временами задержки зажигания характеризуется состав № 5. Такой состав снижал времена задержки зажигания на 20–60 % во всем исследуемом температурном диапазоне газовой среды. Другие два состава (№ 3 и 4) позволили снизить времена задержки зажигания на 7–10 и 15–50 % соответственно.

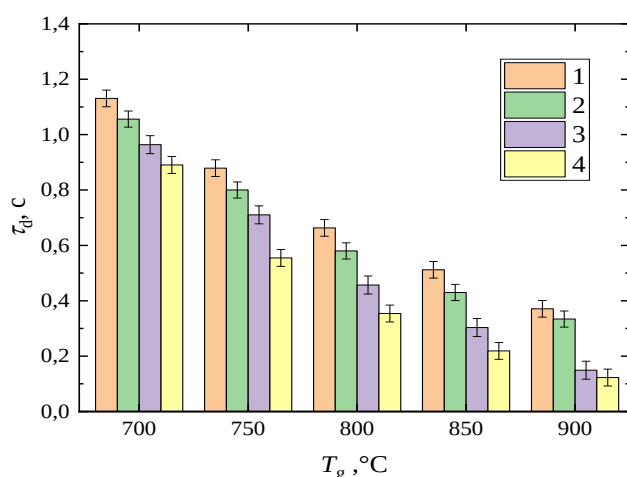


Рис. 3. Зависимости времен задержки зажигания капель исследуемых топлив от температуры газовой среды: 1 – № 2; 2 – № 3; 3 – № 4; 4 – № 5

Fig. 3. Dependence of the ignition delay time of droplets of the fuels under study on the temperature of the gas-air environment: 1 – no. 2; 2 – no. 3; 3 – no. 4; 4 – no. 5

Оптимальная работа котла может быть достигнута только в том случае, если при определении программы обработки присадками были приняты во внимание стадии предварительного сгорания и сжигания топлива. При этом присадки к мазутному топливу применяются в разных концентрациях – от 0,01 до 0,5 % [28]. Определение оптимальной концентрации присадки является ключевым аспектом повышения эффективности котла. Следующим этапом экспериментальных исследований являлось установление оптимальной концентрации присадки для снижения времени задержки зажигания. Экспериментальные исследования проведены с составом № 5, так как он позволил максимально снизить времена задержки зажигания капли. На рис. 4 представлено влияние концентрации присадки на времена задержки зажигания капли. В ходе экспериментальных исследований установлено, что минимальными временами задержки зажигания обладает водомазутное топливо с концентрацией присадки 0,5 %. При увеличении концентрации присадки до 1 % времена задержки зажигания капли возрастали на 50–60 % во всем исследуемом температурном диапазоне. Такой эффект связан тем, что при добавлении присадки изменяются реологические свойства топлива. В связи с этим вязкость, межфазное и поверхностное натяжения топливной композиции увеличиваются, что приводит к неустойчивости процесса горения [29].

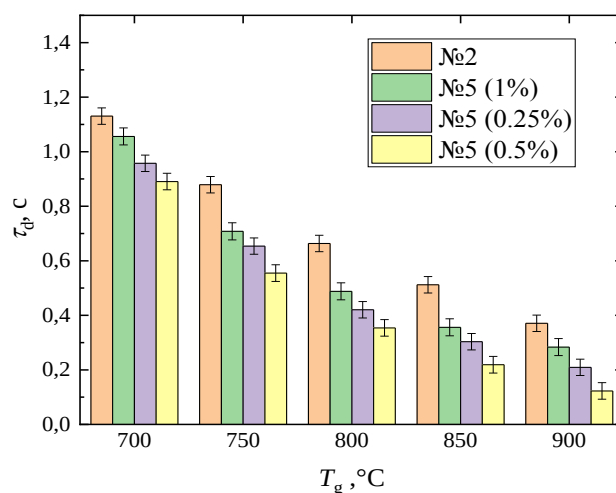


Рис. 4. Влияние концентрации присадки на времена задержки зажигания капли для состава № 5

Fig. 4. Influence of additive concentration on droplet ignition delay times for composition no. 5

На рис. 5, а представлены концентрации CO₂ при сжигании водомазутных эмульсий. Установлено, что снижение концентрации монооксида углерода осуществлялось при высоких температурах (900 °C) газовой среды.

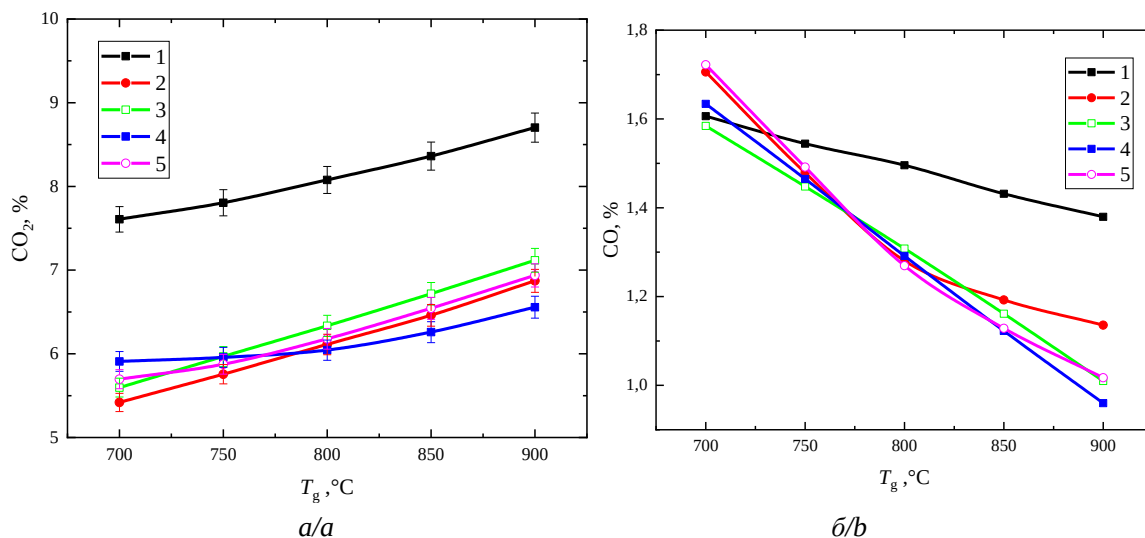


Рис. 5. Концентрации CO_2 (а) и CO (б) при варьировании температуры газовой среды: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5

Fig. 5. CO_2 (a) and CO (b) concentrations when varying the temperature of the gas-air environment: 1 – no. 1; 2 – no. 2; 3 – no. 3; 4 – no. 4; 5 – no. 5

При таких температурах сгорание водомазутных эмульсий происходит более полно, что приводит к снижению химического недожога. Тем самым высокие температуры способствуют превращению CO в CO_2 . Анализ проведенных исследований показал, что добавление воды в мазут приводило к уменьшению концентрации оксидов углерода. Такой эффект связан тем, что при нагреве водомазутного топлива вода в каплях испаряется первой, поскольку ее объем меньше объема мазута. Это наблюдается при температурах, намного превышающих температуру кипения воды ($\sim 270^\circ C$). При испарении воды образуются пузырьки. При их взрыве капли топлива разбиваются, образуя вторичные фрагменты. Стоит отметить, что сжигание такого топлива способствует снижению температуры в камере сгорания, а также снижению скорости окислительных реакций. Размер капель водомазутного топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания, также влияет на полноту сгорания. Добавление воды способствует дроблению капель топлива, что увеличивает площадь взаимодействия с воздухом [30].

Результаты экспериментальных исследований показали, что использование водомазутного топлива с присадками позволяет снизить выбросы CO_2 на 21,5, 24,98 и 22,86 % для составов № 3, 4, 5 по сравнению с мазутом во всем исследуемом диапазоне температур T_g . На рис. 5, б представлена зависимость содержания оксида углерода при сжигании исследуемых составов. Определено, что с ростом концентрации воды в капле уменьшается содержание CO . Установлено, что при добавлении присадок снижаются выбросы CO на 14,36, 14,16 и 17,61 % для составов № 3, 4, 5 по сравнению с мазутом во всем исследуемом диапазоне

температур газовой среды T_g . Показано, что при горении составов № 3, 4, 5 возрастает количество CO_2 на 3,6, 0,7 и 2,1 %, соответственно, относительно состава № 2 при $T_g=700-900^\circ C$. Такой эффект связан тем, что присадки являются катализаторами горения. Такие присадки усиливают реакции окисления в процессе горения и уменьшают количество крупных несгоревших капель. Также результаты показали, что при добавлении присадок снижаются выбросы CO на 4,2, 5,1 и 2,7 % для составов № 3, 4, 5 при $T_g=800^\circ C$ относительно № 2. Присадка действует как ускоритель окисления несгоревшего углерода (катализатор), тем самым увеличивается выгорание углерода в частицах.

На рис. 6, а представлены зависимости содержания NO от температуры газовой среды при горении водомазутных эмульсий при добавлении присадок. Установлено, что при добавлении присадок в водомазутное топливо выбросы NO уменьшаются на 6,7, 9,4 и 5,3 % для составов № 3, 4, 5 относительно № 1 ($T_g=700-900^\circ C$). На рис. 6, б приведена зависимость содержания SO_2 от температуры газовой среды для водомазутных эмульсий с добавлением специализированных добавок. Установлено, что при добавлении воды в мазут происходило снижение SO_2 . Это объясняется тем, что при горении водомазутного топлива выделяется водяной пар. Он реагирует с оксидами серы, образуя соли, которые выпадают в виде зольного осадка. Результаты проведенных исследований позволили установить, что при использовании составов № 3, 4, 5 уменьшаются выбросы SO_2 на 10,89, 12,13 и 13,43 %, соответственно, по сравнению с необогащенным мазутом.

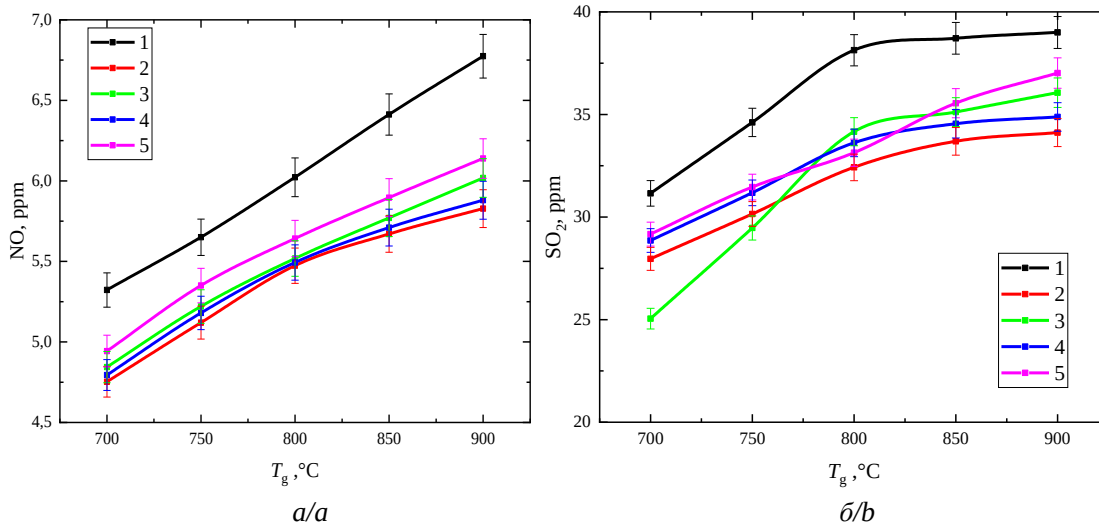


Рис. 6. Концентрации NO (а) и SO_2 (б) при варьировании температуры газовой среды: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5
Fig. 6. NO (a) and SO_2 (b) concentrations when varying the temperature of the gas-air environment: 1 – no. 1; 2 – no. 2; 3 – no. 3; 4 – no. 4; 5 – no. 5

Установлено, что использование композиций № 3, 4, 5 приводит к увеличению выбросов SO_2 на 0,6, 3,1 и 3,8 % при сопоставлении с составом № 2 во всем исследуемом температурном диапазоне. Также при добавлении присадок в водомазутное топливо выбросы NO увеличиваются на 1,9, 0,8 и 4,9 % для составов № 3, 4, 5 относительно № 2. Такой эффект связан с тем, что при добавлении присадок в топливо вода связывается с тяжелыми углеводородами. Таким образом выход летучих веществ происходит быстрее.

На рис. 7, а представлены зависимости содержания CO_2 от температуры газовой среды при горении водомазутных эмульсий при варьировании концентрации присадки ИОН М. Показано,

что при варьировании присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % возрастает количество CO_2 на 0,9, 2,1 и 0,1 %, соответственно, относительно состава № 2 при $T_g=700-900$ °C. На рис. 7, б представлена зависимость содержания оксида углерода при варьировании концентрации присадки ИОН М. Показано, что при горении водомазутной эмульсии при варьировании присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % снижаются выбросы CO на 0,5, 2,7 и 1,1 %, соответственно, относительно состава № 2 при $T_g=700-900$ °C. Таким образом увеличение концентрации присадки до 1 % к водомазутному топливу оказывает незначительное влияние на антропогенные выбросы.

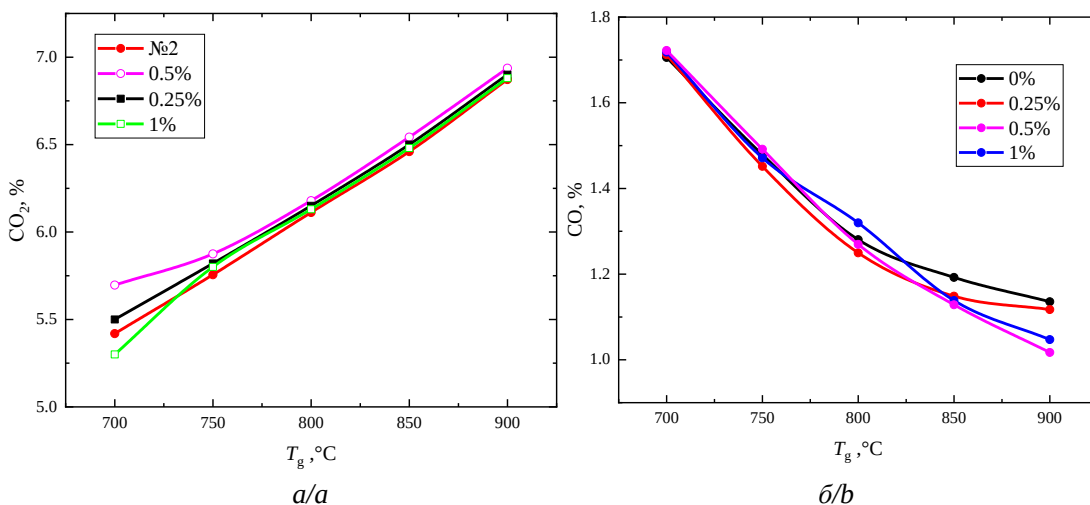


Рис. 7. Концентрации CO_2 (а) и CO (б) при варьировании концентрации присадки ИОН М
Fig. 7. CO_2 (a) and CO (b) concentrations when varying ION M additive concentration

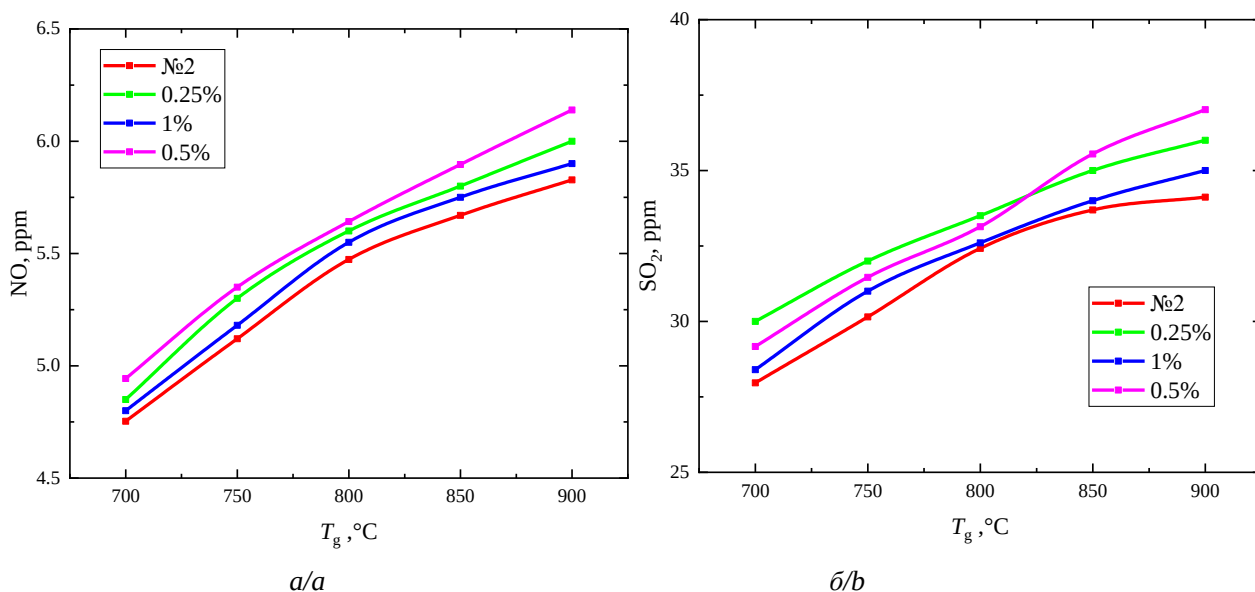


Рис. 8. Концентрации NO (а) и SO₂ (б) при варьировании концентрации присадки ИОН М
Fig. 8. NO (a) and SO₂ (b) concentrations when varying ION M additive concentration

На рис. 8, а представлены зависимости содержания NO от температуры газовоздушной среды при горении водомазутных эмульсий при варьировании присадки ИОН М. Установлено, что использование присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % приводит к увеличению выбросов NO на 2,6, 3,8 и 1,3 % при сопоставлении с составом № 2 во всем исследуемом температурном диапазоне ($T_g=700\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$). На рис. 8, б приведена зависимость содержания SO₂ от температуры газовоздушной среды для водомазутных эмульсий при варьировании концентрации присадки ИОН М. Установлено, что при добавлении присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % в водомазутное топливо выбросы NO увеличиваются на 5,2, 4,9 и 1,6 % относительно № 2. Такой эффект связан с тем, что при добавлении присадок в топливо вода связывается с тяжелыми углеводородами, и тем самым выход летучих веществ происходит быстрее. Таким образом при увеличении концентрации присадки до 1 % к водомазутному топливу оказывает незначительное влияние на антропогенные выбросы.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что присадка на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (ИОН М) снижает времена задержки зажигания на 40–50 % во всем исследуемом температурном диапазоне. Добавление присадки на основе жирных растительных кислот (P502B3) снижала времена задержки зажигания на 10 % во всем исследуемом температурном диапазоне относительно водомазутного топлива. Добавление присадки P502B1 в водомазутное топливо позволило снизить времена задержки зажигания на 30–40 %. Определено, что в присутствии катализаторов горения вода связывается с тяжелыми углеводородами и тем самым выход летучих веществ происходит быстрее, т. е. подведенная теплота не тратится на прогрев воды в капле, а равномерно воздействует на весь объем топлива.

Проведенные исследования показали, что использование присадок при сжигании водомазутного топлива снижает концентрации CO, CO₂, NO, SO₂ на 8, 6, 10 и 13 %, соответственно, по сравнению с мазутом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darbandi M., Fatin A., Bordbar H. Numerical study on NO_x reduction in a large-scale heavy fuel oil-fired boiler using suitable burner adjustments // *Energy*. – 2020. – Vol. 199. – P. 117371. DOI: doi.org/10.1016/j.energy.2020.117371.
2. Calculation of average molecular parameters, functional groups, and a surrogate molecule for heavy fuel oils using 1H and 13C nuclear magnetic resonance spectroscopy / A.G. Abdul Jameel, A.M. Elbaz, A.-H. Emwas, W.L. Roberts, S.M. Sarathy // *Energy & Fuels*. American Chemical Society. – 2016. – Vol. 30. – № 5. – P. 3894–3905. DOI: doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00303.
3. Goldstein H.L., Siegmund C.W. Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions // *Environ. Sci. Technol.* American Chemical Society. – 1976. – Vol. 10. – № 12. – P. 1109–1114. DOI: doi.org/10.1021/es60122a006.
4. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers / O. Sippula, J. Hokkinen, H. Puustinen, P. Yli-Pirilä, J. Jokiniemi // *Atmos. Environ.* – 2009. – Vol. 43. – № 32. – P. 4855–4864. DOI: doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.022.

5. Incorporating scarcity into footprints reveals diverse supply chain hotspots for global fossil fuel management / Q. Zhong, Z. Zhang, H. Wang, X. Zhang // *Appl Energy*. – 2023. – Vol. 349. – P. 121692. DOI: doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121692.
6. Минзяк М.В. Противоречия в реализации новых положений конвенций МАРПОЛ и КБО в международной морской практике // *Океанский менеджмент. Общество с ограниченной ответственностью «Агентство морского права»*. – 2022. – № 4 (18). – С. 17–20.
7. Свиригин Г.А., Катин В.Д. Обоснование сжигания мазута в виде водомазутных эмульсий в паровых и водогрейных котлах и анализ схем их приготовления // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. – 2014. – Т. 1. – С. 262–267.
8. Huang H. et al. Effects of pine oil additive and pilot injection strategies on energy distribution, combustion and emissions in a diesel engine at low-load condition // *Appl. Energy*. – 2019. – Vol. 250. – P. 185–197. DOI: doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.028.
9. Определение и улучшение стабильности судовых высоковязких топлив / Т.Н. Митусова, Н.К. Кондрашева, М.М. Лобашова, М.А. Ершов, В.А. Рудко, М.А. Титаренко // *Химия и технология топлив и масел*. – 2017. – № 6. – С. 22–24.
10. Сжигание в энергетических котлах и промышленных печах водомазутной эмульсии с присадкой СНПХ-9777 / А.Ф. Шагеев, М.Ф. Шагеев, Т.Н. Юсупова, Г.В. Романов, Е.С. Охотникова // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2009. – № 3–4. – С. 21–26.
11. Copper catalysis for particulate removal from diesel exhaust gas. Copper fuel additives in combination with copper coatings / J.P.A. Neeft, N. Kruse, A. Frennet, J.-M. Bastin // *Studies in surface science and catalysis*. – 1998. – Vol. 116. – P. 655–666. DOI: doi.org/10.1016/S0167-2991(98)80921-X
12. Щестаков Я.К., Садов А.А. Катализатор горения топлива: определение, применение и эффективность // *Молодежь и наука Учредители Уральского государственного аграрного университета*. – 2021. – № 10. – С. 45–46.
13. Монашков В.В., Клей В.В., Потапова Ю.С. Оценка параметров взрывоопасности технологии получения присадки к топливному мазуту // *Проблемы управления рисками в техносфере*. – 2020. – № 4. – С. 105–108.
14. Киселёв И.И., Грибков А.М. Улучшение качества мазута с помощью присадок // *Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве*. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 307–310.
15. Изучение влияния депрессорных присадок на нефть и продукты ее переработки / А.Я. Дугиева, Б.А. Гайтукаева, И.А. Аушева, Р.Д. Арчакова, З.Х. Султыгова // *Технологии нефти и газа. Общество с ограниченной ответственностью ТУМА ГРУПП*. – 2014. – № 4. – С. 12–14.
16. Патров Ф.В., Вахромеев О.С. Использование водотопливной эмульсии при эксплуатации судовых ДВС // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология*. – 2009. – № 1. – С. 223–225.
17. Забродин А.Г., Алибеков С.Я., Забродина Н.А. Исследование характеристик топочного мазута марки М100 // *Экология и промышленность России. Общество с ограниченной ответственностью Калвис*. – 2014. – № 2. – С. 54–55.
18. Physicochemical properties of water-residual-fuel-oil emulsions / Z.A. Antonova, Yu.V. Maksimuk, V.S. Kruk, V.N. Kursevich, V.V. Fes'ko // *Chem. Technol. Fuels Oils*. – 2016. – Vol. 51. – № 6. – P. 719–727.
19. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Флек Е.С. Оптимизация подготовки тяжелого жидкого топлива к сжиганию в топках котельных и других топливосжигающих установок // *Омский научный вестник*. – 2015. – № 2 (140). – С. 144–147.
20. Shlegel N.E., Strizhak P.A. Regime maps of collisions of fuel oil/water emulsion droplets with solid heated surface // *Fuel*. – 2023. – Vol. 342. – P. 127734.
21. Klimenko A., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis // *Energy*. – 2023. – Vol. 283. – P. 128480.
22. Молдобаев М.Б., Самбаева Д.А., Маймеков З.К. Снижение концентрации сажи в газовой фазе на основе использования водотопливных эмульсий в котлоагрегатах типа КЕв-4-14 // *Инженер научное и периодическое издание Инженерной академии Кыргызской Республики. Инженерная академия Кыргызской Республики*. – 2015. – № 9. – С. 354–358.
23. Дементенко О.А., Кузнецов М.Г., Панков А.О. Исследование процесса приготовления жидких топливных эмульсий в конических измельчителях // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2012. – № 4 (7). – С. 71–74.
24. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals / V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Environ. Pollut.* – 2021. – Vol. 285. – P. 117390. DOI: doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117390.
25. Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Promising components of waste-derived slurry fuels // *J. Energy Inst.* – 2020. – Vol. 93. – № 5. – P. 2044–2054.
26. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects / D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zhakharevich, P.A. Strizhak // *Fuel Process. Technol.* – 2016. – Vol. 148. – P. 224–235.
27. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions // *Chem. Eng. Sci.* – 2020. – Vol. 220. – P. 115639.
28. Prelec Z., Mrakovčić T., Dragičević V. Performance study of fuel oil additives in real power plant operating conditions // *Fuel Process. Technol.* – 2013. – Vol. 110. – P. 176–183.
29. Зройчиков Н.А., Лысков М.Г., Прохоров В.Б., Галас И.В. Сжигание водомазутной эмульсии в паровых котлах ТЭЦ-23 ОАО Мосэнерго в сочетании с режимными и технологическими мероприятиями // *Современные природоохранные технологии в электроэнергетике*. – М.: ИД МЭИ, 2007. – С. 192–196.
30. Anthropogenic emissions in the combustion of liquid biofuel droplets / D.V. Antonov, V.V. Dorokhov, G.S. Nyashina, D.S. Romanov // *Coke Chem.* – 2022. – Vol. 65. – № 4. – P. 137–143.

Информация об авторах

Никита Евгеньевич Шлегель, кандидат технических наук, доцент лаборатории тепломассопереноса Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nes6@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7402-5321>

Андрей Юрьевич Клименко, магистрант лаборатории тепломассопереноса Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ayk40@tpu.ru

Поступила в редакцию: 16.01.2024

Поступила после рецензирования: 11.03.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Darbandi M., Fatin A., Bordbar H. Numerical study on NO_x reduction in a large-scale heavy fuel oil-fired boiler using suitable burner adjustments. *Energy*, 2020, vol. 199, pp. 117371.
2. Abdul Jameel A.G. Calculation of average molecular parameters, functional groups, and a surrogate molecule for heavy fuel oils using ¹H and ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Energy & Fuels. American Chemical Society*, 2016, vol. 30, no. 5, pp. 3894–3905.
3. Goldstein H.L., Siegmund C.W. Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions. *Environ. Sci. Technol. American Chemical Society*, 1976, vol. 10, no. 12, pp. 1109–1114.
4. Sippula O. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers. *Atmos. Environ.*, 2009, vol. 43, no. 32, pp. 4855–4864.
5. Zhong Q. Incorporating scarcity into footprints reveals diverse supply chain hotspots for global fossil fuel management. *Appl. Energy.*, 2023, vol. 349, pp. 121692.
6. Minzyak M.V. Contradictions in the implementation of new provisions of the MARPOL and BWC conventions in international maritime practice. *Ocean Management. Limited Liability Company "Agency of Maritime Law"*, 2022, no. 4 (18), pp. 17–20. (In Russ.)
7. Svirin G.A., Katin V.D. Justification for burning fuel oil in the form of water-fuel oil emulsions in steam and hot water boilers and analysis of their preparation schemes. *Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the XXI century*, 2014, vol. 1, pp. 262–267. (In Russ.)
8. Huang H. Effects of pine oil additive and pilot injection strategies on energy distribution, combustion and emissions in a diesel engine at low-load condition. *Appl. Energy*, 2019, vol. 250, pp. 185–197.
9. Mitusova T.N., Kondrasheva N.K., Lobashova M.M., Ershov M.A., Rudko V.A., Titarenko M.A. Determination and improvement of the stability of high-viscosity marine fuels. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2017, no. 6, pp. 22–24. (In Russ.)
10. Shageev A.F., Shageev M.F., Yusupova T.N., Romanov G.V., Okhotnikova E.S. Combustion of water-fuel oil emulsion with the additive SNPKH-9777 in power boilers and industrial furnaces. *News of higher educational institutions. Problems of energy*, 2009, no. 3–4, pp. 21–26. (In Russ.)
11. Neeft J.P.A. Copper catalysis for particulate removal from diesel exhaust gas. Copper fuel additives in combination with copper coatings. *Catalysis and Automotive Pollution Control IV*. Eds. N. Kruse, A. Frennet, J.-M. Bastin. Delf, Elsevier, 1998. Vol. 116, pp. 655–666.
12. Shshetakov Y.K., Sadov A.A. Fuel combustion catalyst: definition, application and efficiency. *Youth and science founders of the ural state agrarian university*, 2021, no. 10, pp. 45–46. (In Russ.)
13. Monashkov V.V., Klyuy V.V., Potapova Yu.S. Assessment of explosion hazard parameters of the technology for producing fuel oil additives. *Problems of risk management in the technosphere*, 2020, no. 4, pp. 105–108. (In Russ.)
14. Kiselev I.I., Gribkov A.M. Improving the quality of fuel oil using additives. *Instrument making and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services*. Kazan, Kazan State Energy University, 2022. pp. 307–310. (In Russ.)
15. Dugieva A.Ya., Gaitukaeva B.A., Ausheva I.A., Archakova R.D., Sulytsova Z.Kh. Study of the influence of depressant additives on oil and its products. *Oil and gas technologies*, 2014, no. 4, pp. 12–14. (In Russ.)
16. Patrov F.V., Vakhromeev O.S. The use of water-fuel emulsion in the operation of marine internal combustion engines. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series Marine equipment and technology*, 2009, no. 1, pp. 223–225. (In Russ.)
17. Zabrodin A.G., Alibekov S.Ya., Zabrodina N.A. Study of the characteristics of fuel oil grade M100. *Ecology and industry of Russia*, 2014, no. 2, pp. 54–55. (In Russ.)
18. Antonova Z.A., Maksimuk V., Kryuk V.S., Kursevich V.N., Fes'ko V.V. Physicochemical properties of water-residual-fuel-oil emulsions. *Chem. Technol. Fuels Oils*, 2016, vol. 51, no. 6, pp. 719–727.
19. Vedruchenko V.R., Krainov V.V., Fleck E.S. Optimization of the preparation of heavy liquid fuel for combustion in the furnaces of boiler houses and other fuel-burning installations. *Omsk Scientific Bulletin*, 2015, no. 2 (140), pp. 144–147. (In Russ.)
20. Shlegel N.E., Strizhak P.A. Regime maps of collisions of fuel oil/water emulsion droplets with solid heated surface. *Fuel*, 2023, vol. 342, pp. 127734.
21. Klimenko A., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis. *Energy*, 2023, vol. 283, pp. 128480.

22. Moldobaev M.B., Sambaeva D.A., Maymekov Z.K. Reducing the concentration of soot in the gas phase based on the use of water-fuel emulsions in boiler units of the Kev-4-14 type. *Engineer, scientific and periodical publication of the Engineering Academy of the Kyrgyz Republic*, 2015, no. 9, pp. 354–358. (In Russ.)
23. Dementienko O.A., Kuznetsov M.G., Pankov A.O. Study of the process of preparing liquid fuel emulsions in conical grinders. *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*, 2012, vol. 7, no. 4, pp. 71–74. (In Russ.)
24. Dorokhov V.V., Kuznetsov G.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environ. Pollut.*, 2021, vol. 285, pp. 117390.
25. Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Promising components of waste-derived slurry fuels. *J. Energy Inst.*, 2020, vol. 93, no 5, pp. 2044–2054.
26. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., Strizhak P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Process. Technol.*, 2016, vol. 148, pp. 224–235.
27. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions. *Chem. Eng. Sci.*, 2020, vol. 220, pp. 115639.
28. Prelec Z., Mrakovčić T., Dragičević V. Performance study of fuel oil additives in real power plant operating conditions. *Fuel Process. Technol.*, 2013, vol. 110, pp. 176–183.
29. Zroychikov N.A., Lyskov M.G., Prokhorov V.B., Galas, I.V. Combustion of water-oil emulsion in steam boilers of TPP-23 of Mosenergo OJSC in combination with regime and technological measures. *Modern environmental technologies in the electric power industry*. Moskva, Publishing House of MEI., 2007. pp. 192–196. (In Russ.)
30. Antonov D.V., Dorohov V.V., Nyashina G.S., Romanov D.S. Anthropogenic emissions in the combustion of liquid biofuel droplets. *Coke Chem.*, 2022, vol. 65, no. 4, pp. 137–143.

Information about the authors

Nikita E. Shlegel, Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nik.shlegel.ask@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7402-5321>

Andrey Yu. Klimenko, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ayk40@tpu.ru

Received: 16.01.2024

Revised: 11.03.2024

Accepted: 22.03.2024

УДК 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4283

Шифр специальности ВАК: 2.8.5

Оптимальные температуры измерения вязкости нефти для восстановления ее вязкостно-температурной зависимости по формулам Филонова–Рейнольдса, Вальтера и Фогеля–Фульчера–Таммана

А.Р. Валеев✉, Р.Р. Ташбулатов, Т.А. Барабанщикова

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

✉anv-v@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена увеличением количества добываемых и транспортируемых высоковязких и неньютоновских нефтей. Для таких нефтей важно точно прогнозировать реологические свойства и, в частности, вязкостно-температурную зависимость. Измерение вязкости для широкого диапазона различных температур чрезмерно трудоемко и нерационально, и на практике используют измерение вязкости при двух или трех различных температурах и далее применяют формулы пересчета. Также важно уточнить, какие формулы и для каких нефтей следует использовать для получения наименьшей погрешности, в частности, актуально определение оптимальных температур измерения вязкости нефти для восстановления ее вязкостно-температурной зависимости по формулам Филонова–Рейнольдса, Вальтера и Фогеля–Фульчера–Таммана, в том числе и при расчете для всего доступного диапазона температур. *Объекты:* вязкостно-температурные зависимости нефтей из Справочника нефтей СССР. *Методы:* обработка данных по измерению вязкости для 564 нефтей из Справочника нефтей СССР; построение аппроксимирующих вязкостно-температурных зависимостей; определение погрешности при использовании полученных зависимостей, в том числе и с использованием кросс-валидации. *Результаты.* Рассчитана погрешность применения формул Филонова–Рейнольдса, Вальтера, Фогеля–Фульчера–Таммана на примере свыше 500 нефтей, и установлено, что при случайном выборе температур для измерения вязкости минимальная средняя погрешность при другой температуре составляет для данных формул, соответственно, 13,8, 10,7 и 6,2 %. Использование формулы Филонова–Рейнольдса нежелательно для расчета вязкости при малых температурах. Формула Фогеля–Фульчера–Таммана показывает наилучшие результаты при расчете вязкости при использовании температур 30–50–70 и 10–30–50 °С.

Ключевые слова: нефть, вязкость, формула Филонова–Рейнольдса, формула Вальтера, формула Фогеля–Фульчера–Таммана, база данных

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Евразийского научно-образовательного центра (проект № ЕНОЦ-06-22).

Для цитирования: Валеев А.Р., Ташбулатов Р.Р., Барабанщикова Т.А. Оптимальные температуры измерения вязкости нефти для восстановления ее вязкостно-температурной зависимости по формулам Филонова–Рейнольдса, Вальтера и Фогеля–Фульчера–Таммана // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 131–138. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4283

UDC 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4283

Optimal temperatures for measuring oil viscosity to restore its viscosity-temperature dependence according to the Filonov–Reynolds, Walter and Vogel–Fulcher–Tamman formulas

A.R. Valeev✉, R.R. Tashbulatov, T.A. Barabanshchikova

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

✉ anv-v@yandex.ru

Abstract. Relevance. Increase in the number of high-viscosity and non-Newtonian oils produced and transported. For such oils, it is important to accurately predict the rheological properties and, in particular, the viscosity-temperature dependence. Viscosity measurement for a wide range of different temperatures is excessively time-consuming and irrational, and in practice, viscosity measurement is used at two or three different temperatures and then conversion formulas are used. It is also important to clarify, which formulas and for which oils should be used to obtain the smallest error. It is important, in particular, to determine the optimal temperatures for measuring the viscosity of oil to restore its viscosity-temperature dependence. **Aim.** To determine the optimal temperatures for measuring oil viscosity to restore its viscosity-temperature dependence using the Filonov–Reynolds, Walter and Vogel–Fulcher–Tamman formulas, including when calculating for the entire available temperature range. **Objects.** Viscosity-temperature dependences of oils from the Directory of oils of the USSR. **Methods.** Processing the viscosity measurement data for 564 oils from the USSR Oil Directory; construction of approximating viscosity-temperature dependencies; determination of error when using the obtained dependencies, including using cross-validation. **Results.** The authors have calculated the error in application of the Filonov–Reynolds, Walter, Vogel–Fulcher–Tamman formulas, using over 500 oils as an example. It was found that with a random choice of temperatures for measuring viscosity, the minimum average error at another temperature for these formulas is, respectively, 13.8, 10.7 and 6.2%. The use of the Filonov–Reynolds formula is undesirable for calculating viscosity at low temperatures. The Vogel–Fulcher–Tamman formula shows the best results in calculating viscosity when using temperatures of 30–50–70 and 10–30–50°C.

Keywords: oil, viscosity, Filonov–Reynolds formula, Walter formula, Vogel–Fulcher–Tamman formula, database

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the Eurasian Scientific and Educational Center (project No. ENOC-06-22).

For citation: Valeev A.R., Tashbulatov R.R., Barabanshchikova T.A. Optimal temperatures for measuring oil viscosity to restore its viscosity-temperature dependence according to the Filonov–Reynolds, Walter and Vogel–Fulcher–Tamman formulas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 131–138. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4283

Введение

При добыче нефти, проектировании новых нефтепроводов, а также выборе технологических режимов для ее перекачки по магистральным трубопроводам ключевым шагом является определение вязкости нефти, поскольку она сильно влияет на потери напора на трение, что, в свою очередь, напрямую связано с энергозатратами [1]. При ламинарном течении потери напора линейно зависят от вязкости, а при турбулентном режиме течения, по мере увеличения числа Рейнольдса, вклад вязкости в потери напора падает, заменяясь на влияние шероховатости стенки.

При этом в настоящее время существует тенденция к увеличению объема добычи высоковязкой нефти [2] и неньютоновских нефтей [3], что сопровождается проблемой, что температурные условия не обеспечивают необходимую вязкость для пере-

качки нефти [4]. Это, в свою очередь, и привело к использованию термических методов при добыче высоковязких нефтей [5], а следовательно, необходимости точного прогнозирования вязкостно-температурной зависимости нефти [6].

При этом вязкость нефтей при различных условиях может различаться на порядки: при одной и той же температуре одна нефть может иметь вязкость 10 мм²/с, другая – 1000 мм²/с, а также, если говорить о вязкости заданной нефти при температурах 0 и 50 °С, ее значение может различаться в 100 и более раз. Это еще раз подчеркивает необходимость точного прогнозирования свойств нефти и подбора оптимальных моделей по расчету вязкости, поскольку при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов необходимо пересчитывать вязкость к температуре эксплуатации [7].

Основополагающим вопросом в определении вязкости является ее зависимость от температуры. Известно, что данная зависимость близка к экспоненциальной и ее можно описать распространенным уравнением Филонова–Рейнольдса [8]:

$$\nu_2 = \nu_1 \cdot \exp(-u(T_2 - T_1)),$$

где ν_1 и ν_2 – вязкости нефти при, соответственно, температурах T_1 и T_2 ; u – коэффициент крутизны вискограммы [9].

Таким образом, на практике задача сводится к определению вязкости нефти при двух температурах, вычислению коэффициента крутизны вискограммы [10], а далее при помощи приведенной формулы к расчёту вязкости при любой другой температуре [11].

Но встает вопрос: при каких температурах лучше всего проводить измерения вязкости? Традиционной является пара температур 20 и 50 °С, но является ли она оптимальной для всех нефтей?

В пользу максимально широкого температурного диапазона существует «гипотеза», что таким образом снижается погрешность при определении вязкости внутри данного диапазона. Но с другой стороны, при высоких температурах вязкости многих нефтей близки друг к другу, и, следовательно, точность расчетов падает.

На основе вышесказанного целью данного исследования является определение оптимальных температур для расчета вязкости согласно различным формулам, в том числе и вне диапазона исходных температур.

Определение оптимальных температур для измерения вязкости при использовании формулы Филонова–Рейнольдса

В качестве критерия оптимальности предлагаем принять относительную погрешность при сравнении расчетных значений с уже известными величинами.

Основной расчетов будет являться база данных со свойствами нефтей, основанная на Справочниках нефтей СССР [12–15].

В использованной базе данных имеются сведения о вязкости 564 нефтей, добываемых в 1970-е годы на территории СССР. В ней приведена

информация о вязкостях при температурах от 0 до 70 °С с шагом в 10 °С, но при этом для разных нефтей указана вязкость при различных наборах температур. Общее число значений вязкости составляет 1890.

Все значения вязкости приведены на Рис. 1.

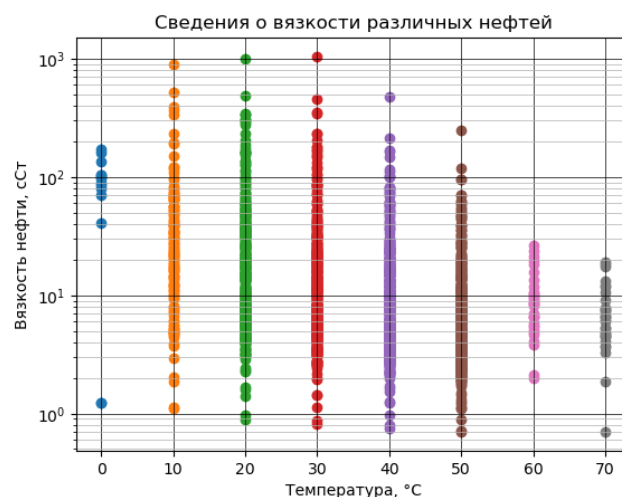


Рис. 1. Сведения о вязкости различных нефтей в используемой базе данных

Fig. 1. Information about the viscosity of various oils in the database used

В пользу утверждения, что для измерения и дальнейших расчетов не следует использовать вязкости при высоких температурах, говорит тот факт, что при температурах 60 и 70 °С, и в некоторых случаях 50 °С, вязкость для различных нефтей различается незначительно. Коэффициент вариации (отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению) для указанных температур заметно меньше, чем для диапазона температур 10–40 °С (табл. 1). В данном случае большая величина вариации указывает на то, что значения вязкости распределены более равномерно, в то время как при малом значении коэффициента вариации вязкости более сгруппированы, следовательно, их сложнее различить, а значит, вязкость при больших температурах позволяет хуже идентифицировать нефть и ее свойства.

Таблица 1. Коэффициент вариации для вязкости различных нефтей в используемой базе данных

Table 1. Variation coefficient for the viscosity of various oils in the database used

Параметр/Parameter	Температура/Temperature, °C							
	0	10	20	30	40	50	60	70
Количество значений/Number of values	14	137	382	421	436	438	32	30
Среднее значение, сСт/Average value, cSt	88,7	53,1	37,2	26,2	16,5	11,1	9,8	7,5
Среднеквадратичное отклонение, сСт/Standard deviation, cSt	50,1	103,9	76,4	67,0	32,4	17,8	6,2	4,7
Коэффициент вариации/Variation coefficient	0,57	1,96	2,05	2,56	1,96	1,60	0,63	0,62

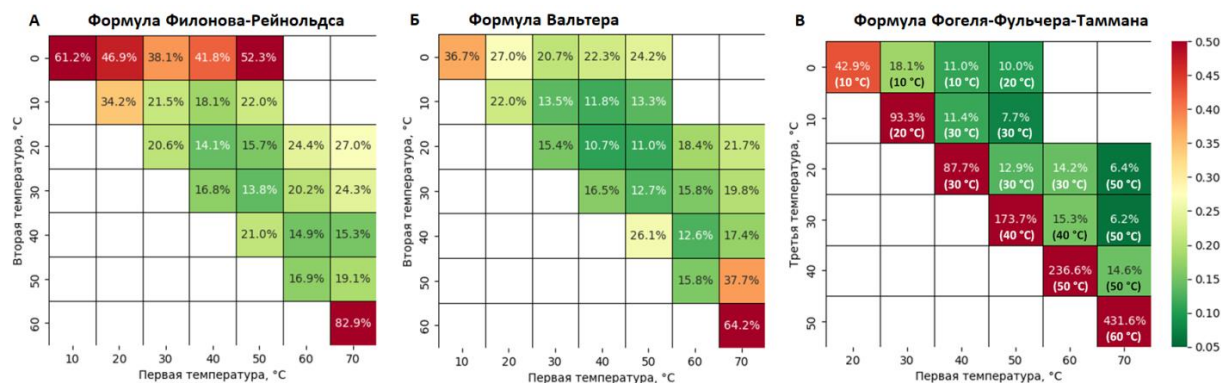


Рис. 2. Относительная погрешность при определении вязкости с помощью формулы Филонова–Рейнольдса (А), Вальтера (Б), Фогеля–Фулчера–Таммана (В)
Fig. 2. Relative error in determining viscosity using the Filonov–Reynolds (A), Walter (B), Vogel–Fulcher–Tamman (B) formulas

Проведем следующий анализ: принимаем, что выполнены измерения вязкости при некоторой паре температур. Определяем коэффициент крутизны визкограммы для данных значений и рассчитываем вязкость по формуле Филонова–Рейнольдса для других температур из диапазона 0–70 °C с шагом 10 °C. После этого сравниваем рассчитанные значения с уже известными. Определяем относительную погрешность и усредняем ее для всех значений для данной пары температур.

Полученные значения относительной погрешности сведены на Рис. 2, а.

Исходя из полученных результатов, видно, что наименьшей относительной погрешностью обладает пара температур 30–50 °C – 13,8 %, и близкая к ней 20–40 °C – 14,1 %. В целом стоит отметить, что использование в качестве первой температуры 0 °C ведет к высокой погрешности – 40–50 %. Это можно объяснить тем, что при температурах из диапазона 0–20 °C зависимость вязкости от температуры имеет более крутую характеристику, чем экспоненциальная характеристика.

Тем не менее даже относительная погрешность 13,8 % является высокой, что говорит о том, что уравнение Филонова–Рейнольдса хоть и широко распространено и удобно в использовании, но его нельзя расценивать как универсальное и точное.

С вычислительной точки зрения применение уравнение Филонова–Рейнольдса можно свести к использованию вязкости при некоторой температуре (например, 20 °C) и коэффициенту крутизны визкограммы. Для того чтобы уравнение предсказывало разнообразные значения вязкости для разных нефтей, два данных параметра также должны иметь широкий диапазон значений. Очевидно, что вязкости при некоторой температуре удовлетворяют данному условию, но коэффициент крутизны визкограммы имеет ограниченный пределы изменений. Покажем это на следующем анализе данных.

В продолжение предыдущего расчета определим среднее значение коэффициента крутизны визкограммы для заданной пары температур. Результаты приведены на Рис. 3.

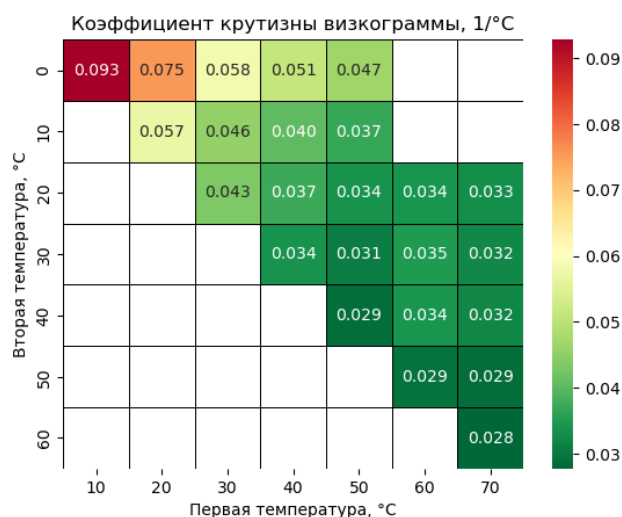


Рис. 3. Среднее значение коэффициента крутизны визкограммы для заданной пары температур
Fig. 3. Average value of the slope coefficient of the viscometer for a given temperature pair

Из данного рисунка видим, что коэффициент крутизны визкограммы по большей части равен 0,03–0,04 с небольшим повышением при малых температурах. Исходя из этого можно заключить следующее:

1. Поскольку средний коэффициент крутизны визкограммы имеет схожие значения для большого количества нефтей, данный параметр может плохо прогнозировать широкое разнообразие вязкости различных нефтей.
2. Одинаковые значения коэффициента крутизны визкограммы при больших температурах и бо-

лее высокие значения при малых температурах предполагают, что при разных температурах оптимально использовать различные зависимости.

Таким образом, коэффициент крутизны вискограммы при всей своей простоте и наглядности нельзя считать универсальным параметром для описания вязкости на широком диапазоне температур.

Следовательно, можно предположить, что полученная высокая погрешность уравнения Филонова–Рейнольдса обуславливается следующим:

1. Уравнение Филонова–Рейнольдса хорошо работает только для определенного типа нефтей. Это можно обосновать тем, что высокопарафинистые нефти плохо удовлетворяют данному уравнению. Но каким именно должно быть условие для разделения нефтей на группы в контексте данной задачи? Тем более, что в применяемой базе данных находится большое количество иных свойств нефти: плотность, температура застывания нефти, содержание парафина смол, смол, компонентный состав, фракционный состав и т. д. С учетом большого количества параметров данная задача может быть решена с использованием методов машинного обучения [16], что является предметом следующих исследований авторов.
2. Сама по себе экспоненциальная зависимость в уравнении Филонова–Рейнольдса плохо отражает зависимость вязкости от температуры. В данном случае также имеется достаточно большое количество работ различных авторов, предлагающих иные зависимости вязкости температуры, например, уравнения Фогеля–Фульчера–Таммана [17], Вальтера и другие [18].

Определение оптимальных температур для измерения вязкости при использовании формулы Вальтера

Формула Вальтера – это другая известная формула для расчета вязкости [19], но за счет более сложной записи она является менее популярной:

$$\lg(\lg(v + 0,8)) = a + b \cdot \lg(T),$$

где a , b – эмпирические коэффициенты; T – абсолютная температура, К.

Согласно данной формуле необходимо иметь два значения вязкости при двух температурах для вычисления обоих эмпирических коэффициентов. По аналогии с предыдущим расчетом определим их для каждой нефти для каждой пары температур, рассчитаем вязкость по формуле Вальтера для других температур. После этого сравниваем рассчитанные значения с уже известными. Определяем относительную погрешность и усредняем ее для всех значений для данной пары температур.

Полученные значения относительной погрешности сведены на Рис. 2, б. В среднем погрешности по формуле Вальтера ниже, чем для формулы Филонова–Рейнольдса.

Наименьшей относительной погрешностью обладает пара температур 20–40 °С – 10,7 % и близкая к ней 20–50 °С – 11,0 %. Если применение формулы Вальтера хоть здесь и дает меньшую погрешность по сравнению с Филонова–Рейнольдса, но не значительную. Но при этом погрешность при расчете температур из диапазона 0–20 °С заметно меньше – практически в 2 раза.

Определение оптимальных температур для измерения вязкости при использовании формулы Фогеля–Фульчера–Таммана

Проведем аналогичное исследование по определению относительной погрешности при использовании формулы Фогеля–Фульчера–Таммана [20]:

$$v = v_{\infty} \cdot e^{\frac{b}{T-\theta}},$$

где v_{∞} , b , θ – эмпирические коэффициенты.

Данные коэффициенты можно качественно описать следующим образом: v_{∞} – это условная вязкость нефти при температуре равной бесконечности; θ – температура, при которой вязкость равна бесконечности (температура застывания); b – коэффициент крутизны вискограммы для заданной θ .

По аналогии с предыдущим уравнением проведем следующий анализ.

Принимаем, что выполнены измерения вязкости при некоторой тройке температур. Определяем эмпирические коэффициенты из формулы Фогеля–Фульчера–Таммана, рассчитываем вязкость для других температур. После этого сравниваем рассчитанные значения с уже известными из базы данных. Определяем относительную погрешность и усредняем ее для всех значений для данной тройки температур.

Полученные значения относительной погрешности сведены на Рис. 2, б. На рисунке приведена наименьшая погрешность при различных значениях второй температуры, при условии, что первая и третья температуры заданы. В скобках указано значение второй температуры, при которой данная наименьшая погрешность получена.

Рассчитанные значения погрешности для формулы Фогеля–Фульчера–Таммана заметно меньше, чем для формул Филонова–Рейнольдса и Вальтера.

Из полученных результатов видно, что наименьшие погрешности – 6,4 и 6,2 % – получаются при тройках значений 20–50–70 и 30–50–70 °С. Это можно объяснить тем, что вязкость при 70 °С достаточно хорошо отражает вязкость v_{∞} при условной бесконечной температуре; малое значение первой температуры близко к θ , а вторая температура отражает значение b .

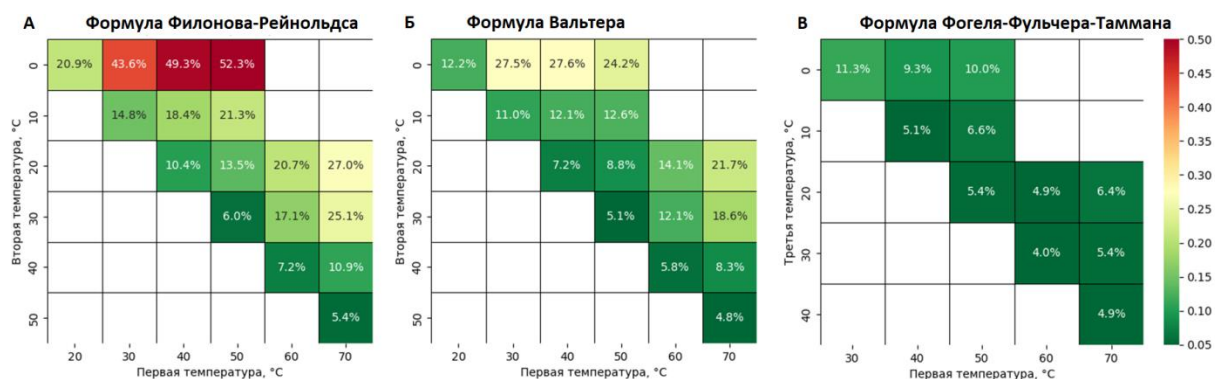


Рис. 4. Относительная погрешность при определении вязкости с помощью формул Филонова–Рейнольдса (А), Вальтера (Б), Фогеля–Фулчера–Таммана (В) при расчете внутри температурного диапазона

Fig. 4. Relative error in determining viscosity using the Filonov–Reynolds (A), Walter (B), Vogel–Fulcher–Tamman (B) formulas when calculating within the temperature range

В базе данных отсутствуют нефти с вязкостью одновременно при температурах 0 и 70 °C, но предполагаем, что наименьшая погрешность была бы для тройки 0–40–70 °C.

Следующее минимальное значение погрешности наблюдается для нефтей, для которых вязкость при температуре 70 °C не измерена, то есть для тройки 10–30–50 °C.

Таким образом, оптимальная тройка температур для использования формулы Фогеля–Фулчера–Таммана – это 30–50–70 °C для более тяжелых нефтей и 10–30–50 °C для более легких нефтей.

ного анализа выше. Проверим, каким образом меняются погрешности при расчете по формулам Филонова–Рейнольдса (Рис. 4, а), Вальтера (Рис. 4, б) и Фогеля–Фулчера–Таммана (Рис. 4, в) и в частности, для популярной пары температур 20–50 °C.

При расчете вязкости внутри диапазона температур 0–50 °C погрешность несколько снижается для всех трех формул, но при этом сохраняется, что наибольшая погрешность у формулы Филонова–Рейнольдса, меньшая у формулы Вальтера и еще меньшая для формулы Фогеля–Фулчера–Таммана (табл. 2).

Выводы и обсуждение результатов

Проведенный анализ зависимости вязкости нефти от температуры на основе Справочников нефти СССР показал, что использование уравнения Филонова–Рейнольдса для ее аппроксимации дает высокую усредненную погрешность 13,8 %, вычисленную для всех нефтей для различных пар температур. Установлено, что использование данной формулы нежелательно для расчета вязкости при температурах из диапазона 0–20 °C.

При равных условиях формула Вальтера предпочтительнее формулы Филонова–Рейнольдса, поскольку имеет погрешность ниже как при расчете при всех температурах (10,7 % против 13,8 %), так при расчете вязкости внутри диапазона 20–50 °C (8,8 % против 13,5 %).

Формула Фогеля–Фулчера–Таммана показывает наименьшую погрешность при расчете вязкости как вне температурного диапазона (6,2 %), так и внутри диапазона 20–50 °C (5,8 %). При возможности измерения вязкости при температуре 70 °C рекомендуется использовать тройку температур 30–50–70 °C, что дает усредненную погрешность для всех нефтей – 6,2 %, в противном случае рекомендуется использовать температуры 10–30–50 °C, чему соответствует погрешность 7,7 %.

Таблица 2. Сводная таблица по расчету вязкостей по различным формулам

Table 2. Summary table for calculation of viscosities according to various formulas

Наименование формулы Formula	Наименьшая погрешность при расчете вязкости для всех температур The smallest error in calculation of viscosity for all temperatures	Погрешность при расчете вязкости внутри диапазона температур 0–50 °C Error in calculation of viscosity within the temperature range of 0–50 °C
Филонова–Рейнольдса Filonov–Reynolds	13,8	13,5
Вальтера Walter	10,7	8,8
Фогеля–Фулчера–Таммана Vogel–Fulcher–Tamman	6,2	5,8

Анализ формул при расчете значений вязкости внутри температурного диапазона

Формулу Филонова–Рейнольдса рекомендуют использовать для расчета вязкости только внутри температурного диапазона [11], в отличие от проведен-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sagadeeva A., Valeev A. The application of ferromagnetic additives to increase the hydraulic efficiency of main oil pipelines // *Liquid and Gaseous Energy Resources*. – 2021. – Vol. 1. – № 1. – P. 86–90. URL: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22076> (дата обращения 15.05.2023).
2. Кацал И.Н. О качестве нефти в системе магистрального транспорта ОАО «АК «Транснефть» // *Рынок российской нефти: 44-ая Международная конференция Argus*. URL: <https://www.transneft.ru/pressroom/docs8> (дата обращения 15.05.2023).
3. Закиров А.И. Обоснование режимов трубопроводного транспорта битуминозной нефти: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2016. – 170 с.
4. Eisner P., Langbauer C., Fruhwirth R. Sucker rod pump downhole dynamometer card determination based on a novel finite element method // *Liquid and Gaseous Energy Resources*. – 2021. – Vol. 1. – № 1. – P. 2–20. URL: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22004> (дата обращения 15.05.2023).
5. Langbauer C., Tehrani F.F., Mastobaev B. A holistic review on hydraulic fracturing stimulation laboratory experiments and their transition to enhanced geothermal system field research and operations // *Liquid and Gaseous Energy Resources*. – 2021. – Vol. 1. – № 1. – P. 30–63. URL: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22043> (дата обращения 15.05.2023).
6. Sucker rod pump frequency-elastic drive mode development – from the numerical model to the field test / C. Langbauer, T. Langbauer, R. Fruhwirth, B. Mastobaev // *Liquid and Gaseous Energy Resources*. – 2021. – Vol. 1. – № 1. – P. 64–85. URL: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22074> (дата обращения 15.05.2023).
7. Исследование методов расчета кинематической вязкости нефти в магистральном нефтепроводе / О.В. Аралов, И.В. Буянов, А.С. Саванин, Е.И. Иорданский // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2017. – Т. 7. – № 5. – С. 97–105.
8. Viswanath D.S., Natarajan G. *Data book on the viscosity of liquids*. – New York: Hemisphere Publ. Corporation, 1989. – 990 p.
9. Свиридов В.П., Левенцов А.Н. О значениях постоянных в уравнениях вязкостно-температурной зависимости некоторых смазочных масел // *Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов*. Тр. НИИТранснефть. – Уфа, 1969. – Вып. VI. – С. 129–136.
10. Черников А.В. К определению показателя крутизны вискограммы нефтей и нефтепродуктов // *Трубопроводный транспорт [теория и практика]*. – 2010. – № 5 (21). – С. 40–41.
11. Черников А.В. О вязкостно-температурной зависимости Филонова–Рейнольдса // *Трубопроводный транспорт [теория и практика]*. – 2010. – № 6 (22). – С. 35–37.
12. Нефти СССР. Справочник. Т. 1. Нефти северных районов Европейской части СССР и Урала / под ред. З.В. Дриацкой, Е.Г. Ивченко, Е.Г. Ивченко, М.А. Мхчян. – М.: Изд-во «Химия», 1971. – 504 с.
13. Нефти СССР. Справочник. Т. 2. Нефти среднего и нижнего Поволжья / под ред. З.В. Дриацкой, Н.М. Жмыховой, И.С. Лазаревой, М.А. Мхчян, А.П. Олейниковой. – М.: Изд-во «Химия», 1972. – 392 с.
14. Нефти СССР. Справочник. Т. 3. Нефти Кавказа и западных районов Европейской части СССР / под ред. Г.Г. Ашумова, З.В. Дриацкой, Н.М. Жмыховой, А.С. Журба, Е.С. Левченко, М.А. Мхчян. – М.: Изд-во «Химия», 1972. – 616 с.
15. Нефти СССР. Справочник. Т. 4. Нефти Средней Азии, Казахстана, Сибири и о. Сахалин / под ред. З.В. Дриацкой, Н.М. Жмыховой, М.А. Мхчян, Г.Х. Ходжаева. – М.: Изд-во «Химия», 1974. – 792 с.
16. Valeev A., Siraeva A., Chen Y., Application of clustering algorithms to detect abnormal state of pumping equipment // *Liquid and Gaseous Energy Resources*. – 2022. – Vol. 2. – № 2. – P. 73–79. URL: <https://doi.org/10.21595/lger.2022.23079> (дата обращения 15.05.2023).
17. Fulcher G. Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1925. – Vol. 8. – № 6. – P. 339–355. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1925.tb16731.x> (дата обращения 15.05.2023).
18. Seeton C.J. Viscosity-temperature correlation for liquids // *Tribology Letters*. – 2006. – Vol. 22. – P. 67–78. URL: <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9071-2> (дата обращения 15.05.2023).
19. Свиридов В.П., Левенцов А.Н., Шапилов А.И. Расчетные уравнения вязкостно-температурной зависимости мазутов // *Транспорт высоковязких нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам*. Тр. НИИТранснефть. – Уфа, 1970. – Вып. VII. – С. 152–160.
20. Стрюк И.С., Фатьянов А.Д., Шарапов В.И. Выбор уравнения вязкостно-температурной зависимости для гидравлического расчета горячих трубопроводов // *Нефтяное хозяйство*. – 1965. – № 4. – С. 58–60.

Информация об авторах

Анвар Рашитович Валеев, доктор технических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. anv-v@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7197-605X>

Радмир Расулевич Ташбулатов, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. tashbulatovradmir@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5406-2352>

Татьяна Анатольевна Барабанщикова, аспирант, ассистент кафедры проектирования и строительства объектов нефтяной и газовой промышленности, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. tany-gra2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4462-9986>

Поступила в редакцию: 07.06.2023

Поступила после рецензирования: 07.07.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Sagadeeva A., Valeev A. The application of ferromagnetic additives to increase the hydraulic efficiency of main oil pipelines. *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 86–90. Available at: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22076> (accessed 15 May 2023).
2. Katsal I.N. On the quality of oil in the trunk transport system of JSC "AK "Transneft". *Proc. of 4-th International conference Argus. Market of Russian oil*. (In Russ.) Available at: <https://www.transneft.ru/pressroom/docs8> (accessed 15 May 2023).
3. Zakirov A.I. *Justification of the modes of pipeline transportation of bituminous oil*. Cand. Diss. St Petersburg, 2016. 170 p. (In Russ.)
4. Eisner P., Langbauer C., Fruhwirth R. Sucker rod pump downhole dynamometer card determination based on a novel finite element method *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 2–20. Available at: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22004> (accessed 15 May 2023).
5. Langbauer C., Tehrani F.F., Mastobaev B. A holistic review on hydraulic fracturing stimulation laboratory experiments and their transition to enhanced geothermal system field research and operations *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 30–63. Available at: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22043> (accessed 15 May 2023).
6. Langbauer C., Langbauer T., Fruhwirth R., Mastobaev B. Sucker rod pump frequency-elastic drive mode development – from the numerical model to the field test. *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 64–85. Available at: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22074> (accessed 15 May 2023).
7. Aralov O.V., Buianov I.V., Savanin A.S., Iordanskii E.I. Investigation of methods for calculating the kinematic viscosity of oil in a trunk oil pipeline. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2017. vol. 7, no 5, pp. 97–105. (In Russ.)
8. Viswanath D.S., Natarajan G. *Data book on the viscosity of liquids*. New York, Hemisphere Publ. Corporation, 1989. 990 p.
9. Sviridov V.P., Leventsov A.N. About values of constants in the equations of viscosity-temperature dependence of some lubricating oils *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 1969, vol. 6, pp. 129–136. (In Russ.)
10. Chernikin A.V. About the determination of the steepness index of the viscogram of oils and petroleum products. *Pipeline transport. Theory and practice*, 2010, vol. 5, no. 21, pp. 40–41. (In Russ.)
11. Chernikin A. V. About the viscosity-temperature dependence of Filonov–Reynolds. *Pipeline transport. Theory and practice*, 2010, vol. 6, no. 22, pp. 35–37. (In Russ.)
12. *Oil of the USSR. Guide. Vol. 1. Oil of the northern regions of the European part of the USSR and the Urals*. Eds. Z.V. Driatskaia, E.G. Ivchenko, E.G. Ivchenko, M.A. Mkhchiian. Moscow, Khimiia Publ., 1971. 504 p.
13. *Oil of the USSR. Guide. Vol. 2. Oil of the Middle and Lower Volga region*. Eds. Z.V. Driatskaia, N.M. Zhmykhova, I.S. Lazareva, M.A. Mkhchiian, A.P. Oleinikova. Moscow, Khimiia Publ., 1972. 392 p.
14. *Oil of the USSR. Guide. Vol. 3. Oil of the Caucasus and Western regions of the European part of the USSR*. Eds. G.G. Ashumov, Z.V. Driatskaia, N.M. Zhmykhova, A.S. Zhurba, E.S. Levchenko, M.A. Mkhchiian. Moscow, Khimiia Publ., 1972. 616 p.
15. *Oil of the USSR. Guide. Vol. 4. Oil of Central Asia, Kazakhstan, Siberia and O. Sakhalin*. Eds. Z.V. Driatskaia, N.M. Zhmykhova, M.A. Mkhchiian, G.Kh. Khodzhaev. Moscow, Khimiia Publ., 1974. 792 p.
16. Valeev A., Siraeva A., Chen Y. Application of clustering algorithms to detect abnormal state of pumping equipment *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 73–79. Available at: <https://doi.org/10.21595/lger.2022.23079> (accessed 15 May 2023).
17. Fulcher G. Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 1925, vol. 8, no. 6, p. 339–355. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1925.tb16731.x> (accessed 15 May 2023).
18. Seeton C.J. Viscosity-temperature correlation for liquids. *Tribology Letters*, 2006, vol. 22, pp. 67–78. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9071-2> (accessed 15 May 2023).
19. Sviridov V.P., Leventsov A.N., Shapilov A.I. Computational equations of viscosity-temperature dependence of fuel oil. *Transport of high-viscosity oils and petroleum products through pipelines*, 1970, vol. 7, pp. 152–160. (In Russ.)
20. Striuk I.S., Fatianov A.D., Sharapov V.I. The choice of the equation of viscosity-temperature dependence for hydraulic calculation of hot pipelines. *Oil industry*, 1965, no. 4, pp. 58–60. (In Russ.)

Information about the authors

Anvar R. Valeev, Dr. Sc., Professor, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. anv-v@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7197-605X>

Radmir R. Tashbulatov, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. tashbulatovradmir@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5406-2352>

Tatiana A. Barabanshchikova, Postgraduate Student, Assistant, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. www.tany-gra2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4462-9986>

Received: 07.06.2023

Revised: 07.07.2023

Accepted: 22.03.2024

УДК 681.518.5; 621.314.26; 62-523
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4651
Шифр специальности ВАК: 2.4.2; 2.5.2

Алгоритм точного перемещения грузов на физической модели сортировочного транспортера

Н.Д. Сарбасова¹, А.Д. Умурзакова^{2✉}, А.С. Гирник³, С.Н. Кладиев³

¹ Торайгыров университет, Казахстан, г. Павлодар

² Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, Казахстан, г. Астана

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ granat_72@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в том, что необходимо экспериментально подтвердить работоспособность алгоритма перемещения выбранного сортимента леса с повышенной точностью к соответствующему бункеру-накопителю в технологическом процессе его сортировки на зимних складах лесоперерабатывающих предприятий. *Цель.* Исследования процесса перемещения штучного груза на физической модели продольного цепного или ленточного транспортера, обеспечивающего масштабированное снижение ошибки позиционирования. При сортировке круглого леса на цепных продольных транспортерах значительной протяженности возникает ошибка перемещения выбранного сортимента круглого леса к месту сброса в накопитель, которая увеличивается пропорционально длине сортировочной линии. В настоящее время используются транспортеры ограниченной протяженности. Накопители располагаются с двух сторон транспортера. Это уменьшает ошибку транспортировки. Иногда сортировочная площадка не позволяет разместить на ней короткий транспортер с двухсторонней выгрузкой, или требуется отсортировать значительное количество пород леса. В этом случае необходимо использовать транспортер большей длины. В статье предлагается новый способ, алгоритм и устройство управления для сортировки круглого леса на продольных цепных транспортерах значительной протяженности. Это уменьшает ошибку слежения перемещения сортимента вдоль транспортера. В качестве датчиков угловых перемещений ведущего и ведомого валов ленточного транспортера используются оптоэлектронные датчики их угловых перемещений. *Методы:* физическое моделирование, информационно-статические методы обработки. *Результаты и выводы.* Проведен анализ структуры стенда физического подобию продольного транспортера; датчиков технологического процесса, а именно, угловой частоты вращения; программно-аппаратных средств обработки полученной информации для минимизации ошибки транспортирования штучного груза на ленте транспортера. Результаты исследования подтверждают возможность практического применения устройства для работы на продольных транспортерах.

Ключевые слова: ленточный транспортер, оптоэлектронный датчик, угловая частота вращения, программируемый логический контроллер, управляющая программа, ошибка перемещения, штучный груз

Для цитирования: Алгоритм точного перемещения грузов на физической модели сортировочного транспортера / Н.Д. Сарбасова, А.Д. Умурзакова, А.С. Гирник, С.Н. Кладиев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 139–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4651

UDC 681.518.5; 621.314.26; 62-523
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4651

Algorithm of accurate cargo movement on a physical model of a sorting conveyor

N.D. Sarbassova¹, A.D. Umurzakova^{2✉}, A.S. Girnik³, S.N. Kladiev³

¹ Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

² Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan

³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ granat_72@mail.ru

Abstract. Relevance. The necessity to confirm the operability of the algorithm of accurate movement of the selected wood sorting to the corresponding storage bunker in the technological process of roundwood sorting at winter warehouses of timber processing companies to solve scientific and engineering problems both at present and in the future. **Aim.** To investigate the process of moving piece load on the physical model of longitudinal chain or belt conveyor, providing scaled reduction of positioning error. When sorting roundwood on chain longitudinal conveyors of considerable length, there is an error of movement of the selected roundwood sort to the place of discharge into the accumulator, which increases in proportion to the length of the sorting line. At present, conveyors of limited length are used. The accumulators are located on both sides of the conveyor. This reduces the transport error. Sometimes the sorting yard does not allow placing a short conveyor on it, or there is a considerable amount of assortments. In this case, it is necessary to use a conveyor of considerable length. The paper proposes a new method of sorting roundwood on longitudinal chain conveyors of considerable length. This reduces the tracking error of the movement of the assortment. Optoelectronic sensors of angular displacements of the leading and driven shafts of the belt conveyor are used as sensors of angular displacements of the shaft. **Methods.** Physical modelling, information-static processing methods. **Results and conclusions.** The authors have carried out the analysis of the structure of the physical similarity stand of the longitudinal conveyor; sensors of the technological process, namely, angular frequency of rotation; software and hardware means of processing the obtained information to minimize the error of transporting piece cargo on the conveyor belt. The results of the study confirm the possibility of practical application of the device for operation on longitudinal conveyors.

Keywords: belt conveyor, optoelectronic sensor, angular speed, programmable logic controller, control programmed, travel error, piece load

For citation: Sarbasova N.D., Umurzakova A.D., Girnik A.S., Kladiev S.N. Algorithm of accurate cargo movement on a physical model of a sorting conveyor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 139–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4651

Введение

В условиях современной рыночной экономики вопросы оценки и учета круглого леса имеют большое значение. Россия занимает одно из ведущих мест в мире по добыче и переработке деловой древесины. В последнее время объемы древесины, заготавливаемой для промышленных целей, растут, а методы объемного измерения круглого леса постоянно совершенствуются. Измерение и сортировка круглого леса являются важными видами деятельности в лесном хозяйстве, главным образом потому, что они предоставляют количественную и качественную информацию, необходимую лесному хозяйству на различных этапах цепочки поставок и переработки круглого леса [1, 2].

Полностью механизированные системы заготовки круглого леса, как правило, характеризуются высокими эксплуатационными характеристиками, широко распространены и используются во многих регионах России [3–5].

В настоящее время широко используется несколько вариантов автоматизированной сортировки древесины, при этом ручные методы по-прежнему широко применяются во многих странах [6, 7].

Поэтому проблема точного измерения объема бревен является очень важной задачей. В современных технологиях контроля объема древесины часто используются ручные средства, поэтому процесс ручного измерения довольно неточный и требует много времени [8].

Задача повышения точности учёта круглых лесоматериалов в автоматизированных системах сортировки по-прежнему стоит достаточно остро.

К настоящему времени разработаны пакеты прикладных программ, основанные на машинном зрении, которые позволяют существенно сократить трудоёмкость операций по учету объемов круглых лесоматериалов в процессе транспортировки и хранения. Автоматизированные технологические процессы сортировки круглого леса обеспечивают контроль учета торговых операций с древесиной и учет данных измерений объемов древесины [9].

В работах [10, 11] рассмотрен способ и комплекс аппаратно-программных средств защиты полученной информации баз данных предприятия и ЕГАИС, обеспечивая—полный и открытый учет имеющихся лесных ресурсов и возможность транспортировки древесины с применением технических средств.

Вопрос о повышении эффективности работы транспортера для транспортировки бревен, анализ достоинств и недостатков существующих конструкций транспортеров, в том числе запатентованных в РФ, представлены в работе [12], и предложена модернизация транспортера сортировки леса, позволяющая достичь повышения надежности устройства для сбрасывания бревен.

Таким образом, из вышеперечисленного следует, что в лесном хозяйстве РФ возникает необходимость создания новых подходов в управлении сортировкой круглого леса с целью увеличения эффективности работы лесопильного производства.

В работах [13–16] рассмотрены способы снижения ошибки перемещения круглого леса в процессе сортировки на продольных цепных транспортерах большой протяженности. А также приведены результаты математического и имитационного моде-

лирования технологических процессов сортировки круглого леса.

Авторами предложен новый способ, алгоритм и устройство для управления процессом сортировки круглого леса [16]. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований автоматизированной сортировки грузов на стенде физического подобию.

Объекты и методика исследования

Для проверки разработанных способов реализации и алгоритма формирования (информационного) канала для сортировки круглого леса были проведены экспериментальные исследования на стенде физической модели конвейера (ленточного транспортера).

Физическая модель ленточного транспортера представляет собой установку конвейера с транспортной лентой, приводимой в движение ведущим и ведомым барабанами, которые в свою очередь вращаются от приводного двигателя. Стенд оснащен оптической системой для контроля габаритов транспортируемых грузов, двумя приёмными корзинами, которые предназначены для приёма сортируемых грузов, которые сбрасываются поворотной площадкой. Физическая модель ленточного транспортера приведена на рис. 1.

Физическая модель включает в себя: 1 – транспортируемый груз; 2 – электродвигатель асинхронный; 3 – инфракрасный луч; 4 – ленту; 5 – источники света; 6 – оптические датчики; 7 – направляющую поворотную площадку для спуска грузов в корзины; 8 – датчики измерения веса грузов; 9 – приёмные корзины для сбора грузов; 10 – силовой шкаф с электрооборудованием.

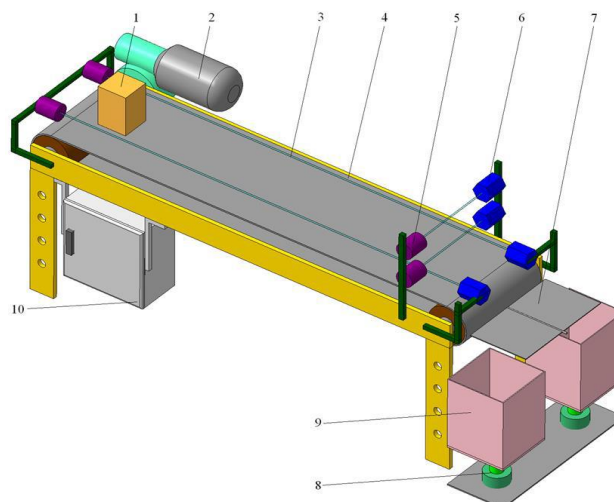
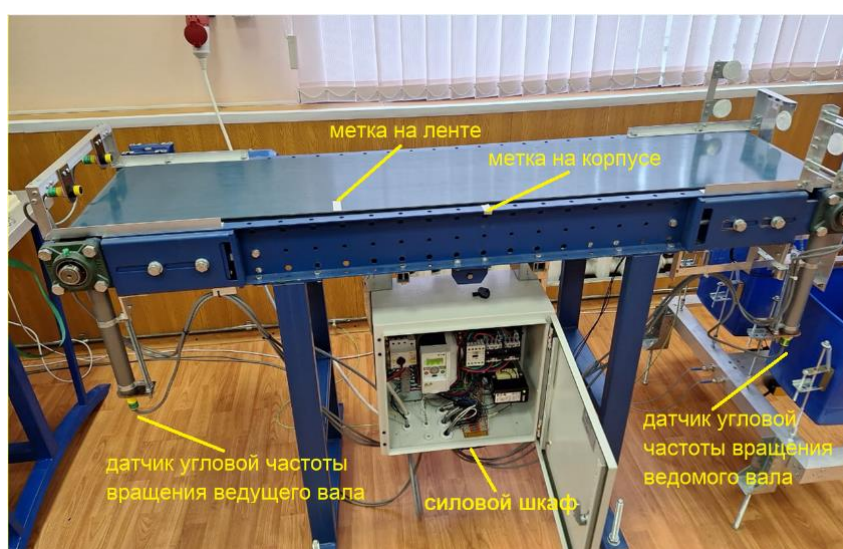


Рис. 1. Физическая модель ленточного транспортера
 Fig. 1. Physical model of the belt conveyor

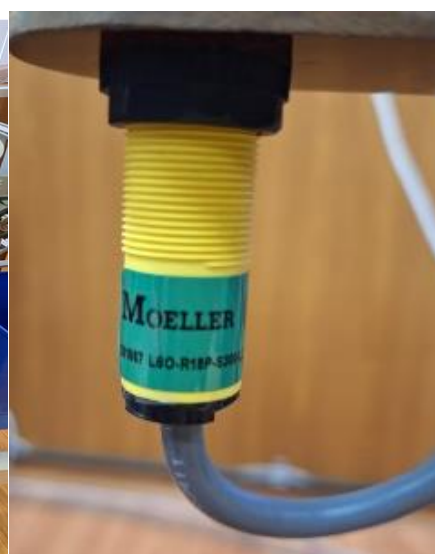
Для определения положения (позиции) выбранной исходной метки (точки) в любой момент времени t по траектории движения транспортера устанавливаются оптоэлектронные датчики угловой частоты вращения на ведущем и ведомом валах транспортера (рис. 2).

В соответствии с техническим описанием датчиков фирмы Moeller выбираем оптический датчик LSO-R18P-S300-LD (рис. 3) [17].

Модель LSO-R18P-S300-LD выдает одну метку на оборот для данного стенда, поэтому он может выполнять функцию конечного выключателя, который используется для определения предельных размеров штучного груза по высоте и ширине.



а/а



б/б

Рис. 2. а) ленточный транспортер, блок управления, датчики и метки; б) оптоэлектронный датчик
 Fig. 2. а) belt conveyor, control unit, sensors and tags; б) optoelectronic sensor

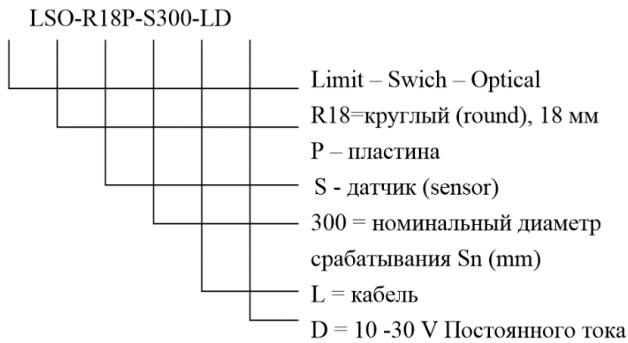


Рис. 3. Расшифровка обозначения оптоэлектронного датчика

Fig. 3. Decoding of the optoelectronic sensor designation

Принцип действия основан на измерении временного интервала между световыми импульсами, поступающими от источника света к фотоприёмнику. В качестве источника излучения взят светодиод, а в качестве фотоприёмника использовали фототранзистор. Зависимость частоты появления/пропадания светового сигнала от скорости вращения определяет светоперрывающий диск с отверстиями, через который пропускается световое излучение от светодиода. По временному интервалу между перепадами тока в цепи управления определяем скорость вращения диска.

Стенд позволяет проверить:

- работоспособность точного алгоритма формирования команды управления перемещением я штучного груза (выбранной метки) на необходимое расстояние за счет синхронизации движения информации о перемещении метки на ленте транспортера в устройстве управления сортировкой с перемещением самой ленты транспортера;
- определить возможность масштабирования движения информации о перемещении метки на ленте транспортера без привлечения дополнительных технических средств; при этом на точность управления перемещением выбранной метки не влияют случайные возмущения, деформация ленты транспортера, так как лента прикреплена к тяговому устройству жестко с минимальными зазорами и не испытывает дополнительные нагрузки.

При проведении эксперимента используется программируемый контроллер ПЛК EC4P-222-MRAD1 [18].

Программируемый логический контроллер – это микропроцессорное устройство для получения, преобразования, обработки, хранения информации и выдачи управляющих команд. Основная задача ПЛК – бесперебойное автономное управление объектом в режиме реального времени [19, 20].

ПЛК работает циклически. В начале рабочего цикла ПЛК производит сканирование своих физи-

ческих входов, на которые поступают электрические сигналы от оптоэлектронных датчиков. Далее программный алгоритм, который заложен в ПЛК, вычисляет состояние физических выходов контроллера. В конце рабочего цикла ПЛК устанавливает вычисленное состояние для каждого выхода.

К входам контроллера могут подключаться различные источники сигналов, например, такие как: кнопки управления, датчики различных параметров (температура, давление, скорость, уровень и т. д.). А к выходам контроллера могут подключаться (часто через промежуточные реле) различные исполнительные механизмы, например, такие как: силовые контакторы, электродвигатели, сигнальные лампы, электромагнитные клапаны и т. д.

При проведении эксперимента используется программируемый контроллер EC4P-222-MRAD1 [18], имеющий входы-выходы:

- 12 цифровых входов, 4 аналоговых входа;
- 6 релейных выходов, 1 аналоговый выход;
- питающее напряжение 24 В постоянного тока.

На рис. 4 показана вычислительная система стенда в составе ПЛК и персонального компьютера. Контроллер способен работать на всех языках программирования стандарта МЭК (LD, IL, ST, SFC, FBD, CFC). Для программирования используется среда CODESYS. У данного контроллера на борту имеются дискретные и аналоговые входы 0–10 В, релейно-контактные выходы, интерфейс подключения по сети Ethernet и CAN open. Кроме того, у контроллера есть дисплей отображения его состояния и кнопки управления, что делает данный ПЛК весьма удобным в эксплуатации [18].

Аппаратная часть вычислительной системы стенда состоит из ПЛК EC4P-222-MRAD и персонального компьютера. Программная часть содержит программу CFC на языке верхнего уровня, состоящую из наборов функциональных блоков (рис. 5).

Manage_motor – функциональный блок для задания частоты вращения приводного двигателя транспортера. В нашем случае линейная скорость ленты транспортера выставлена на максимальное для экспериментального стенда значение – 0,87 м/с. Функциональный блок motor отвечает за пуск и останов двигателя. Функциональный блок timer задает время работы запущенного двигателя.

Это время необходимо для определения перемещения путем перемножения времени на вычисленную скорость. Блок velocity используется для измерения линейной скорости, как от датчика ведущего вала, так и от датчика ведомого вала транспортера. Сигнал от датчика скорости в блоке velocity умножается на 0,04 м перед перемножением на время для пересчета радиуса ведущего или ведомого вала на радиус ведущего или ведомого барабана ленты транспортера.



Рис. 4. Вычислительная система стенда в составе ПЛК и персонального компьютера
Fig. 4. Computing system of the stand consisting of a Programmable logic controller PLC and a personal computer

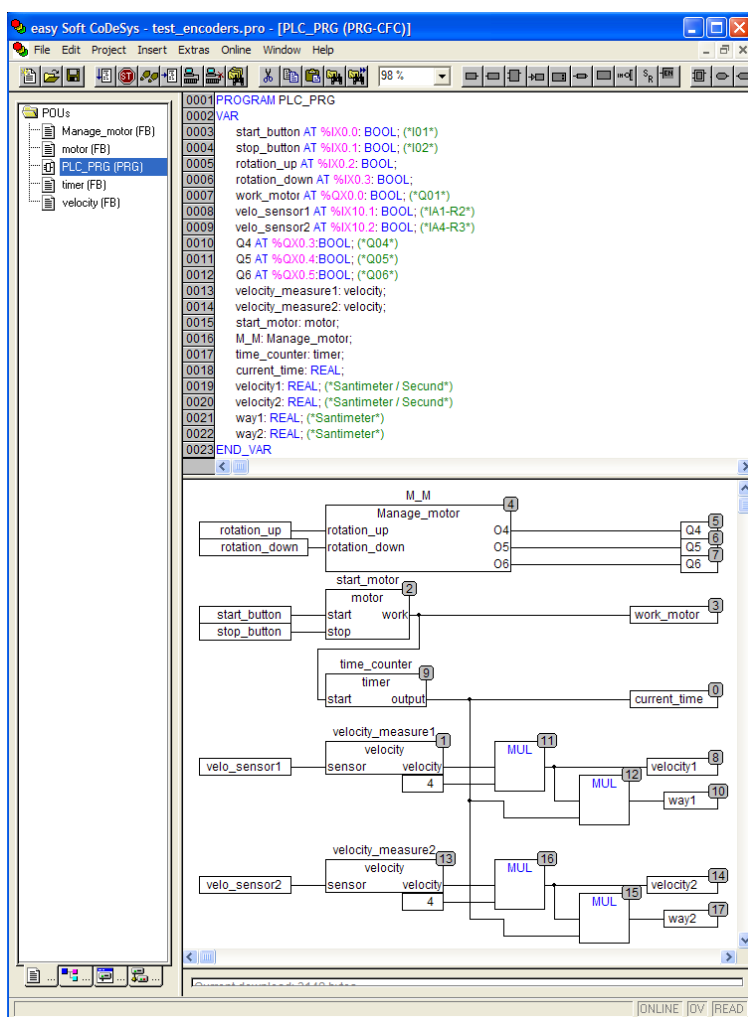


Рис. 5. Окно главной программы PLC-PRG в среде разработки CODESYS на языке программирования CFC
Fig. 5. PLC-PRG main programme window in CODESYS development environment in CFC programming language

Математическая модель, описывающая закон движения ленты транспортера, представлена формулой (1)

$$S_0(t) = \frac{S_1(t) + S_2(t)}{2}, \quad (1)$$

когда $S_1(t)=S_2(t)$ или $S_1(t) \neq S_2(t)$, где $S_1(t)$ – закон движения ленты транспортера относительно ведущего вала; $S_2(t)$ – закон движения ленты транспортера относительно ведомого вала.

Выражение для задания перемещения отметки на ленте транспортера:

$$S_0(t) = \frac{S_1(t) + S_2(t)}{2} = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \omega_{\text{дат1}} \cdot (k_6 \cdot R_{\text{вал}}) dt + \frac{1}{2} \int_{t_2}^{t_1} \omega_{\text{дат2}} \cdot (k_6 \cdot R_{\text{вал}}) dt,$$

где $\omega_{\text{дат1}}$ – вычисленная частота вращения ведущего вала; $\omega_{\text{дат2}}$ – вычисленная частота вращения ведомого вала; $R_{\text{вал}}$ – радиус вала ведущего и ведомого барабана; $k_6=0,04$ м – масштабирующий коэффициент между радиусами барабана и вала.

Допущения:

- Точность поддержания угловой частоты вращения ведущего вала ленточного транспортера должна соответствовать точности на уровне замкнутой системы автоматического скалярного управления

асинхронным частотно-регулируемым электроприводом.

- Резинотканевая лента транспортера имеет локальные растяжения или сжатия в соответствии с законом Гука.
- Не предпринимается никаких мер по улучшению точностных характеристик механической части транспортера. Элементы механической системы транспортера имеют допустимые люфты.
- Максимальная линейная скорость перемещения ленты в эксперименте ограничена величиной 0,87 м/с.
- Используются оптические датчики с низкой разрешающей способностью, так как они выдают всего одну метку на оборот вала.
- Не предпринимается никаких мер по улучшению точностных характеристик механической части сбрасывателей

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальная проверка точности доставки сортируемых грузов к месту их сброса в бункеры-накопители для каждого опыта выводились в информационном окне на экране персонального компьютера (рис. 6).

После обработки результаты экспериментальных исследований приведены в таблице.

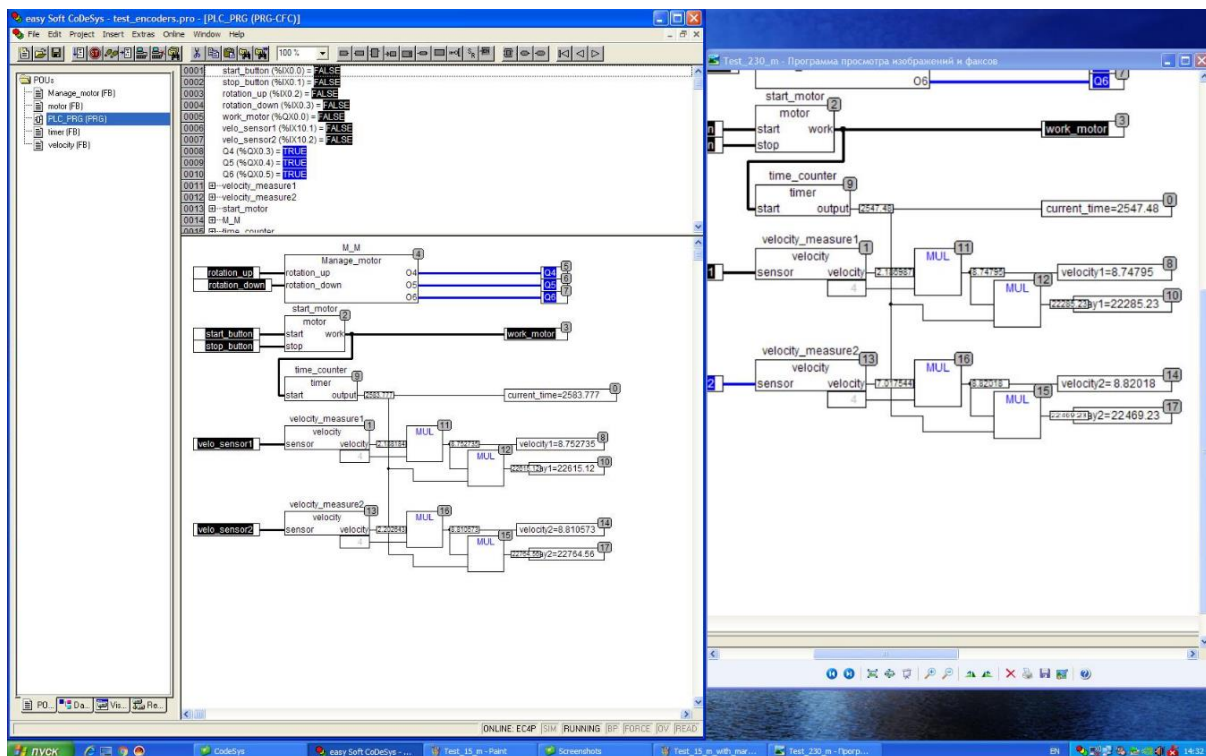


Рис. 6. Окно с результатами эксперимента

Fig. 6. Window with the results of the experiment

Таблица. Результаты эксперимента
Table. Experiment results

№/No.	Ошибка перемещения, вычисленная через частоту вращения ведущего вала Travelling error calculated via the speed of the drive shaft	Ошибка перемещения, вычисленная через частоту вращения ведомого вала Travelling error calculated via the speed of the driven shaft
Датчик угловой частоты вращения ведущего вала Angular speed sensor of the drive shaft	$\Delta\omega_1=226,64-226,15= +0,49 $ м	–
Датчик угловой частоты вращения ведомого вала Angular speed sensor of the driven shaft	–	$\Delta\omega_2=224,40-224,69= -0,29 $ м

Обсуждение результатов

1. Ошибка перемещения, вычисленная через частоту вращения ведущего вала, составила +0,49 м, что превышает предельную допустимую величину на $100\% \times \left(\frac{0,5-0,3}{0,3} \right) = 66,7\%$.
2. Ошибка перемещения, вычисленная через частоту вращения ведомого вала, составила –0,29 м и не превысила предельную допустимую величину в 0,3 м.
3. Показано, что знак вычисленной ошибки через частоту вращения ведущего вала имеет положительное значение – метка на ленте переехала на 0,49 м расчетную метку на раме транспортера.
4. Ошибка, которая вычислена через частоту вращения ведомого вала, имеет отрицательное значение, – метка на ленте не доехала 0,29 м до расчетной метки на раме.
5. Серия опытов на разную величину перемещения с шагом 50 м показала, что ошибка перемещения штучного груза на ленте транспортера относительно перемещения, вычисленного косвенным способом, изменяется пропорционально его длине.
6. Усредненная ошибка перемещения должна определяться для одного и того же заданного перемещения S_0 , однако эта ошибка при усреднении дает результат

$$\Delta_0(t) \approx \frac{\Delta_{\omega 1}(t) + \Delta_{\omega 2}(t)}{2} \approx \frac{0,49 - 0,29}{2} \approx 0,1 \text{ м},$$

что меньше предельно допустимой ошибки перемещения 0,3 м примерно в три раза.

Заключение

Ошибка перемещения сортирмента на ленте транспортера относительно вычисленных перемещений увеличивается пропорционально пройденному расстоянию. Разработана управляющая программа для ЭВМ с минимизацией относительной ошибки доставки сортирмента до места сброса в накопитель, реализующая методику формирования управляющего канала сортировочного транспортера для перемещения круглого леса в синхронно-следящем режиме. Вычисленные оценки ошибок перемещения сортируемых грузов как показателей функционирования управляющего канала синхронно-следящего электропривода находятся в допустимых пределах, что позволяет повысить точность доставки сортирмента по транспортеру в точку сброса [19–21]. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: формирование управляющего канала сортировочного устройства с целью уменьшения ошибки доставки круглого леса на транспортере до выбранного бункера-накопителя; оценку ошибок показателей функционирования канала управляющего сортировкой круглого леса. Результаты имитационного моделирования [14, 15] подтверждены экспериментально на физической модели транспортера. Анализ результатов, полученных экспериментальным путем, показывает адекватность математического описания модели синхронно-следящего электропривода с блоком усреднения задающего воздействия от сигналов датчиков угловой частоты вращения от ведущего и ведомого туеров цепного лесотранспортера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стариков А.В., Батулин К.В. Исследование и анализ методов учета заготовленной древесины в России и зарубежных странах // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – № 4 (20). – С. 103–114. DOI: 10.12737/17408.
2. Солдатов А.В., Герц Э.Ф., Теринов Н.Н. Исследование фотометрического метода измерений объема круглых лесоматериалов // Леса России и хозяйство в них. – 2018. – № 4 (67). – С. 73–77. EDN: FGEEHE.
3. Arafai A.I., Proto A.R., Borz S.A. Performance of a mid-size harvester-forwarder system in integrated harvesting of sawmill, pulpwood and firewood // Annals of Forest Research – 2017. – Vol. 60 (2) – P. 227–241. DOI: 10.15287/afr.2017.909.
4. Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe / B. Muys, V. Kint, J. Hynynen et al. // Forest Systems. – 2010. – Vol. 19. – № SPL.ISS. – P. 86–99. EDN: PNAGDR.
5. Predicting future patterns, processes, and their interactions: benchmark calibration and validation procedures for forest landscape models / T.J. Furniss, P.F. Hessburg, N.A. Povak et al. // Ecological Modelling. – 2022. – Vol. 473. – P. 110099. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110099.

6. Borz S.A., Proto A.R. Application and accuracy of smart technologies for measurements of roundwood: evaluation of time consumption and efficiency // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 197. – P. 106990. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106990.
7. Inoue M., Oishi Ya. Trends and challenges in “forest products processing” in forestry and forest education at Japanese Vocational High Schools // *Journal of the Japanese Forest Society*. – 2022. – Vol. 104. – № 1. – P. 18–30. DOI: 10.4005/jjfs.104.18.
8. Knyaz V.A., Maksimov A.A. Photogrammetric technique for timber stack volume control // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2014. – Vol. 40. – P. 157–162. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-157-2014.
9. Куницкая О.А., Помигуев А.В. Переработка древесины на мобильных линиях лесных терминалов // *Вестник АГАТУ*. – 2021. – № 3 (3). – С. 82–99. EDN: ZLUOBO.
10. Methods of wood volume determining and its implications for forest transport / T. Moskalik, L. Tymendorf, Ja. Van Der Saar, G. Trzciński // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – № 16. – P. 6028. DOI: 10.3390/s22166028.
11. Pásztor Z., Heinzmann B., Barbu M.C. Comparison of different stack measuring methods // *Сибирский лесной журнал*. – 2019. – № 3. – P. 5–13. DOI: 10.15372/SJFS20190301.
12. Berendt F., Cremer T., Wolfgramm F. Reliability of photo-optical measurements of log stack gross volume // *Silva Fennica*. – 2021. – Vol. 55. – № 3. DOI: 10.14214/sf.10555.
13. Разработка алгоритма формирования работы управления по сортировке круглого леса / А.Д. Умурзакова, Н.Д. Сарбасова, С.К. Жумажанов, О.С. Ли // *Вестник КазАТК*. – 2023. – № 4 (127). – С. 218–226. DOI: 10.52167/1609-1817-2023-127-4-218-226.
14. Сарбасова Н.Д., Умурзакова А.Д., Кладиев С.Н. Применение тахогенератора и регулируемого электропривода для замены механического управляющего канала для синхронно-следающих сортировочных устройств круглого леса // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 154–167. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-154-167.
15. Имитационное моделирование следающего электропривода сортировочного конвейера / С.Н. Кладиев, А.Д. Умурзакова, Н.Д. Сарбасова, К.В. Хацевский // *Омский научный вестник*. – 2022. – № 2 (182). – С. 72–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-72-76.
16. Устройство для управления сортировкой круглого леса: пат. на изобретение № 2795741, Российская Федерация, С1, заявл. 30.01.2023; опубл. 11.05.2023, Бюл. № 14 – 13 с.
17. Retroflective sensing sensor, ST-281987-LSO-R18P-S300-LD. URL: <https://shop.shortec.com/eaton-moeller/281987-lso-r18p-s300-ld/> (accessed 21 June 2023).
18. Eaton Industries GmbH. URL: <http://www.eaton.eu> (дата обращения: 23.06.2023).
19. Электрик Инфо. Журнал. URL: <https://elektrik.info> (дата обращения: 24.06.2023).
20. Control Engineering Russia. URL: <https://controleng.ru> (дата обращения: 25.06.2023).
21. Управление сортировкой круглого леса с целью уменьшения ошибки доставки сортимента до накопителя: / С.Н. Кладиев, А.Д. Умурзакова, Н.Д. Сарбасова, Н.А. Воронина. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2023663757, Российская Федерация; заявл. 28.06.2023; опубл. 28.06.2023, Бюл. № 7. – 1 с.

Информация об авторах

Нурбану Даукеновна Сарбасова, старший преподаватель факультета Computer Science Торайгыров университета, Казахстан, 140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64. nurbanu_66@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7280-7434>

Анара Даукеновна Умурзакова, кандидат технических наук, доктор PhD, старший преподаватель кафедры эксплуатации электрооборудования Казахского агротехнического исследовательского университета им. Сакена Сейфуллина, Казахстан, 010011, г. Астана, пр. Женис, 62. granat_72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7683-5256>

Андрей Сергеевич Гирник, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. andreyelectro@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5465-331X>

Сергей Николаевич Кладиев, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kladiev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>

Поступила в редакцию: 02.02.2024

Поступила после рецензирования: 01.03.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Starikov A. V., Baturin K. V. Research and analysis of methods of accounting for harvested timber in Russia and foreign countries. *Lesotekhnicheskiiy Zhurnal*, 2015, vol. 20, no. 4, pp. 103–114. (In Russ.) DOI: 10.12737/17408.
2. Soldatov A.V., Gerz E.F., Terinov N.N. Study on photometric method of measuring for volume of round timber. *Forests of Russia and management in them*, 2018, vol. 67, no. 4, pp. 73–77. (In Russ.).

3. Apafaian A.I., Proto A.R., Borz S.A. Performance of a mid-size harvester-forwarder system in integrated harvesting of sawmill pulpwood and firewood. *Annals of Forest Research*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 227–241. DOI: 10.15287/afr.2017.909.
4. Muys B., Kint V., Hynynen J. Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe. *Forest Systems*, 2010, vol. 19, pp. 86–99. DOI: 10.5424/fs/201019S-9310
5. Furniss T.J., Hessburg P.F., Povak N.A. Predicting future patterns, processes, and their interactions: Benchmark calibration and validation procedures for forest landscape models. *Ecological Modelling*, 2022, vol. 473, pp. 110099. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110099.
6. Borz S.A., Proto A.R. Application and accuracy of smart technologies for measurements of roundwood: evaluation of time consumption and efficiency. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, vol. 197, pp. 106990. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106990.
7. Inoue M., Oishi Ya. Trends and challenges in “forest products processing” in forestry and forest education at Japanese Vocational High Schools. *Journal of the Japanese Forest Society*, 2022, vol. 104, pp. 18–30. DOI: 10.4005/jjfs.104.18.
8. Knyaz V.A., Maksimov A.A. Photogrammetric technique for timber stack volume control. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, vol. 40, pp. 157–162. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-157-2014.
9. Kunickaya O.A., Pomiguyev A.V. Wood processing on mobile lines of forest terminals. *Vestnik AGATU*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 82–99. (In Russ.).
10. Moskalik T., Tymendorf Ł., Van Der Saar Ja., Trzeciński G. Methods of wood volume determining and its implications for forest transport. *Sensors*, 2022, vol. 22, pp. 6028. DOI: 10.3390/s22166028.
11. Pásztor Z., Heinzmann B., Barbu M.C. Comparison of different stack measuring methods. *Sibirskij lesnoj Zhurnal*, 2019, vol. 3, pp. 5–13. DOI: 10.15372/SJFS20190301.
12. Berendt F., Cremer T., Wolfgramm F. Reliability of photo-optical measurements of log stack gross volume. *Silva Fennica*, 2021, vol. 55. DOI: 10.14214/sf.10555.
13. Umurzakova A.D., Sarbasova N.D., Zhumazhanov S.K., Li O.S. Development of an algorithm for the formation of the work of roundwood sorting management. *Vestnik KAZATK*, 2023, vol. 127, no. 4, pp. 218–226. (In Russ.) DOI: 10.52167/1609-1817-2023-127-4-218-226.
14. Sarbasova N.D., Umurzakova A.D., Kladiev S.N. Application of tachogenerator and variable speed drive to replace mechanical control channel for synchronous tracking roundwood sorting machines. *Electrical engineering and information complexes and systems*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 154–167. (In Russ.) DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-154-167.
15. Kladiev S.N., Umurzakova A.D., Sarbasova N.D., Khacevskij K.V. Simulation modelling of the tracking electric drive of the sorting conveyor. *Omsk scientific bulletin*, 2022, vol. 182, no. 2, pp. 72–76. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-72-76.
16. Kladiev S.N., Umurzakova A.D., Sarbasova N.D. *Device for controlling the sorting of round wood*. Patent RF, no. 2795741, 2015. (In Russ.).
17. *Retroflective sensing sensor, ST-281987-LSO-R18P-S300-LD*. Available at: <https://shop.shortec.com/eaton-moeller/281987-lso-r18p-s300-ld/> (accessed 21 June 2023).
18. *Eaton Industries GmbH*. Available at: <http://www.eaton.eu> (accessed 22 June 2023).
19. *Ehlektirik Info*. Available at: <https://elektrik.info> (accessed 24 June 2023).
20. *Control Engineering Russia*. Available at: <https://controleng.ru> (accessed 25 June 2023).
21. Kladiev S.N., Umurzakova A.D., Sarbasova N.D., Voronina N.A. *Management of roundwood sorting in order to reduce the error of delivery of assortment to the storage*. State registration of computer programme RF, no. 2023663757, 2023. (In Russ.)

Information about the author

Nurbanu D. Sarbassova, Senior Lecturer, Toraigyrov University, 64, Lomov street, Pavlodar, 140008, Kazakhstan. nurbanu_66@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7280-7434>

Anara D. Umurzakova, Cand. Sc., PhD, Senior Lecturer, Saken Seyfullin Kazakh Agrotechnical Research University, 62, Zhenis avenue, Astana, 010011, Kazakhstan. granat_72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7683-5256>

Andrey S. Girknik, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. andreyelectro@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5465-331X>

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kladiev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>

Received: 02.02.2024

Revised: 01.03.2024

Accepted: 22.03.2024

УДК 553.2:549:553.3(575.11)
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан)

С.С. Сайитов✉, В.Д. Цой, Ш.М. Расулов, Р.Д. Печерский,
А.В. Расулова, А.К. Абдуваитов, А.А. Асроров

Государственное учреждение «Институт минеральных ресурсов», Узбекистан, г. Ташкент

✉sardorsayitov@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Производство меди сопровождается выходом большого объема шлаков. В настоящее время по всему миру накопилось огромное количество медных шлаков, в составе которых содержание меди даже больше, чем в исходных рудах. Шлаки, которые образуются в результате плавки руд и концентратов как черных, так и цветных металлов, вместе с другими металлургическими отходами, такими как хвостохранилища, все чаще становятся предметом серьезных экологических споров. Единственным способом снижения негативного воздействия шлаковых отходов на окружающую среду может быть их утилизация путем комплексного извлечения ценных компонентов из них и дальнейшего использования шлаковых отходов для строительных целей. В медных шлаках кроме основного компонента меди присутствуют повышенные содержания золота, серебра, цинка, железа и др. Форма нахождения ценных металлов, таких как железо, медь, свинец и цинк, в медных шлаках сложная. Детальное изучение минерального состава шлаков используется при разработке эффективной технологии переработки шлаков. **Цель:** изучить минеральный состав медных шлаков, формы нахождения ценных компонентов. **Объект:** медные шлаковые отходы медеплавильного завода Алмалыкского ГМК. **Методы.** Химический состав медных шлаков установлен фазовым анализом, атомно-абсорбционным, рентгенофлуоресцентным методами исследований. Минеральный состав руд установлен в результате комплексных исследований, в том числе: оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете, рентген-дифракционным, рентгеноспектральным локальным (микронзондовым) исследованием и электронной микроскопией. **Результаты.** Содержание меди в составе проб медных шлаков выше, чем в медных рудах, и составляет 0,77–0,97 %. Кроме меди в составе медных шлаков отмечаются повышенные содержания следующих металлов (г/т): Au – 0,17–0,26; Ag 8,42–10,64, Zn 4,288–10216, Pb – 2014–3360. В составе медных шлаков преобладают железистые силикаты (фаялит, ферросиллит), стекловидная масса железисто-силикатного состава. Рудные минералы представлены в основном магнетитом. Содержание минерала составляет примерно 10–15 %. Из минералов меди резко преобладают сульфиды – борнит, халькозин, реже кубанит, халькопирит, ковеллин. В незначительном количестве отмечаются куприт, самородная медь. Минеральная форма нахождения молибдена – молибденит. Из собственных минералов серебра установлено самородное серебро в ассоциации с минералами свинца. Золото входит в состав самородной меди и халькозина в виде примеси и переходит в медный концентрат при переработке шлаков.

Ключевые слова: медные шлаки, химический, минеральный состав, форма нахождения, медь, железо, золото, магнетит, сульфиды меди, Алмалыкский ГМК, Узбекистан

Для цитирования: Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан) / С.С. Сайитов, В.Д. Цой, Ш.М. Расулов, Р.Д. Печерский, А.В. Расулова, А.К. Абдуваитов, А.А. Асроров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 148–158. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

UDC 553.2:549:553.3(575.11)
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

Material composition of copper slag of the Almalyk copper-smelting plant (Uzbekistan)

S.S. Sayitov✉, V.D. Tsoi, Sh.M. Rasulov, R.D. Pechersky,
A.V. Rasulova, A.K. Abduvaitov, A.A. Asrorov

Institute of Mineral Resources, Tashkent, Uzbekistan

✉sardorsayitov@gmail.com

Abstract. Relevance. Copper production is accompanied by release of a large volume of slag. Today, huge quantities of copper slags have accumulated all over the world, in which the copper content is even greater than that in original ores. The slags that result from the smelting of ores and concentrates of both ferrous and non-ferrous metals, together with other metallurgical wastes such as tailings, are increasingly the subject of significant environmental controversy. The only way to reduce the negative impact of slag waste on the environment can be their disposal, by complex extraction of valuable components from them and further use of slag waste for construction purposes. In addition to the main component of copper, copper slags contain elevated contents of gold, silver, zinc, iron, etc. The form of finding valuable metals such as iron, copper, lead and zinc in copper slags is complex. A detailed study of the mineral composition of slags is used in development of an effective technology for processing slags. **Aim.** To study mineral composition of copper slags, the form of finding valuable components. **Object.** Copper slag waste from the copper-smelting plant of the Almalyk MMC. **Methods.** Chemical composition of copper slags was established by phase analysis, atomic absorption, X-ray fluorescence research methods. Mineral composition of the ores was established as a result of complex studies, including: optical microscopy in transmitted and reflected light, X-ray diffraction, microprobe studies and electron microscopy. **Results.** Copper content in composition of copper slag samples is higher than in copper ores and it is 0.77–0.97%. In addition to copper, copper slags contain elevated contents of a complex of metals (g/t): Au – 0.17–0.26; Ag – 8.42–10.64, Zn – 4.288–10216, Pb – 2014–3360. Ferrous silicates (fayalite, ferrosillite), vitreous mass of ferruginous-silicate composition predominate in the composition of copper slags. Ore minerals are mainly represented by magnetite. The mineral content is approximately 10–15%. Among copper sulfides minerals bornite, chalcocite, less often cubanite, chalcopyrite, covellite sharply predominate. Cuprite is observed in small amounts, and native copper is metallic. The mineral form of finding molybdenum is molybdenite. Among the native silver minerals, native silver was found in association with lead minerals. Gold is included in the composition of native copper and chalcocite as an impurity and passes into copper concentrate during processing slags.

Keywords: copper slags, chemical, mineral composition, form of location, copper, iron, gold, magnetite, copper sulfides, Almalyk MMC, Uzbekistan

For citation: Sayitov S.S., Tsoi V.D., Rasulov Sh.M., Pechersky R.D., Rasulova A.V., Abduvaitov A.K., Asrorov A.A. Material composition of copper slag of the Almalyk copper-smelting plant (Uzbekistan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 148–158. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

Введение

Актуальность. Медь была первым металлом, который был выплавлен (извлечен из руды) около семи тысяч лет назад на древнем Ближнем Востоке, об этом свидетельствуют результаты исследований металлургических отходов, найденных во время археологических раскопок [1]. До сих пор медь является одним из востребованных металлов и спрос остается на высоком уровне.

Производство меди сопровождается выходом большого объема шлаков. Отвальные шлаки медного производства – это скопление минералов, в которых кроме меди содержатся и другие элементы, формирующие свойства шлаков [2]. Они содержат разное количество стекла и новых кристал-

лизованных фаз, а также могут содержать реликтовые минералы и флюсы. Состав шлаков зависит от металлургических процессов и состава перерабатываемой руды (руд) и используемых флюсов [3]. В основном медные шлаки представляют собой совокупность оксидов (железа, марганца и др.), оливина (фаялита и др.) и/или пироксенов [1].

Производство шлака составляет от 2 до 5 тонн на тонну черновой меди в медеплавильных предприятиях мира [4]. На сегодняшний день по всему миру накопились огромные количества медных шлаков, в составе которых содержание меди даже больше, чем в исходных рудах. Шлаки, которые образуются в результате плавки руд и концентратов как черных, так и цветных металлов, вместе с

другими металлургическими отходами, такими как хвостохранилища, все чаще становятся предметом серьезных экологических споров [5]. Металлы могут поступать в окружающую среду в условиях естественного атмосферного воздействия, загрязняя грунтовые и подземные воды.

Единственным способом снижения негативного воздействия шлаковых отходов на окружающую среду может быть их утилизация путем комплексного извлечения ценных компонентов из них и дальнейшего использования шлаковых отходов для строительных целей. В медных шлаках кроме основного компонента меди присутствуют повышенные содержания золота, серебра, цинка, железа и др. Например, в медном комплексе Сарчешмех Ирана скопилось около 8 млн т шлака со средним содержанием Cu – 1,67 %, Mo – 0,05 %, Ag – 40–56 г/т, Au – 1 г/т [6].

Форма нахождения ценных металлов, таких как железо, медь, свинец и цинк, в медных шлаках сложная [7]. Поэтому изучение минерального состава является актуальным, так как результаты минералогических исследований позволяют сделать выводы о их технологических свойствах и разработках технологических схем их обогащения и максимального извлечения ценных компонентов.

АО «Алмалыкский ГМК» является одним из крупных производителей меди в мире. При пирометаллургическом способе получения меди в плавильных печах медеплавильного завода (МПЗ) АО «Алмалыкский ГМК» образуется большое количество отвального шлака. Шлаки медного завода: шлак отражательной плавки (ОП) – 5439503 т; шлак кислородно-факельной плавки (КФП) – 1836117 т; шлак в плавке жидких ванн – 724380 т; всего 8000000 т [8].

Техногенное месторождение отвальных шлаков металлургического производства медеплавильного завода находится на расстоянии 3,7 км от города Алмалык. Начало формирования шлакоотвала 1964 г., и объект, действующий [8]. В отвальные хвосты АО «Алмалыкский ГМК» ежегодно поступает до 350–400 тыс. т отвальных шлаков КФП и ОП с содержанием железа 38–45 %, меди до 1 %, золота 0,4–0,6 г/т и других ценных компонентов [9]. Основными исходными материалами являются шлаки медеплавильного производства Алмалыкского ГМК, состоящие на 75 % из конверторных и на 25 % из отвальных шлаков и фторида аммония, который был применен в качестве фторирующего реагента [10].

Изучением минералого-технологических свойств медных шлаков Алмалыкского МПЗ занимались многие ученые [2, 8–22]. Установлено, что химический состав медных шлаков медеплавильных заводов СНГ имеет некоторое сходство [11]. В частно-

сти, медные шлаки имеют свою особенность, заключающуюся в том, что на 30–40 % шлак состоит из диоксида кремния (SiO_2) и примерно в таком же количестве содержатся оксиды железа [12]. В нем среднее содержание элементов и оксидов составляет: Cu – 0,06–0,9 %, Fe – до 50 %, SiO_2 – 32 % и др. [8]. Результаты химического анализа двух проб шлаков АГМК, изученных М.Ш. Курбановым, также подтверждают, что основу медных шлаков Алмалыкского ГМК составляют SiO_2 и оксиды железа, на их долю приходится более 80 % [10].

В составе шлака ценными компонентами являются Cu, Zn, Cd, Pb и благородные металлы Au, Ag [9, 13]. В составе отвального шлака содержатся следующие ценные компоненты: 0,7–1 % – Cu, 35–45 % – Fe, 0,2 г/т – Au, 0,4 г/т – Ag [14]. В составе конверторных шлаков АО «Алмалыкский ГМК» содержание меди составляет 2,4–3,56 %, общего железа до 49,5 % [15]. А.Х. Туресебеков установил повышенные содержания рения в составе медных шлаков медного производства Алмалыкской ГМК – 0,088 г/т [16].

По классификации В.В. Лапина, шлаки МПЗ АО «Алмалыкский ГМК» относятся к биминеральным и состоят из железистого ортосиликата – фаялита и магнетита [17]. Кроме того, в отвальном шлаке в значительных количествах присутствуют мелкие частицы сульфидов пирротин-халькопиритового, халькопирит-борнитового, халькозин-борнитового и халькозинового состава [12]. Оксиды металлов представлены купритом и гематитом; сульфиды – пирротин, халькозином, сфалеритом, галенитом, борнитом и нестехиометрическим соединением состава CuFeS ; самородные – серебром и медью [8].

В ближайшие годы планируется масштабное увеличение добычи меди. Было подписано постановление президента Республики Узбекистан № ПП-5159 «О дополнительных мерах по развитию горно-металлургической промышленности и смежных отраслей», в котором указано создание кластера медной промышленности и увеличение производства меди до 400 тыс. т в год. Соответственно это приведет к увеличению объемов медных шлаков. На сегодняшний день часть медных шлаков перерабатывается с первичными медными рудами, но в небольших количествах. Привлечение медных шлаков в переработку требует детальных минералогических и технологических исследований, чтобы максимально извлекать ценные компоненты из отходов.

Исследования, направленные на разработку технологии переработки медных шлаков, проводятся по всему миру давно. Из-за нехватки рудного концентрата различные горнодобывающие предприятия приступили к извлечению меди из отвального шлака. Типичный процесс состоит из дробления, измельчения и флотации [18]. Разработана

технология процесса магнитной сепарации прямым восстановлением на основе угля для извлечения железа из шлака с содержанием 39,85 % Fe_{общ} и 0,33 % Cu. Результаты показывают, что конечный концентрат содержит 90,68 % железа, степень металлизации 94,01 %, 0,66 % Cu и 0,058 % S с общим извлечением железа 90,49 и меди 79,53 % [19].

Разработкой технологий переработки медных шлаков Алмалыкского ГМК также занимались многие исследователи. Было предложено использование аппаратов идеального перемешивания для переработки медных шлаков, так как оно даёт возможность наиболее эффективно провести процесс выделения меди, золота, серебра и других элементов из шлака; также сульфидизирование окисленных соединений полезных компонентов помогает эффективной переработке медных шлаков [20–22]. Н.М. Аскарова считает, что применение обескремнивания при переработке шлака позволяет извлекать медь в раствор гидрометаллургическим способом [14].

По мнению Ш.Т. Ходжиева и др. снижение содержания меди в шлаке до 0,12–0,17 % достигается продувкой бедной смеси и добавлением в шлак кварцевого песка (94 % SiO₂). Добавление в шлак 10 % песка увеличивает содержание кремнезема в нем до 35 % и снижает содержание меди до 0,12 % [23].

Несмотря на многочисленные исследования, переработка шлаков медного производства остаётся одной из самых сложных и нерешенных проблем современной цветной металлургии. Детальное комплексное изучение минерального и элементного состава медных шлаков и формы нахождения ценных компонентов является важным для разработки оптимальной технологии переработки шлаков.

Материал и методы

Были изучены три пробы медных шлаков, образованных на МПЗ АО «Алмалыкский ГМК» за последние 5–10 лет, 6 месяцев и за 2022 г. Химический состав представленных проб установлен фазовым анализом, атомно-абсорбционным (ZEEnit 700 P), рентгенофлуоресцентным (X50 Mobile Soil) методами исследований. Химико-аналитические исследования выполнены в Центре аналитических исследований ГУ «ИМР».

Изучение минерального состава представленных проб осуществлялось комплексом минералогических и прецизионных методов исследований. Были изготовлены шлифы и аншлифы и изучены в проходящем и отраженном свете под микроскопом Eclipse LV100 Pol (Nikon). При характеристике количественного минерального состава кроме оптических методов был применен рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3).

Для изучения формы нахождения золота и других сопутствующих элементов проводились анали-

тическая сканирующая электронная микроскопия с SEM EVO MA (10) Zeiss с рентгеновским детектором x-act (Oxford Instrument Nano Analysys), рентгеноспектральный локальный анализ Superprobe JXA-8800R (JEOL).

Аналитическая сканирующая электронная микроскопия (СЭМ-ЭДС) была проведена в Центре передовых технологий при Министерстве инновационного развития. Рентгеноспектральный локальный (микрозондовый) анализ проводился в Институте геологии и геофизики им. Х.М. Абдуллаева.

Результаты и обсуждение

Химический состав. Содержания золота в пробах колеблются от 0,17 до 0,26 г/т, серебра – 8,42–10,64 г/т по данным атомно-абсорбционного анализа. Также установлены высокие содержания цинка, свинца, молибдена и меди. По данным фазового анализа содержание меди в изученных пробах колеблется от 0,77 до 0,97 %, медь представлена в основном сульфидной формой (табл. 1).

Минеральный состав изученных проб схож между собой. В результате просмотра прозрачных шлифов установлены следующие минералы: фаялит, ферросилит, кварц, серицит, стекло и рудные минералы. Фаялит и ферросилит являются основными минералами. Они развиты в виде удлинённо-призматических, лейстоватых и скелетовидных кристаллов, тесно срастающихся со стекловидной массой. Размеры зерен от 0,1–0,3 до 1–1,2 мм. Аморфный твердый силикатный раствор (стекло) выполняет пространство между кристаллами фаялита и ферросилита (рис. 1). Стекловидная масса состоит в основном из железа, кремния и кислорода. Полученные FTIR-спектры образцов медного шлака практически аналогичны спектру фаялитовой фазы [24]. Химический состав минералов, установленный рентгеноспектральным локальным анализом под микрозондом и аналитическим электронным микроскопом, также показывает, что нерудные минералы соответствуют в основном фаялиту.

Содержание рудных минералов составляет примерно 15–20 % от общего объема шлаковых образований. Нерудная масса представлена прорастаниями кристаллов фаялита и ферросилита со стеклообразной массой. В стеклообразной массе также выявлены тонкие ограненные и ксеноморфные зерна нерудных минералов. Фаялит и ферросилит развиты в основном в виде призматических и параллельно шестоватых, иногда разно ориентированных кристаллов. В результате их срастаний со стеклом происходит образование спутанно-волокнистой, фибролитовой, гипидиоморфнозернистой, скелетовидной и дендритовой структур. Кроме того, установлены изометричные, зернистые выделения фаялита и магнетита в стеклообразной массе.

Таблица 1. Содержание Au и Ag (г/т), сопутствующих элементов в шлаках разных лет хранения по данным атомно-абсорбционного и других методов анализа

Table 1. Content of Au and Ag (g/t), associated elements in slags of different years of storage according to atomic absorption and other methods of analysis

№ пробы Sample no.	Период накопления шлака, год Slag accumulation period, year	AAC, г/т AAS, g/t		Химический анализ, % Chemical analysis, %			РФА, г/т XRF, g/t				
		Au	Ag	Fe	Cu	Mo	Zn	Cu	Pb	Mo	S
1	1 год (за 2022 г.)/1 (for 2022)	0,25	10,64	27,54	0,97	0,215	7 683	6 171	3 071	2 199	7 481
2	0,5 года/0.5	0,26	9,17	29,53	0,77	0,175	10216	6131	3360	1993	7256
3	5–10 лет/5–10	0,17	8,42	32,42	0,92	0,065	4288	6289	2014	680	7897

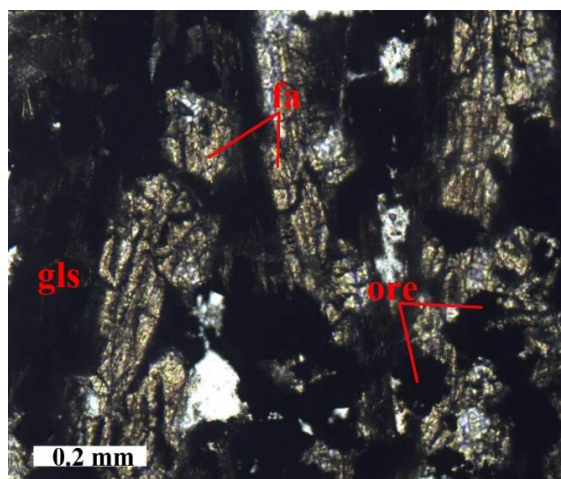
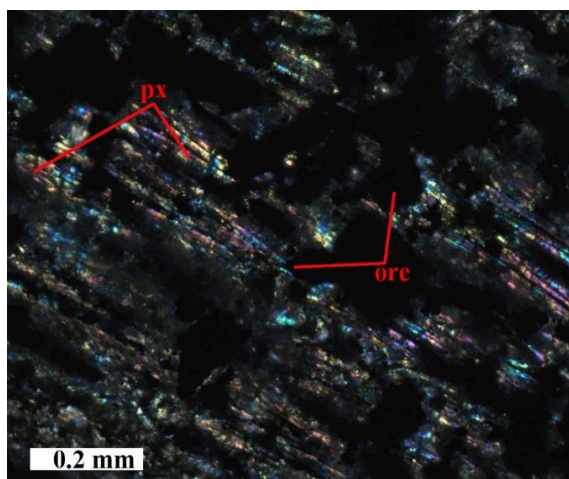


Рис. 1. Микрофотография медных шлаков в проходящем свете, николи скрещены. px – ферросиллит, fa – фаялит, gls – стекло, ore – рудные минералы

Fig. 1. Microphoto of copper slags in crossed polarized light. px – ferrosillite, fa – fayalite, gls – glass, ore – ore minerals

Рудные минералы представлены в основном магнетитом и сульфидами меди. Они равномерно распределены по площади шлака в виде отдельных вкраплений, тонких включений сульфидов меди в магнетите, скоплений и агрегативных сростков друг с другом. Структура выделений рудных минералов гипидиоморфно-, и неравномернoзернистая (рис. 2).

Из рудных минералов, по данным оптической микроскопии, установлены: магнетит, халькопирит, борнит, халькозин, ковеллин, медь самородная, галенит, сфалерит, блеклая руда, пирротин, пирит, молибденит. Среди них доминирует магнетит. В подчиненном количестве установлены халькопирит, борнит, пирротин и халькозин. Остальные отмечаются часто, но в единичных зернах. Форма сечения зерен рудных минералов в аншлифах кубическая, изометричная, сложно-угловатая, округлая, ксеноморфная. Их размеры от <0,01 до 0,2 мм. В основном рудные минералы рассредоточены в стеклообразной массе, между призматическими кристаллами фаялита и ферросиллита.

Содержания магнетита составляет примерно 10–15 %. В аншлифах форма сечения его зерен изометричная, октаэдрическая, кубическая. Размер зерен достигает 0,2 мм. Минерал равномерно рас-

пределен по площади шлака; наблюдается в виде тонких вкраплений, скоплений и в сростках с минералами меди. Иногда содержит включения халькопирита, халькозина, борнита и др.

Минералы меди часто установлены в тесной ассоциации друг с другом, а также с пирротинoм, магнетитом, галенитом, сфалеритом. Представлены в основном халькопиритом, борнитом, халькозином. Они образуются в результате выделения растворенных сульфидов из шлака при его раскристаллизации. Во время расплавления шихты и штейно-шлакообразования состав сульфидной фазы (т. е. когда нерасплавленные сульфидные частицы шихты омываются шлаковой фазой) меняется от пирротин-халькопиритового и халькопирит-борнитового до халькозин-борнитового и халькозинового [12].

В отличие от исходных проб на поверхности борнита образуются тонкие решетчатые кристаллы халькозина. В составе исходных руд медная минерализация представлена в основном халькопиритом, редко вторичными сульфидами меди. Но они образуют тесные сростки друг с другом. Халькопирит отмечается в основном в ассоциации с пиритом, развиваясь по его краям, трещинам. Также установлено повышенное содержание золота до

6,11 % в составе вторичной самородной меди. В составе шлаков самородная медь развивается по трещинам, межзерновым пространствам новообразованных сульфидов меди.

Галенит и сфалерит встречаются по краям зерен минералов меди, т. е. согласно последовательности кристаллизации являются более поздними. Из минералов молибдена установлен молибденит (рис. 2).

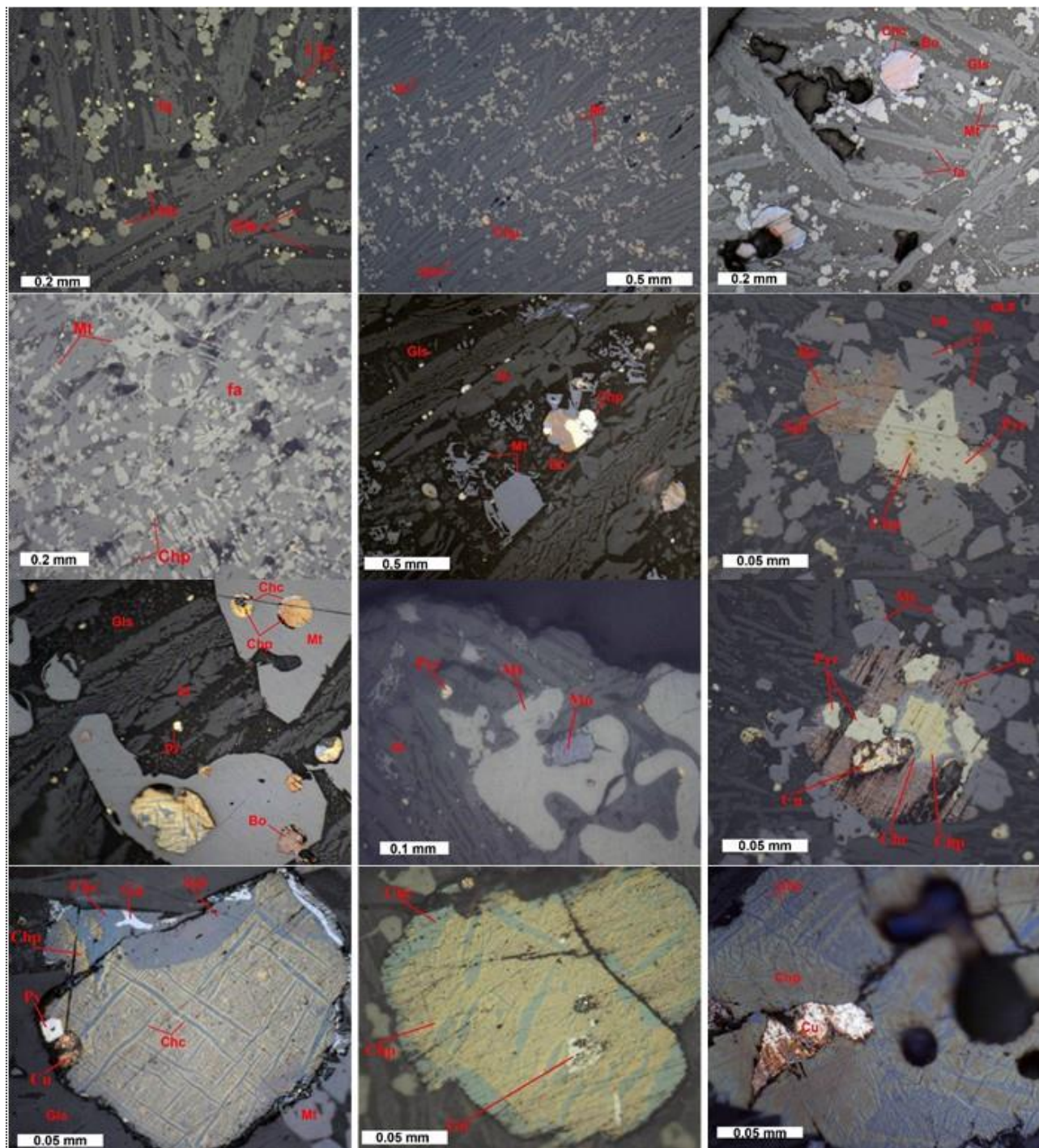


Рис. 2. Характер выделений рудных минералов в шлаке. Фотография в отраженном свете. Fa – фаялит; Gls – стекло; Mt – магнетит; Chp – халькопирит; Chc – халькозин; Bo – борнит; Cu – самородная медь; Pyr – пирротин; Py – пирит; Spl – сфалерит; Gn – галенит, Mo – молибденит

Fig. 2. Character of allocation of ore minerals in slag. Photography in reflected light. Fa – fayalite; Gls – glass; Mt – magnetite; Chp – chalcopyrite; Chc – chalcocite; Bo – bornite; Cu – native copper; Pyr – pyrrhotite; Py – pyrite; Spl – sphalerite; Gn – galena, Mo – molybdenite

Минеральный состав шлаков установлен рентген-дифракционным методом. Съёмка проводилась на дифрактометре ДРОН-3 с CuK α с отфильтрованным излучением в режиме: I=25–30 mA, U=30 kV, V_{детект}=2 °/мин, V_{дифр. ленты}=600 мм/ч, предел измерений – 4×10² имп/с, τ =0,5 с, щели: 1×2×0,25 мм. Интерпретация и идентификация минеральных фаз проводилась по стандартным методикам с использованием отечественных каталогов и ASTM.

Количественное содержание минеральных фаз рассчитывалось по методике РКФА (экспрессный рентгеновский количественный фазовый анализ), основанной на использовании уравнения Петера–Кальмана и унифицированных пересчетных корундовых коэффициентов без введения внутренних стандартов. Предполагается, что сумма всех кристаллических фаз составляет 100 %. Наличие рентгеноаморфного вещества в пробах не учитывалось. Содержание аморфного вещества в данных пробах высокое.

По данным рентген-дифрактометрического анализа в медных шлаках преобладают минералы группы пироксена и оливина, а также оксидов железа и магния. В составе пробы фаялит составляет 18,3–37,6 %, ферросиллит – 7,0–13,7 %, шпинель – 8,5–11,4 %. Кроме того, выявлены кальцит, доломит, хлорит, диопсид, графит в незначительных количествах. Из рудных минералов установлены пирротин (2,2–2,7 %), пирит, Cu-пирит (5,4–6,3 %), молибденит 0,8 %, самородная медь, железо. Минералы меди представлены также кубанитом, халькозином, ковеллином, халькопиритом и др.

Образование фаялитов и других сложных силикатов в составе медных шлаков других заводов отмечены многими исследователями. Но в зависимости от первоначального состава перерабатываемых руд и условий их переработки минеральный состав шлаков имеет некоторые различия. Например, в составе шлаков Балхашского медеплавильного завода выявлен фаялит магнезиальный: Mg_{0,26}Fe_{1,74}SiO₄Mg_{0,347}Fe_{1,548}Mn_{0,105}SiO₄ [25]. Фаялиты медных шлаков АГМК в подавляющем

большинстве случаев имеют избыточную против молекулы фаялита кремнекислоту, что вызвано тонким прорастанием скелетных кристаллов фаялита стеклом. Подобное явление В.В. Лапиным объясняется присутствием стекла внутри кристалликов фаялита в виде каплеобразных микровключений, образующихся за счет эмульсионной ликвации [12].

В составе шлаков в результате аналитической сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) определены следующие минералы меди: халькопирит, борнит, халькозин, ковеллин, кубанит, бурнонит, самородная медь, буланжерит, тетраэдрит. Также отмечаются различные соединения меди со свинцом, сурьмой. Кроме того, было доказано присутствие галенита, сурика, сфалерита, гудмундита, пирита, пирротина, самородного железа и др.

Рудные минералы установлены в виде вкрапленных, сложных сростков друг с другом, а также с магнетитом. Часто наблюдается развитие галенита по краям зерен минералов меди. Установлены сростки сфалерита с халькопиритом, борнитом, халькозином. Отмечены рудные минералы среди зерен фаялита в стеклообразной массе (рис. 3).

Для железа выявлены три основные фазы микронзондовыми исследованиями: первая фаза представлена кристаллами магнетита; вторая фаза – стеклообразной массой железисто-силикатного состава; третья фаза – кристаллами железистых сланцев (рис. 4). Также отметим, что железо входит в состав таких сульфидов, как пирротин, халькопирит, борнит, пирит и других сложных минеральных смесей.

Медь в основном представлена халькопиритом, реже борнитом, халькозином. Халькозин часто встречается в виде игольчатых, удлинённых кристаллов на поверхности борнита. Установлены тетраэдрит и минерал, в составе которого медь, цинк и свинец. Выявлена примесь золота до 6,11 % в составе самородной меди (табл. 2). Медь самородная располагается в микротрещинах, на краях зерен борнита и халькозина. Иногда ассоциирует с минералами свинца.

Таблица 2. Элементный состав минералов меди и благородных металлов по результатам рентгеноспектрального локального анализа на микрозонде

Table 2. Elemental composition of copper minerals and precious metals based on the results of local X-ray spectral analysis on a microprobe

Минерал/Mineral	Элемент, мас. %/Element, wt %									Сумма Total
	Cu	Fe	Au	Ag	Pb	Cr	Ni	Sb	S	
Cu-3 самородная медь с золотом Cu-3 native copper with gold	89,68	0,77	1,22	0,01*	3,78	–	–	–	0,09*	95,45
	76,14	1,04	5,76	0,06*	13,51	–	–	–	0,08*	96,45
	95,25	2,18	0,14*	0,14*	–	–	–	–	0,07*	97,43
	91,59	1,64	0,08*	0,10*	–	–	–	3,41	0,10*	96,64
	92,01	2,09	0,20*	0,08*	–	–	–	3,49	0,02*	97,59
	83,16	2,84	2,43	0,11*	8,29	–	0,74	–	0,3	97,76
	83,32	2,78	6,11	0,14*	2,23	0,32	0,6	–	0,14	95,50
	86,03	2,84	5,32	0,08*	1,45	–	0,56	–	0,07*	96,20
	92,22	2,81	0,07*	–	–	–	0,71	–	0,05*	95,74
Ag самородное с галенитом Ag native with galena	16,7	1,48	–	73,48	9,43	–	–	–	0,36	101,45

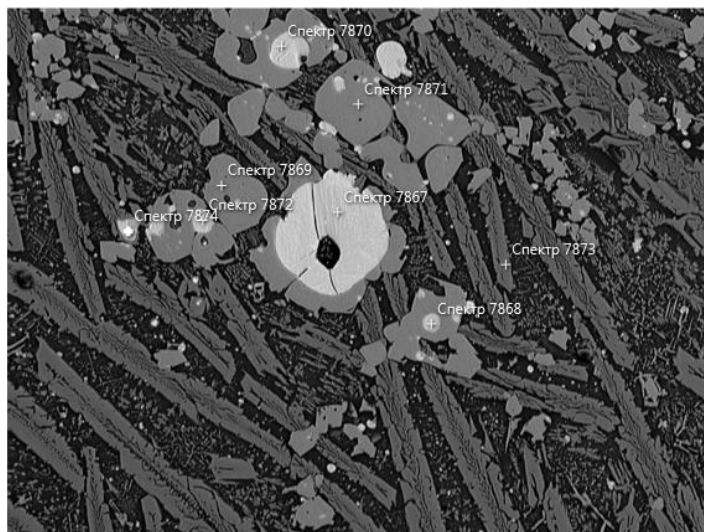


Рис. 3. Скопления рудных минералов. Фото в обратно-отраженных электронах под СЭМ. Элементный состав (%) в точке (№ спектра в таблице)

Fig. 3. Accumulations of ore minerals. Photo in backscattered electrons under SEM. Elemental composition (%) at a point (spectrum number in the table)

№	№ ЭДС спектра EDS spectrum no.	Минерал/Mineral	Fe	Cu	Al	Ti	Si	Mg	O	S
1	7867	Борнит/Bornite	18,13	47,5	–	–	–	–	–	34,38
2	7868	Борнит/Bornite	19,31	45,23	–	–	–	–	–	35,46
3	7869	Магнетит/Magnetite	64,77	–	4,66	0,99	–	–	29,58	–
4	7870	Борнит/Bornite	19,55	47,12	–	–	–	–	–	33,33
5	7871	Магнетит/Magnetite	64,13	–	3,67	1,01	–	–	31,19	–
6	7873	Ферросилит/Ferrosilite	48,02	–	–	–	17	2,08	32,91	–
7	7874	Борнит/Bornite	16,88	50,1	–	–	–	–	–	33,02

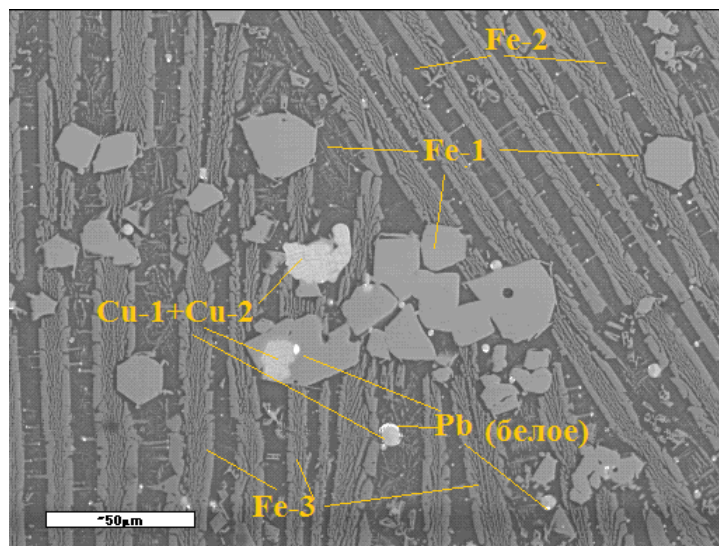


Рис. 4. Вкрапления магнетита, борнита и халькозина в шлаке с призматическими кристаллами фаялита. Фотография в обратно-отраженных электронах под микроскопом. Cu-1 – халькозин; Cu-2 – борнит; Cu-3 – самородная медь; Pb – свинец самородный

Fig. 4. Inclusions of magnetite, bornite and chalcocite in slag with prismatic fayalite crystals. Photography in backscattered electrons under a microprobe. Cu-1 – chalcocine; Cu-2 – bornite; Cu-3 – native copper; Pb – native lead

Минерал/Mineral	Элемент, мас. %/Element, wt %															Σ
	Fe	O	Si	S	Al	K	Ca	Ti	Mn	Cr	Na	Mg	Zn	V	Ba	
Fe-1-кристаллы магнетита Fe-1 magnetite crystals	65,9	23,2	0,4	–	2,8	–	–	1,24	0,09	0,05	–	0,37	0,93	–	–	94,8
	66,3	22,9	0,3	–	2,6	–	–	1,07	0,0	0,26	–	0,38	0,85	–	–	94,7
	64,5	23,1	0,4	0,07	3,1	–	–	1,12	0,18	0,01	–	0,41	1,08	0,04	–	93,8
Fe-2-железисто-кремнистое стекло Fe-2-iron-siliceous glass	14,8	42,8	23,4	0,73	8,1	3,9	4,5	0,33	0,18	–	0,55	0,37	1,3	–	–	101,0
	13,2	43,3	25,1	0,49	7,6	4,8	3,7	0,14	0,14	–	0,68	0,33	1,11	–	0,03	100,8
	14,0	42,9	23,7	0,58	8,5	4,8	3,9	0,22	0,14	–	0,74	0,42	0,61	–	0,23	99,8
Fe-3-игольчатые (фаялит) Fe-3-acicular (fayalite)	21,9	39,2	20,1	0,87	5,7	3,9	6,1	0,13	0,09	0,02	–	0,19	0,35	–	–	98,4
	47,6	31,6	14,0	0,01	0,2	0,01	0,2	–	0,51	–	–	1,72	1,22	–	–	97,1
	47,3	31,6	14,0	–	0,2	0,04	0,2	–	0,49	–	–	1,96	1,24	–	–	96,9
	47,9	31,5	13,9	0,04	0,3	0,1	0,3	–	0,53	–	–	1,42	0,89	–	–	96,8

Из минералов серебра установлено самородное серебро размером вкраплений до 1 мкм. Встречается в сростании с галенитом, самородной медью. Серебро входит в состав самородного свинца до 16,88 %. Свинец представлен в основном галенитом, самородным свинцом, реже суриком. Он образует соединения с железом, медью, сурьмой. Цинк представлен сфалеритом и вюртцитом. Также в незначительном количестве входит в состав других минералов.

Заключение

Был изучен вещественный состав медных шлаков комплексом аналитических методов. В медных шлаках кроме основного компонента меди присутствуют повышенные содержания золота, серебра, цинка, железа и др. Содержание меди в составе проб медных шлаков выше, чем в медных рудах, и составляет 0,77–0,97 %. Кроме меди в составе медных шлаков отмечаются повышенные содержания ряда металлов (г/т): Au – 0,17–0,26; Ag – 8,42–10,64; Zn – 4,29–10216; Pb – 2014–3360.

Форма нахождения ценных металлов, таких как железо, медь, свинец и цинк, в медных шлаках сложная, но в составе шлаков медеплавильного завода АГМК они представлены собственными минералами. Основная масса медных шлаков состоит из желези-

стых силикатов (фаялит, ферросиллит) и стекловидной массы железисто-силикатного состава.

Рудные минералы составляет 10–15 % и представлены в основном магнетитом и сульфидами меди, железа. Минералы меди очень тесно сростаются, замещают друг друга, а также образуют сростки с другими рудными минералами. Встречаются очень тонкие включения рудных минералов в виде взаимных прорастаний и в нерудной массе. Такие тесные сростки усложняют их процесс обогащения.

Результаты различных аналитических методов исследований подтверждают минеральную форму нахождения ценных компонентов. Высокие содержания ряда металлов и наличие их собственных минералов в составе шлаков увеличивают их ценность как техногенный источник меди, золота, серебра, молибдена, железа, свинца, цинка и др. Использование результатов данного минералогического исследования даёт возможность разработать технологические схемы обогащения и максимального извлечения ценных компонентов из шлаков. Переработка шлаковых отходов расширяет минерально-сырьевую базу Республики Узбекистан, а утилизация отходов является актуальной в решении экологических аспектов накопления шлаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourgarit D. Mineralogy of slags: a key approach for our understanding of ancient copper smelting processes // *EMU Notes in Mineralogy*. – 2009. – Vol. 20. – Ch. 5. – P. 203–231.
2. Аскарлова Н.М. Некоторые минералогические свойства термически обработанного шлака АО «Алмалыкский ГМК» // *Universum: технические науки*. – 2021. – Т. 4 (85). DOI: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11572>.
3. Copper slag as a potential source of critical elements – a case study from Tsumeb, Namibia / S. Lohmeier, B.G. Lottermoser, T. Schirmer, D. Gallhofer // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2021. – Vol. 121. – P. 129–142. DOI: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1383/2021>
4. Sanchez M., Sudbury M. Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. – 2013. – Vol. 49 (2). – P. 161–168.
5. Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal / V. Sibanda, E. Sipunga, G. Danha, T.A. Mamvura // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6. – Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>
6. Mineralogical properties of the copper slags from the SarCheshmeh Smelter Plant, Iran, in view of value recovery / M.N. Saeed, Sh.B. Behnam, Y. Mohamad Reza, M.M. Mohammad, K.Kh. Javad // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12. – 1153. <https://doi.org/10.3390/min12091153>
7. Mineralogical characterization of copper slag from Tongling nonferrous metals group China / Ch. Tiejun, N. Chao, L. Hongming, L. Jiaxin, Y. Jialong // *JOM*. – 2016. – Vol. 68. – № 9. DOI: 10.1007/s11837-015-1752-6
8. Изучение химического вещественного состава шлаков медеплавильного производства, кеков, клинкеров и других отходов металлургических производств / К.Ж. Хакимов, А.С. Хасанов, О.А. Каюмов, А.Ю. Шукуров, Б.Ш. Соатов // *Universum: технические науки*. – 2021. – Т. 2 (83). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11313> (дата обращения: 10.06.2023).
9. Аскарлова Н.М., Самадов А.У. Возможности переработки шлаков медного производства гидрометаллургическим способом // *Вестник науки и образования*. – 2020. – № 10 (88). – Ч. 2. – С. 36–39.
10. Опытнo-промышленная установка для переработки шлаков медного производства Алмалыкского ГМК и свойства синтезированных порошков аморфного кремнезема / М.Ш. Курбанов, У.М. Нуралиев, Ж.А. Панжиев, С.А. Тулаганов, М. Эраназаров // *Uzbek Journal of Physics*. – 2022. – № 1. – С. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.52304/v24i1.305>.
11. Сабанова М.Н. Интенсификация процесса флотации медного шлака в условиях водооборота: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 161 с.
12. Санакулов К.С., Хасанов А.С. Переработка шлаков медного производства. – Ташкент: Фан, 2007. – 238 с.
13. Цой В.Д., Королева И.В., Мулява Г.С. Минералого-геохимические особенности распределения меди и железа в концентратах и шлаках МПЗ АГМК // *Горный вестник Узбекистана*. – 2009. – № 3. – С. 24–30.
14. Аскарлова Н.М., Тошкодирова Р.Э. Результаты исследований переработки медного шлака и клинкера цинкового производства // *Universum: технические науки*. – 2022. – Т. 3 (96). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13310> (дата обращения: 10.06.2023).

15. Depletion of slag from Almalyk Copper Plant with aluminum containing waste / Sh.T. Khojiev, A.A. Yusupkhodjaev, D.Y. Aribjonova, G.B. Beknazarova, D.N. Abdullaev // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 2831–2837. DOI: 10.35940/ijitee.B7200.129219.
16. Рений Узбекистана / А.Х. Турсебеков, Х.Т. Шарипов, И.Б. Турамурадов, А.Г. Лузановский, Б.Б. Василевский, Р.Р. Рахимов // *Горный вестник Узбекистана*. – 2007. – № 4. – С. 14–22.
17. Хасанов А.А. Изучение минерального состава шлаков МПЗ // *Горный вестник Узбекистана*. – 2007. – № 4. – С. 43–46.
18. Muhlare T.A., Groot D.R. Recovery of copper from reverberatory copper slag and production of a leach residue used as a portland cement additive // *Copper Cobalt Africa, incorporating the 8th Southern African Base Metals Conference*. – Livingstone, Zambia, 2015. – P. 247–255.
19. Utilization of waste copper slag to produce directly reduced iron for weathering resistant steel / X.L. Zhou, D.Q. Zhu, J. Pan, T.J. Wu // *ISI International*. – 2015. – Vol. 55. – № 7. – P. 1347–1352. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.55.1347>
20. Technology of processing slags of copper production using local secondary technogenic formations / A.A. Yusupkhodjaev, Sh.T. Khojiev, B.T. Berdiyarov, D.O. Yavkochiva, J.B. Ismailov // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 5461–5472. DOI: 10.35940/ijitee.A4851.119119.
21. Переработка шлаков медного производства с использованием аппаратов идеального перемешивания / А.А. Юсупходжаев, А.С. Хасанов, С.Р. Худояров, Х.Р. Валев, С.Т. Маткаримов // *Горный Вестник Узбекистана*. – 2017. – № 4. – С. 67–71.
22. Эффективная технология переработки медных шлаков сульфидизированием её окисленных соединений / А.А. Юсупходжаев, А.С. Хасанов, С.Р. Худояров, Х.Р. Валев, С.Т. Маткаримов // *Горный Вестник Узбекистана*. – 2018. – № 1. – С. 42–47.
23. Khojiev Sh.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 8094–8099.
24. Mihailova I., Mehendjiev D. Characterization of fayalite from copper slags // *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2010. – Vol. 45.3. – P. 317–326.
25. Комплексная переработка конвертерных шлаков / Е.А. Ситько, Б.М. Сукуров, Г.С. Рузахунова, Б.А. Омирзаков, А.Е. Байдуисенова // *Комплексное использование минерального сырья, Казакстан*. – 2018. – № 2. – С. 45–56. URL: <https://doi.org/10.31643/2018/6445.6> (дата обращения: 10.06.2023).

Информация об авторах

Сардор Савриддинович Сайитов, PhD, начальник отдела минералогических исследований, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. sardorsayitov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9984-8674>

Владимир Денъевич Цой, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Государственное учреждение «Институт минеральных ресурсов», Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. vtsoi@inbox.ru

Шохрух Муйсун угли Расулов, младший научный сотрудник, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. shohruhrasulov2019@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8066-4304>

Руслан Дмитриевич Печерский, младший научный сотрудник, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. russell.4ay@gmail.com

Алина Владимировна Расулова, младший научный сотрудник, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. alinasulova1986@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-9790-8388>

Азимжон Кудрат угли Абдуваитов, геолог, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. azimjon.abduvaitov96@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-5363-8656>

Азамат Аскарали угли Асроров, геолог, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. asrorovazamat603@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.06.2023

Поступила после рецензирования: 04.08.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Bourgarit D. Mineralogy of slags: a key approach for our understanding of ancient copper smelting processes. *EMU Notes in Mineralogy*, 2009, vol. 20, Ch. 5, pp. 203–231.
2. Askarova N.M. Some mineralogical properties of thermally treated slag of Almalyk MMC JSC. *Universum: technical sciences*, 2021, vol. 4 (85). (In Russ.) Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11572>.
3. Lohmeier S., Lottermoser B.G., Schirmer T., and Gallhofer D. Copper slag as a potential source of critical elements – a case study from Tsumeb, Namibia. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2021, Vol. 121, pp. 129–142. DOI: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1383/2021>.
4. Sanchez M., Sudbury M. Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2013, vol. 49 (2), pp. 161–168.
5. Sibanda V., Sipunga E., Danha G., Mamvura T.A. Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal. *Heliyon*, 2020, vol. 6, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>.

6. Saeed M.N., Behnam Sh.B., Mohamad Reza Y., Mohammad M.M., Javad K.Kh. Mineralogical Properties of the Copper Slags from the SarCheshmeh Smelter Plant, Iran, in View of Value Recovery. *Minerals*, 2022, vol. 12, 1153. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12091153>.
7. Tiejun Ch., Chao N., Hongming L., Jiaxin L., Jialong Y. Mineralogical characterization of copper slag from tongling nonferrous metals group China. *JOM*, 2016, vol. 68, no. 9. DOI: 10.1007/s11837-015-1752-6.
8. Khakimov K.Zh., Khasanov A.S., Kayumov O.A., Shukurov A.Yu., Soatov B.Sh. Study of the chemical composition of slags from copper smelting, cakes, clinkers and other wastes from metallurgical industries. *Universum: technical sciences*, 2021, vol. 2 (83). (In Russ.) Available at: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/11313> (accessed 10 June 2023).
9. Askarova N.M., Samadov A.U. Possibilities of processing copper production slag by hydrometallurgical method. *Vestnik of science and education*, 2020, no. 10 (88), P. 2, pp. 36–39. (In Russ.)
10. Kurbanov M.Sh., Nuraliev U.M., Panzhiev Zh.A., Tulaganov S.A., Eranazarov M. Pilot plant for processing copper production slags of Almalyk MMC and properties of synthesized amorphous silica powders. *Uzbek Journal of Physics*, 2022, no. 1, pp. 67–75. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.52304/v24i1.305>.
11. Sabanova M.N. *Intensification of copper slag flotation under water circulation conditions*. Cand. Diss. Moscow, 2016. 161 p. (In Russ.)
12. Sanakulov K.S., Khasanov A.S. *Slag processing from copper production*. Tashkent, Fan Publ., 2007. 238 p. (In Russ.)
13. Tsoi V.D., Koroleva I.V., Mulyava G.S. Mineralogical and geochemical features of the distribution of copper and iron in concentrates and slags of the AGMK MPZ. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2009, no. 3, pp. 24–30. (In Russ.)
14. Askarova N.M., Toshkodirova R.E. Research results of copper slag processing and zinc production clinker. *Universum: technical sciences*, 2022, vol. 3 (96). (In Russ.) Available at: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/13310> (accessed 10 June 2023).
15. Khojiev Sh.T., Yusupkhodjaev A.A., Aribjonova D.Y., Beknazarova G.B., Abdullaev D.N. Depletion of slag from Almalyk Copper Plant with aluminum containing waste. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 9, Iss. 2, pp. 2831–2837. DOI: 10.35940/ijitee.B7200.129219.
16. Turesebekov A.Kh. Sharipov Kh.T., Turamuratov I.B., Luzanovsky A.G., Vasilevsky B.B., Rakhimov R.R. Rhenium of Uzbekistan. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2007, no. 4, pp. 14–22. (In Russ.)
17. Khasanov A.A. The study of the mineral composition of slags of the MPZ. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2007, no. 4, pp. 43–46. (In Russ.)
18. Muhlare T.A., Groot D.R. Recovery of copper from reverberatory copper slag and production of a leach residue used as a portland cement additive. *Copper Cobalt Africa, incorporating the 8th Southern African Base Metals Conference*. Livingstone, Zambia, 2015. pp. 247–255.
19. Zhou X.L., Zhu D.Q., Pan J., Wu T.J. Utilization of waste copper slag to produce directly reduced iron for weathering resistant steel. *ISIJ International*, 2015, vol. 55, no. 7, pp. 1347–1352. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.55.1347>.
20. Yusupkhodjaev A.A., Khojiev Sh.T., Berdiyarov B.T., Yavkochiva D.O., Ismailov J.B. Technology of processing slags of copper production using local secondary technogenic formations. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 9, Iss. 1, pp. 5461–5472. DOI: 10.35940/ijitee.A4851.119119.
21. Yusupkhodzhaev A.A., Khasanov A.S., Khudoyarov S.R., Valev Kh.R., Matkarimov S.T. Processing of copper production slags using perfect mixing devices. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2017, no. 4, pp. 67–71. (In Russ.)
22. Yusupkhodzhaev A.A., Khasanov A.S., Khudoyarov S.R., Valev Kh.R., Matkarimov S.T. Efficient technology of copper slag processing by sulfidization of its oxidized compounds. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2018, no. 1, pp. 42–47. (In Russ.)
23. Khojiev Sh.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, Iss. 2, pp. 8094–8099.
24. Mihailova I., Mehandjiev D. Characterization of fayalite from copper slags. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 2010, vol. 45.3, pp. 317–326.
25. Sitko E.A., Sukurov B.M., Ruzakhunova G.S., Omirzakov B.A., Baiduisenova A.E. Complex processing of converter slags. *Integrated use of mineral raw materials, Kazakhstan*, 2018, no. 2, pp. 45–56. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.31643/2018/6445.6> (accessed 10 June 2023).

Information about the authors

Sardor S. Sayitov, PhD, Head of the Mineralogical Research Department, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. sardorsayitov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9984-8674>

Vladimir D. Tsoi, Dr. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. vtsoi@inbox.ru

Shohruh M. ugli Rasulov, Junior Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. shohruhrasulov2019@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-8066-4304>

Ruslan D. Pechersky, Junior Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. russell.4ay@gmail.com

Alina V. Rasulova, Junior Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. alinarasulova1986@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-9790-8388>

Azimjon K. ugli Abduvaitov, Geologist, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. azimjon.abduvaitov96@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-5363-8656>

Azamat A. ugli Asrorov, Geologist, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. asrorovazamat603@gmail.com

Received: 15.06.2023

Revised: 04.08.2023

Accepted: 22.03.2024

УДК 622.24.051

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4320

Шифр специальности ВАК: 2.8.1

Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента

М.С. Попова✉

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

✉alleniram83@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Рациональный выбор бурового инструмента является одним из составляющих положительного результата геологоразведочных, горных, буровых работ. На современный буровой инструмент возлагается функция комплексного решения проблем, возникающих в процессе бурения скважин. Сегодня имеется достаточно большое разнообразие конструкций породоразрушающего бурового инструмента. Однако научные достижения в усовершенствовании материальной и технической производственной базы способствуют развитию буровой техники и созданию новых, более эффективных конструкций инструмента. Наиболее перспективным и эффективным при работе в различных горных условиях является алмазный буровой инструмент. В ходе эксплуатации такого инструмента немаловажным является процесс циркуляции промывочной жидкости, особенно в призабойной зоне сооружаемой скважины. Поэтому при проектировании новых конструкций алмазного породоразрушающего инструмента необходимо учитывать не только прочностные, режущие, стабилизирующие его свойства, но и возможность эффективного течения жидкости в циркуляционной системе, т. е. без затрат энергии потока на преодоление сопротивлений, с достаточной производительностью по выносу шлама и необходимым уровнем охлаждения, смазки и реализации других функций очистного агента, способствующих повышению результатов бурения. При этом современные методы проектирования бурового инструмента должны учитывать влияние промывочной жидкости, ее свойств, характера течения на механизм разрушения горных пород. Таким образом, возникает необходимость тщательного исследования характера протекания гидродинамических процессов в зоне контакта резцов инструмента с горной породой. Конструкция режущей поверхности бурового алмазного инструмента рассматривается как зона влияния гидродинамических процессов на характер взаимодействия резцов с горной породой, в качестве доводов приводится анализ результатов исследований как самого автора, так и известных мировых производителей алмазного бурового инструмента. **Целью** работы является исследование влияния конструктивных особенностей существующего алмазного бурового инструмента на характер течения жидкости в призабойной зоне скважины в процессе бурения. **Объекты:** конструкции алмазного бурового инструмента, гидродинамические процессы, сопутствующие бурению. **Методы:** аналитический метод, метод компьютерного моделирования. **Результаты.** Определены различия циркуляции жидкости в отдельных видах алмазного бурового инструмента. Выделены зоны алмазного породоразрушающего инструмента, отличающиеся характером течения жидкости. Установлены направления снижения гидравлических сопротивлений в призабойной зоне скважины и улучшения циркуляции жидкости в режущей части инструмента секторного типа за счет изменения его конструктивных особенностей.

Ключевые слова: алмазный инструмент, гидродинамические процессы, бурение, гидравлическое сопротивление, разработка бурового инструмента, повышение эффективности бурения

Для цитирования: Попова М.С. Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4320

UDC 622.24.051

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4320

Hydrodynamic processes in designing diamond drilling tools

M.S. Popova✉

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉alleniram83@mail.ru

Abstract. Relevance. The rational choice of drilling tools is one of the components of a positive result of exploration, mining, drilling operations. The function of a complex solution of problems arising when drilling wells is assigned to a modern drilling tool. Today there is a great variety of designs of rock cutting drilling tools. However, scientific achievements in improving the material and technical production base contribute to the development of drilling technology and creation of new, more efficient tool designs. The most promising and effective in various mining conditions is a diamond drilling tool. During the operation of such a tool, flushing fluid circulation is of great importance, especially in the bottomhole zone of the well being constructed. When designing the structures of a diamond rock cutting tool, it is necessary to take into account not only the strength, cutting, and stabilizing properties, but also the possibility of an effective fluid flow in its circulation system, i.e. without flow energy consumption to overcome resistance, with sufficient capacity for cuttings removal and the necessary level of cooling, lubrication and implementation of other functions of the flushing fluid, which contribute to improving drilling results. At the same time, modern methods of designing a drilling tool should take into account the influence of the drilling fluid, its properties, and the nature of the flow on the rock destruction mechanism, i. e. require a thorough study of the nature of the fluid flow in the contact zone of the tool cutters with the rock. The article proposes the position of considering the design of a diamond drilling tool cutting surface from the point of view of the influence of hydrodynamic processes on the nature of cutters rock interaction. The results of the study of both the author herself and well-known world manufacturers of diamond drilling tools are given as arguments. **Aim.** To study the influence of the design features of the existing diamond drilling tool on the nature of the fluid flow in the bottomhole zone of the well during drilling. **Objects.** Designs of diamond drilling tools, hydrodynamic processes associated with drilling. **Methods.** Analytical method, computer simulation method. **Results.** Differences in fluid circulation in certain types of diamond drilling tools are determined. The zones of the diamond rock-cutting tool are distinguished. They differ in the nature of the fluid flow. Directions for reducing hydraulic resistance in the bottomhole zone of the well due to changes in the design features of the drilling tool were established.

Keywords: diamond tool, hydrodynamic processes, drilling, hydraulic resistance, drilling tool development, improving drilling efficiency

For citation: Popova M.S. Hydrodynamic processes in designing diamond drilling tools. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4320

Введение

Востребованность буровых работ в различных отраслях горной промышленности способствует развитию буровых технологий и в то же время приводит к выдвижению жестких требований к результатам и процессу бурения. Независимо от назначения, скважина должна сооружаться быстро, без отклонений от проектной траектории, с качественным отбором керна или шламовых проб, точным вскрытием продуктивного пласта и с минимальными затратами (энергетическими, материальными и т. д.). При этом растет глубина и сложность геологических условий проведения скважин, что в совокупности создает ряд препятствий для реализации поставленных целей.

Одним из наиболее рациональных и надежных способов устранения типовых проблем, возникающих в процессе бурения скважин, является приме-

нение бурового инструмента, конструкция которого позволяет одновременно решать ряд таких задач, как, например, эффективное разрушение горных пород, стабилизация работы бурового снаряда, повышение ресурса инструмента, снижение затрат мощности [1–31]. Для разработки геометрии такого бурового инструмента необходим комплексный подход, который основывается на определении взаимного влияния физико-механических, динамических, гидравлических, температурных процессов, сопутствующих бурению. При этом важной зоной исследования является плоскость контакта рабочей поверхности инструмента с горной породой. Сложность изучения призабойной зоны скважины заключается в ее габаритах. Зачастую размеры зазоров, образовавшихся в области забоя, не позволяют размещать приборы и датчики, предоставляющие возможность исследования явлений, возникающих

в процессе бурения, что так необходимо для получения представления о состоянии забоя в различных периоды бурения. К примеру, как показывают ранее проведенные исследования [1], особенности протекания гидравлических процессов в зоне контакта режущей поверхности инструмента с горной породой в некоторой степени определяют эффективность разрушения забоя и условия работы бурового снаряда. К тому же именно на забое скважины реализуются основные функции промывочной жидкости – очистка и охлаждение, контроль которых особо актуален при алмазном бурении [1–22]. В то же время призабойные гидродинамические процессы постоянно изменяются по мере углубления скважины, поэтому исследование и демонстрацию течения жидкости целесообразно проводить путем применения методов компьютерного моделирования, основные инструменты которого базируются на законах механики и гидравлической динамики.

Воздействие на гидродинамику процесса бурения возможно путем регулирования направления течения жидкости в призабойной зоне, что, как правило, реализуется посредством изменения конструкции циркуляционной системы инструмента.

Как известно, все резцы бурового инструмента работают неодинаково [1–8], что связано с различными условиями использования их режущей поверхности. Характер работы однотипных резцов определяет их местоположение, ориентация и другие факторы [1–9], при этом важную функцию выполняет промывочная жидкость, а точнее степень ее контакта с резцом. Поэтому для разработки бурового инструмента комплексного действия необходимо выделить основных параметров его конструкции, изменение геометрии которых способствует ориентированию потока промывочной жидкости с целью улучшения результатов бурения.

Основные направления исследования гидродинамических процессов

Циркуляция промывочной жидкости в процессе бурения играет одну из важных ролей в сооружении скважины. Промывочная жидкость очищает забой от шлама, охлаждает рабочую поверхность, предотвращает осыпание стенок скважины, оказывает смазывающее влияние на инструмент и т. д. Применение гидродинамической энергии в качестве разрушающей силы или привода забойного снаряда является экономным, эффективным и экологически чистым способом. Таким образом, разрабатываемая конструкция бурового инструмента, помимо разрушающей, стабилизирующей способности, должна благоприятствовать улучшению условий реализации функций промывочной жидкости.

В соответствии с теорией П.А. Ребиндера, активное проникновение жидкости в область трещинообразования горной породы способствует повышению эффективности ее разрушения за счет диспергирования или ослабления связей горных пород под влиянием адсорбции промывочной жидкости. В то же время, согласно результатам исследования ученых ВНИИБТ под руководством Б.В. Байдюка, при недостаточном проникновении жидкости в зону контакта резца с горной породой, а именно в трещину ее скола, возникает так называемое угнетающее гидравлическое давление [22, 23], действие которого приводит к снижению эффективности бурения. При этом, согласно ранее проведенным исследованиям [1, 16], в любых условиях бурения, учитывая, что при сооружении скважины всегда заполнена жидкостью, в зоне контакта поверхности резца и разрушаемого массива горной породы возникает некая жидкая среда, отличающаяся от промывочной жидкости и состоящая из смеси очистного агента и горной породы различного состояния. Состав и как следствие свойства данной среды зависят от множества факторов, в том числе и от характера гидродинамических процессов, протекающих в призабойной зоне. Скопление описанной среды может создавать сопротивление перемещению резца и таким образом оказывать влияние на результаты бурения. К тому же именно плоскость контакта резцов с горной породой является источником тепла, возникающего в результате трения, и требует тщательного охлаждения. Таким образом, при проектировании бурового инструмента нового поколения целесообразно учитывать систему данных фактов и разрабатывать такие конструкции, геометрия которых способствовала бы направлению течения жидкости в плоскость контакта резца с горной породой, независимо от местоположения режущего элемента. Отсюда актуальным является исследование гидродинамических процессов, протекающих непосредственно в зоне контакта резца с горной породой, с целью выявления их влияния на механизм разрушения горной породы и определения конструктивных элементов бурового инструмента, изменение геометрии которых позволило бы регулировать степень проникновения промывочной жидкости в область взаимодействия режущих элементов и забоя скважины.

Как известно, циркуляция жидкости осуществляется следующим образом. Буровой раствор, обладающий определенными свойствами, поступает на забой. В призабойной зоне промывочная жидкость насыщается шламом и затем выходит на поверхность. На всем пути своего перемещения очистной агент непрерывно контактирует с буровым инструментом и стенками скважины, геология которых неоднородна. При этом внешние условия

течения жидкости, такие как температура и давление, непрерывно изменяются. Если при перемещении в бурильных трубах и в затрубном пространстве движение жидкости можно охарактеризовать как предсказуемое, установившееся, постоянное, имеющее математическое описание, то на забое, в силу геометрических особенностей циркуляционной системы породоразрушающего инструмента и характера его взаимодействия с горной породой, движение имеет сложный, непостоянный характер.

Учитывая устройство системы взаимодействия бурового инструмента и скважины, а также обращая внимание на вышеперечисленные условия, при тщательном изучении цикла течения жидкости по каналам внутри скважины не сложно отметить, что плотность, скорость и давление жидкости многократно изменяются и различны на отдельных участках изучаемой системы. Все это делает применение теоретического анализа на основе законов гидродинамики громоздким и затруднительным для расчетов, особенно в призабойной зоне, где течение преимущественно турбулентное, сложное.

Таким образом, основными направлениями исследования гидродинамических процессов при проектировании эффективного алмазного бурового породоразрушающего инструмента являются: определение скорости, направления и режима течения, давления жидкости в призабойной зоне скважины в зависимости от конструктивных особенностей циркуляционной системы и рабочего торца инструмента, а также определение характера течения жидкости в отдельно выделенных зонах контакта бурового инструмента с горной породой.

Анализ гидродинамических процессов в призабойной зоне скважины

Назначение бурового инструмента определяет его конструктивные особенности и, как следствие, ограничивает или расширяет возможности воздействия на гидродинамические процессы. Так, профиль торца бескернового инструмента имеет преимущественно конусную или сферическую форму, в то время как колонковый инструмент обладает кольцевой формой, что в свою очередь определяет возможность реализации той или иной геометрии циркуляционной системы: размещения промывочных каналов, их размеров и формы; способа установки гидравлических насадок или их отсутствие и так далее.

В типовых долотах *PDC* основные резцы располагаются непосредственно после промывочного канала (рис. 1, *а, б*). Скорость течения жидкости перед таким резцом в основном зависит от величины ее подачи, количества, типа и местоположения гидравлических насадок, свойств промывочной жидкости, а направление определяется конструкцией промывочного канала. В то же время следует

не забывать, что при этом инструмент совершает вращение вокруг своей оси и динамика движения бурильной колонны не может не оказывать влияния на характер течения жидкости в его рабочей зоне. Скорость перемещения резца зависит от радиуса его местоположения на рабочем торце долота. Наибольшая скорость сопутствует резцу, находящемуся на внешнем радиусе инструмента, а следовательно, и воздействие на гидродинамические процессы такого резца будет больше.

К тому же в процессе бурения скважины при постоянной подаче промывочной жидкости в зоне контакта резцов с породой возможны изменения гидродинамических процессов за счет изменения глубины внедрения резцов и свойств разрушаемой горной породы, отражающихся на образовании шлама и размерах поперечного сечения потока жидкости.

Исследование взаимного влияния всех перечисленных факторов возможно путем применения методов компьютерного моделирования, хорошо зарекомендовавших себя при конструировании бурового инструмента [9, 10, 16, 24–26, 30].

При моделировании гидродинамических процессов, сопутствующих бурению алмазным породоразрушающим инструментом различной конструкции, за основу приняты метод конечных элементов и законы механики сплошной среды. В качестве исходных данных использовались: конструкция бурового инструмента, свойства промывочной жидкости, параметры режима бурения (подача промывочной жидкости, частота вращения, осевая нагрузка), свойства горных пород.

Согласно результатам компьютерного моделирования, течение жидкости на забое скважины носит сложный характер. В то же время можно выделить несколько однотипных зон.

Размеры и цилиндрическая форма резца *PDC* способствуют тому, что при внедрении в горную породу под его режущей поверхностью создается несколько областей гидравлического давления, вызванных наличием жидкой среды и динамикой резца (рис. 1, *з, д*) [1].

В различных геологических условиях бурения возникающее гидравлическое давление под рабочей частью *PDC* может либо способствовать активному проникновению жидкости в зону предразрушения породы, тем самым обеспечивая повышение эффективности разрушения забоя (согласно учению Ребиндера) и снижение угнетающего давления, либо создавать сопротивление перемещению резца, выталкивая его на поверхность забоя и таким образом снижая скорость бурения.

При прочих равных условиях распределение области максимального давления во многом зависит от ориентации резца *PDC*.

Например, чем больше величина переднего угла установки *PDC*, тем больше площадь распространения области максимального давления среды на рабочей поверхности резца [1]. В то же время необходимо учитывать свойства горной породы, влияющие на плотность образовавшейся под резцом среды, и частоту вращения инструмента, влияющую на скорость перемещения резца, которые в совокупности определяют величину давления жидкой среды под резцом.

Проведенные исследования показали, что при прочих равных условиях наибольшее гидравличе-

ское давление всегда наблюдается по внешнему диаметру долота (рис. 1, д), что объясняется увеличенной скоростью перемещения резцов в этой зоне, однако величина и характер распределения гидравлического давления под режущей поверхностью алмазных резцов может регулироваться ориентацией *PDC*. Уменьшение переднего угла установки резца *PDC* способствует снижению гидравлического давления в зоне контакта резца с горной породой. При этом следует учитывать размер *PDC*, а также размер промывочных каналов.

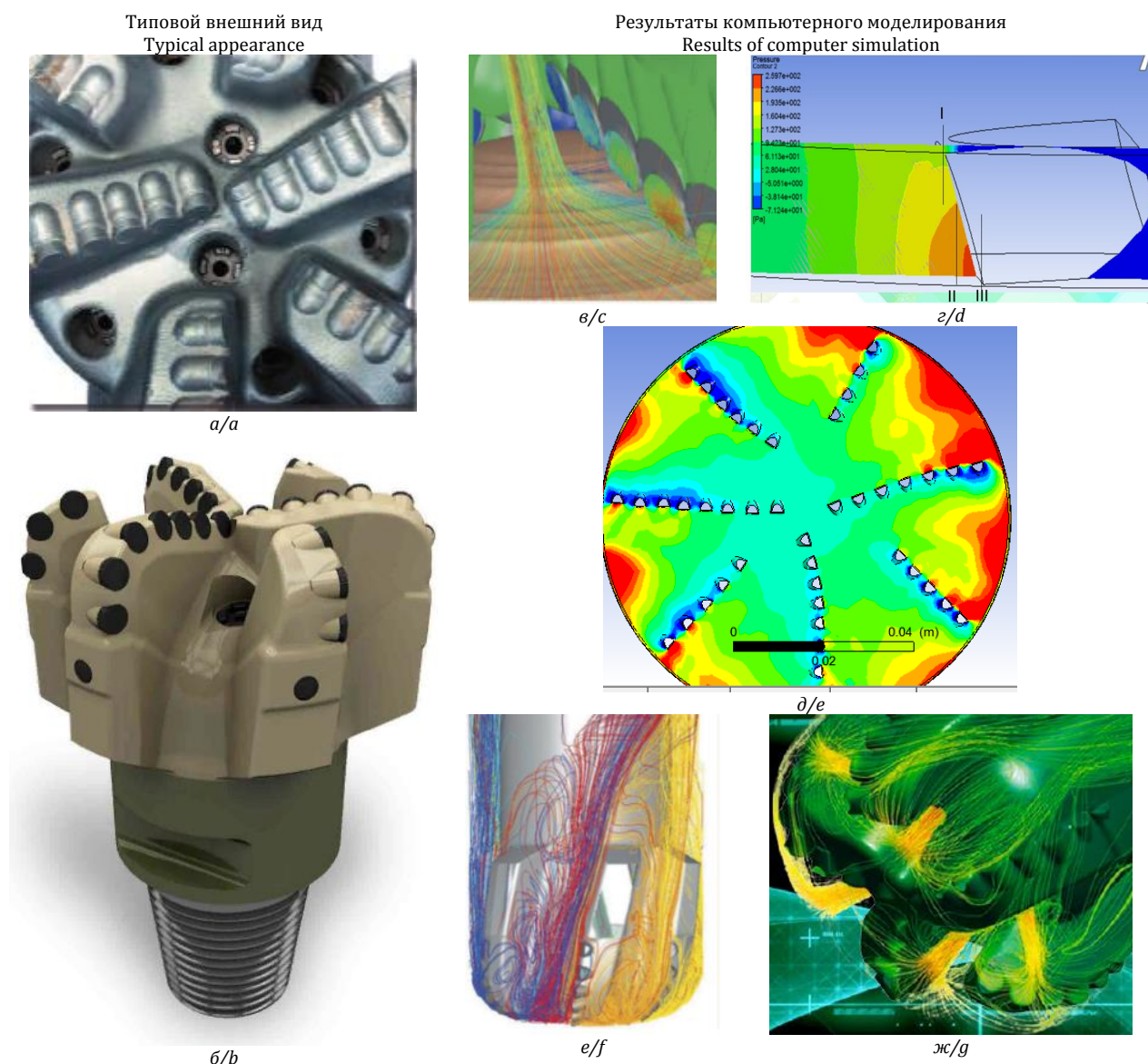


Рис. 1. Анализ типовых долот *PDC*: а) конструкция рабочего торца долота Smith Bits; б) общий вид; результаты компьютерного моделирования: в) линии тока в пределах рабочего ряда резцов [24]; г) давление жидкой среды под рабочей поверхностью *PDC*; д) гидравлическое давление на торце (красным обозначено максимальное значение) [27, 28]; е, ж) линии тока в процессе бурения скважины [26–28]

Fig. 1. Analysis of typical *PDC* bits: а) design of the Smith Bits bit working end; б) general view; results of computer simulation: в) streamlines within the working row of incisors [24]; г) liquid medium pressure under *PDC* working surface; д) hydraulic pressure within the radial row [27, 28]; е, ж) streamlines when drilling a well [26–28]

Конструкция долот *PDC* с размещением резцов непосредственно после промывочного канала (рис. 1) способствует концентрации потока промывочной жидкости перед рабочей поверхностью резца (рис. 1, *в*). Геометрия циркуляционной системы такого инструмента обеспечивает быстрый вынос шлама из-под режущей поверхности резца, что способствует снижению влияния разрушенной горной породы на свойства среды, образовавшейся под рабочей частью инструмента. Важное влияние в таких случаях оказывают свойства потока промывочной жидкости (направление, скорость, давление, плотность, вязкость и т. д.), в некоторой степени регулируемые размерами и формой промывочного канала.

При достаточных размерах канала основная часть промывочной жидкости установившимся течением проходит через промывочный канал без чрезмерных потерь, не создавая аномального давления (рис. 1, *е, ж*). Гидравлический поток в циркуляционной системе рассматриваемой конструкции алмазного инструмента претерпевает существенные изменения лишь в области изгиба лопастей (за счет местных сопротивлений), что учитывается формой лопасти долота и компенсируется геометрическими параметрами этой зоны инструмента. В таком случае циркуляции жидкости в призабойной зоне скважины решающую роль играет тип и количество гидравлических насадок [2, 31], размещаемых в буровом инструменте и способствующих изменению характера течения жидкости на забое. Однако износ резцов или изменение глубины их внедрения в горную породу снижают площадь проходного отверстия промывочного канала, повышая гидравлическое давление на забое.

В конструкциях долот или коронок секторного типа, где режущие элементы располагаются в несколько радиальных рядов (рис. 2, *а–в*), отсутствует возможность размещения гидравлических насадок или канавок, направляющих жидкость между рядами резцов. Такой инструмент имеет секторное строение с расположением промывочных каналов в межсекторном пространстве, и регулирование потока жидкости в данном случае возможно лишь путем изменения формы и размеров каналов, а также их количества.

В случае прямой схемы промывки основной поток жидкости из межтрубного пространства поступает во внутренние боковые каналы циркуляционной системы такого породоразрушающего инструмента. В этой зоне наблюдается разделение потока. Здесь при одном и том же объеме жидкости снижается площадь поперечного сечения проходного отверстия, что приводит к изменению параметров течения жидкости, т. е. за счет уменьшения размеров и увеличения количества каналов наблюдается

повышение скорости течения (рис. 2, *г, е*) и давления жидкости (рис. 2, *з*). Изменение скорости течения жидкости в этой зоне зависит от геометрии и количества боковых канавок и может возрастать более чем в 3–4 раза. Затем жидкость устремляется в торцевые промывочные каналы. Из-за резкого перехода от вертикального бокового канала в горизонтальный канал большего размера происходит максимальная деформация потока, что способствует возникновению больших показателей местного сопротивления и существенных потерей напора. Следует отметить, что характер течения жидкости в этой зоне зависит как от конструкции и размера каналов, так и от геометрии рабочего торца бурового инструмента и всегда является неустановившимся турбулентным, т. к. деформация потока связана с одновременным изменением формы сечения, скорости и направления потока.

Прямоугольная форма секторов способствует повышению турбулентности потока. Меньшие гидравлические сопротивления в этой зоне наблюдаются при использовании сектора в виде полусферы (рис. 2, *г, е*). При этом интенсивность образования вихрей определяется величиной радиуса закругления сектора, оказывающего влияние на деформацию потока. В торцевом промывочном канале турбулентность достигает таких значений, при которых вязкость проявляется незначительно. Согласно законам классической гидродинамики, коэффициент гидравлических сопротивлений в таком случае не зависит от показателя Рейнольдса и определяется геометрией потока [25].

При изучении зоны перехода жидкости из бокового в торцевой промывочный канал инструмента секторного типа на основании законов гидродинамики возникает предположение о том, что для снижения турбулентности в этой зоне применим принцип плавного входа с закруглением, способный, согласно результатам гидродинамических исследований, уменьшить за счет снижения деформации потока гидравлические сопротивления.

В то же время турбулентность потока в этой зоне отражается на качестве очистки забоя от шлама. Наличие турбулентности способствует интенсификации отрыва частиц разрушенной горной породы от массива.

Как показывают результаты компьютерного моделирования, при прочих равных условиях чем меньше длина сектора и, как следствие, больше количество каналов, тем скорость течения жидкости во внутренних боковых каналах и, соответственно, в торцевых каналах меньше. При этом чем больше длина сектора и меньше количество промывочных каналов, тем выше гидравлическое давление в промывочной системе породоразрушающего инструмента.

Режущие элементы первого ряда сектора такого алмазного инструмента, как правило, имеют отступ от торцевого промывочного канала (рис. 2, б, в), что необходимо для прочной их фиксации. При

этом чем дальше расположен резец от промывочного канала, тем меньше омывается плоскость его контакта с горной породой основным потоком промывочной жидкости (рис. 2, д, ж).

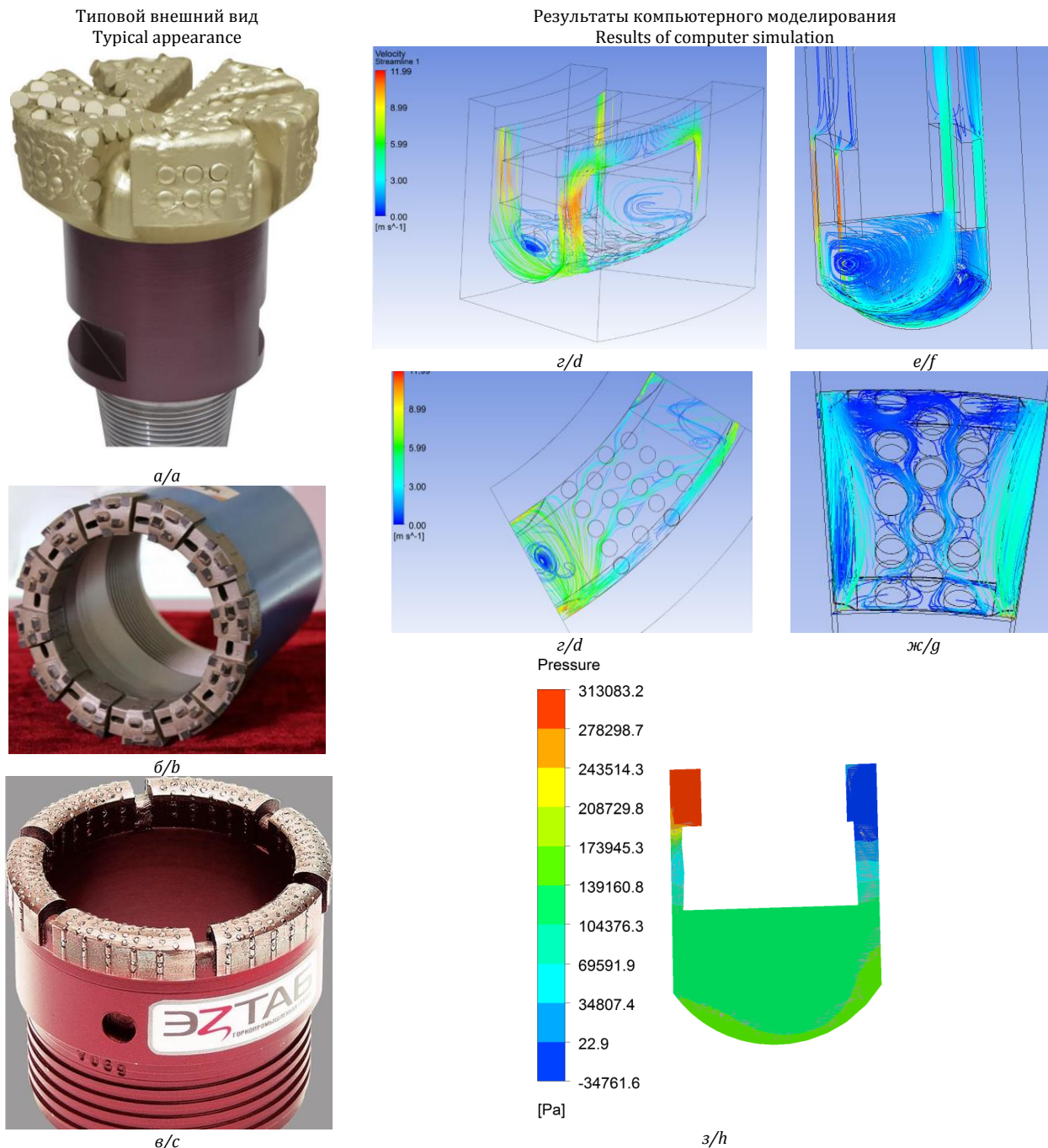


Рис. 2. Анализ инструмента секторного типа: а) зарезное долото типа PDC (ОАО Волгабурмаш); б) коронка TSP; в) однослойная коронка ЭзТАВ; результаты компьютерного моделирования: д) линии тока в пределах сектора; е) линии тока на рабочем торце инструмента; ж) линии тока в пределах укороченного сектора; з) давление в промывочном канале; 1 – внутренний боковой промывочный канал; 2 – торцевой промывочный канал

Fig. 2. Analysis of a sector type tool: а) PDC bit; б) TSP crown; в) single-layer crown; results of computer simulation: д) streamlines within a sector; е) streamlines at the working end of a tool; ж) streamlines within a shortened sector; з) streamlines at the working end of a shortened sector; г) pressure in the flushing channel; 1 – internal side flush channel; 2 – end flushing channel

Как показал проведенный анализ, проникновение потока промывочной жидкости под резец необходимо для улучшения результатов бурения. Возможность непосредственного контакта резца с промывочной жидкостью оказывает влияние на свойства жидкой среды и размер шламовой подушки под режущей поверхностью инструмента и дополнительное воздействие на разрушаемую породу.

Согласно результатам компьютерного моделирования, скорость течения жидкости перед резцом второго и последующего радиального ряда в малой

мере зависит от характера течения жидкости в торцевом промывочном канале инструмента (рис. 2, д и рис. 3, а, б). Анализ результатов моделирования показал, что на изменение скорости течения и давления жидкости в торцевой режущей зоне инструмента (под сектором) оказывают влияние частота вращения бурового инструмента, количество радиальных рядов в секторе, размер и форма резцов, а также расстояние от промывочного канала до резца (рис. 2, д, ж и рис. 3, а, б).

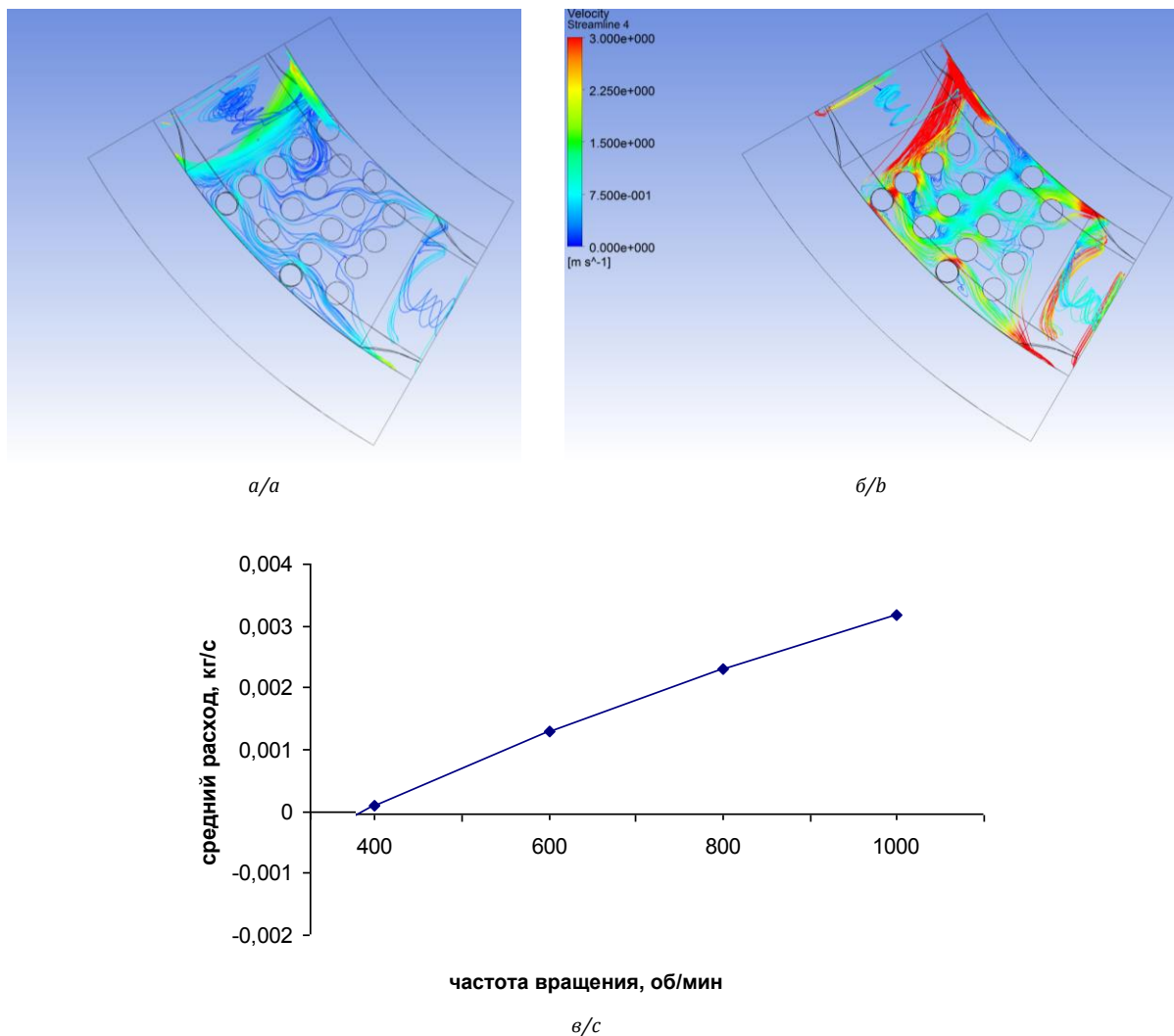


Рис. 3. Результаты исследования скорости течения жидкости на торце инструмента с радиальной раскладкой режущих элементов: а) при частоте вращения 200 об/мин; б) при частоте вращения 800 об/мин; в) график зависимости изменения среднего расхода жидкости под торцом сектора коронки от частоты вращения коронки (диаметр 93 мм, осевая нагрузка 20 кН, подача промывочной жидкости 40 л/мин); 1 – первый радиальный ряд (набегающая часть сектора); 2 – четвертый радиальный ряд (сбегающая часть сектора)

Fig. 3. Results of the study of the fluid flow rate at the end of the tool with a radial layout of the cutting elements: а) at rotation frequency of 200 rpm; б) at rotation frequency of 800 rpm; в) graph of dependence of the change in the average fluid flow under the end of the sector of the bit on rotation frequency of a bit (diameter of 93 mm, axial load 20 kN, flushing fluid supply 40 l/min); 1 – the first radial row (incoming part of the sector); 2 – the fourth radial row (running part of the sector)

Рассмотрим случай контакта бурового инструмента с забоем скважины без вращения. При этом промывочная жидкость, поступающая на забой, слабо или вовсе не проникает из торцевого канала в зазор между рабочим торцом сектора и забоем скважины и полностью уходит через наружные боковые каналы. Учитывая симметричность алмазного бурового инструмента, это можно объяснить равным давлением во всех торцевых каналах.

Расход жидкости под режущей поверхностью сектора можно рассчитать по формуле для потока в щели:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)a^3b}{12\mu L}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 – соответственно давление жидкости под набегающей частью и под сбегающей частью сектора, которое при отсутствии вращения собственно и определяется давлением в торцевых каналах бурового инструмента, находящихся по обе стороны от сектора; a , b и L – соответственно высота, ширина и длина зазора, определяемые конструкцией секторов и глубиной внедрения резцов в горную породу; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости.

В случае отсутствия вращения бурового инструмента, учитывая симметрию его конструкции, P_1 и P_2 всегда равны и определяются давлением в торцевых промывочных каналах. То есть разность $P_1 - P_2 = 0$, что, согласно выражению (1), подтверждает вывод об отсутствии течения жидкости под рабочим торцом инструмента.

В случае, когда осуществляется вращение бурового инструмента, течение жидкости под сектором можно рассмотреть как результат взаимного влияния фрикционного течения, вызванного перемещением нижнего торца сектора относительно забоя скважины и напорного течения, определяемого перепадом давления жидкости под сбегающей и набегающей частью сектора описанного выше. Учитывая направление движения каждого из течений, расход жидкости под сектором можно представить как:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)a^3b}{12\mu L} + \frac{vab}{2}, \quad (2)$$

где v – скорость перемещения сектора относительно забоя, определяемая величиной частоты вращения и диаметром инструмента.

Высота зазора a между рабочим торцом сектора и забоем скважины определяется размером и выпуском алмазных резцов, а также глубиной их внедрения в горную породу. Показатели этих параметров являются переменными в процессе бурения и зависят от степени износа резцов и изменения геологических условий.

Согласно результатам компьютерного моделирования, повышение частоты вращения инструмента способствует проникновению части промывоч-

ной жидкости из торцевого канала в зону второго и последующих рядов режущих элементов бурового инструмента (рис. 3). При этом, согласно выражению (2), при вращении инструмента под его рабочим сектором возникает не только фрикционный поток, но и в силу перераспределения гидравлического давления за счет перемещения сектора формируется напорное течение. В то же время, проникая под сектор, жидкость теряет энергию за счет обтекания резцов, встречающихся на ее пути (рис. 3, а, б). Поэтому чем дальше от торцевого промывочного канала находится резец (считая от набегающей части сектора), тем меньше расход жидкости в его пределах (рис. 3, а, б).

Все это объясняет тот факт, что чем длиннее сектор, тем меньше омываются промывочной жидкостью резцы последнего радиального ряда сектора. При прочих равных условиях снижение длины сектора способствует увеличению количества жидкости, поступающей к рабочей поверхности резцов (рис. 2, д, ж), даже при снижении скорости течения жидкости. Однако уменьшение длины сектора бурового инструмента может привести к ухудшению его прочностных характеристик и потерям в площади рабочей поверхности.

Одним из способов увеличения расхода жидкости под торцом инструмента может выступать изменение конструкции циркуляционной системы и геометрии сектора. Например, при размещении боковых промывочных каналов так, чтобы количество наружных боковых каналов промывочной системы бурового инструмента было в два раз меньше, чем внутренних (рис. 4) [29], создаются такие гидробарические условия, при которых увеличивается объем и скорость потока жидкости, проходящей под наиболее нагретой и загрязненной алмазосодержащей частью секторов коронки, что увеличивает ресурс инструмента за счет улучшенной очистки и охлаждения плоскости контакта резцов с горной породой.

А округление концов набегающей части сектора соответственно форме течения жидкости снизит потери активной жидкости, проникающей под рабочий торец.

Основываясь на вышесказанном, можно заключить, что чем меньше резец, тем меньше зазор между сектором и забоем скважины (параметр a в формулах (1), (2)), из-за чего напорное течение в этой зоне снижается, а при использовании импрегнированного инструмента и вовсе отсутствует. В таком случае влияние циркуляции промывочной жидкости на гидродинамические процессы, протекающие в рабочей зоне инструмента, незначительно. При бурении импрегнированным инструментом (при малых зазорах a) гидравлические процессы в этой зоне определяются свойствами жидкой среды, геометрией торца сектора и частотой вращения инструмента.

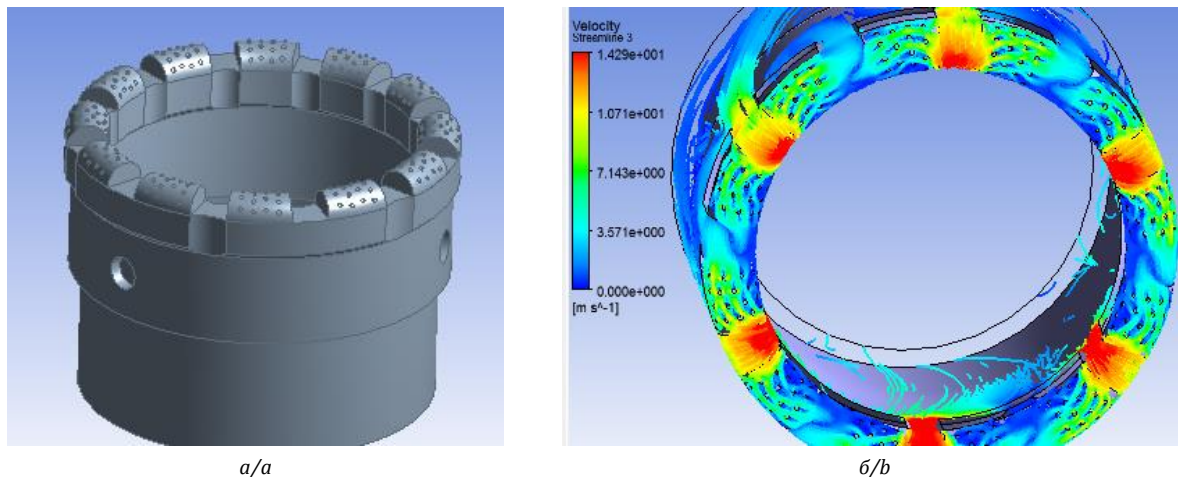


Рис. 4. Алмазная буровая коронка с развитой промывочной системой [29]: а) трехмерная модель; б) результаты моделирования гидродинамических процессов

Fig. 4. Diamond drill bit with a developed flushing system [29]: a) three-dimensional model; b) results of simulation of hydrodynamic processes

Выводы. Основные направления регулирования гидродинамических процессов путем изменения конструкции бурового инструмента

Разрабатываемая конструкция бурового инструмента должна способствовать улучшению реализации функций промывочной жидкости, что особенно актуально в зоне контакта режущей поверхности с горной породой. На этапе проектирования разрабатываемые конструкции следует разделять на типы геометрии торца: сферический, где каждый резец имеет возможность контакта с поступающей на забой промывочной жидкостью, и секторный, где резцы могут располагаться на разном расстоянии от промывочного канала инструмента.

При бурении долотами *PDC* типовой конструкции контакт резца с промывочной жидкостью определяется не только конструкцией промывочного канала, находящегося перед резцом, но и следующими факторами:

- глубиной внедрения резца в горную породу;
- физико-механическими свойствами разрушаемых горных пород;
- размером и ориентацией резца *PDC*.

Наиболее сложное течение жидкости в призабойной зоне наблюдается при бурении инструментом секторного типа. При этом можно выделить следующие основы регулирования гидродинамических процессов в призабойной зоне скважины путем изменения конструкции бурового инструмента:

- увеличение размеров торцевых промывочных каналов способствует снижению гидравлического давления на забое, однако при этом снижается перепад давления между внутренней и наружной частью породоразрушающего инструмента, влияющий на степень выноса шлама;
- снижение разности размеров боковых и торцевых промывочных каналов способствует стабилизации течения жидкости;
- применение принципа плавного входа с закруглением способствует стабилизации течения жидкости в призабойной зоне;
- форма и радиус закругления сектора влияет на интенсивность турбулентности жидкости в торцевом канале;
- чем меньше зазор между сектором и забоем скважины, тем больше влияние частоты вращения на гидравлические процессы, протекающие в зоне контакта режущей поверхности инструмента и забоя, что оказывает влияние на характер разрушения горной породы;
- в конструкциях бурового инструмента кольцевого секторного типа регулирование гидродинамических процессов в рабочей зоне возможно путем одновременного изменения количества и геометрии промывочных каналов.
- скругленные концы набегающей части сектора способствуют улучшению циркуляции жидкости под рабочим торцом инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескормных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом : монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 268 с.
2. Шмелев В.А. Экспериментальное исследование влияния параметров разрушения горных пород на эффективность бурения скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 10 (358). – С. 5–11. DOI: 10.33285/0130-3872-2022-10(358)-5-11.

3. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2002. – Vol. 39 (1). – P. 41–58.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2002. – Vol. 35 (3). – P. 141–160.
5. Vtorushin E.V., Dorovsky V.N. Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting. – San Francisco: ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. – Vol. 4. – 137 p.
6. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2008. – Vol. 45 (8). – P. 1347–1360.
7. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. – 2016. – Vol. 30 (2). – P. 145–164.
8. Борисов К.И. Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия типа PDC // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 161–164.
9. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
10. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2011. – Vol. 48 (3). – P. 434–442.
11. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 96–97. – P. 109–119.
12. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // *Measurement*. – 2018. – Vol. 121. – P. 344–354.
13. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2014. – Vol. 45. – P. 147–152.
14. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
15. Третьяк А.Я., Борисов К.А. Классификация поломок пластин PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин // *Результаты исследований–2020: Материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ)*. – Новочеркасск, 2020. – С. 252–254.
16. Нескормных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания–скалывания горной породы алмазным резцом // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.
17. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2019. – Vol. 113. – P. 11–23.
18. Drilling tools on frozen soils / I. Martyuchenko, M. Zenin, S. Ivanov, A. Kolesnikov // *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. – 2022. – № 10-1. – P. 59–65. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_59.
19. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – July 2020. – Vol. 190. – № 107120.
20. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, A. Fjaere, L. Paez, U. Tran // *Society of Petroleum Engineers. SPE Drilling Conference*. – Miami, Florida, USA, 2006. – P. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
21. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: rock cutting // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2013. – Vol. 37 (13). – P. 1913–1929.
22. Пушмин П.С., Рожков А.А. Задачи оптимизации параметров промывочных систем породоразрушающего инструмента // *Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. науч. тр.* – 2008. – Вып. 8. – С. 233–240.
23. Пушмин П.С. Факторы регулирования гидродинамических показателей для оптимизации процесса алмазного бурения // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН*. – 2010. – № 2 (37). – С. 167–172.
24. Жентичка М.В. Применение PDC долот Smith bits (Schlumberger) при бурении скважин на Ванкорском месторождении // *Инженерная практика*. – 2012. – № 10 – С. 54–58.
25. Газовая динамика. Механика жидкости и газа / В.С. Бекнев, В.М. Епифанов, А.И. Леонтьев и др. / под общ. ред. А.И. Леонтьева. – М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 1997. – 671 с.
26. Product Catalog. Smith bits. – France: Schlumberger Company, 2018. – 87 p.
27. Spear. Smith bits. – France: Schlumberger Company, 2012. – 12 p.
28. Каталог продукции. Успешный путь к недрам. – Уфа: Бурсервис. – 25 с. URL: https://www.burservice.ru/burservice_ru.pdf (дата обращения 04.07.2023).
29. Алмазная буровая коронка: пат. пат. № 2745546, Российская Федерация, С1; заявл.12.10.2020; опубл. 26.03.2021, Бюл. № 9. – 9 с.
30. Попова М.С., Харитонов А.Ю. Особенности проектирования работы режущей части алмазного бурового инструмента // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2023. – № 2 (362). – С. 5–10. DOI: 10.33285/0130-3872-2023-2(362)-5-10.
31. Сериков Д.Ю. Перспективная конструкция гидромониторной насадки шарошечного бурового инструмента // *Сфера. Нефть и Газ*. – 2022. – № 3 (86). – С. 72–78.

Информация об авторах

Марина Сергеевна Попова, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Сибирского федерального университета, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. alleniram83@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1462-8339>

Поступила: 05.07.2023

Прошла рецензирование: 12.07.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Neskormnih V.V., Popova M.S., Liu Baochang. *Destruction of rocks when drilling wells with diamond drilling tools: Monograph*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2020. 268 p. (In Russ.)
2. Shmelev V.A. Experimental study of the influence of rock destruction parameters on the efficiency of well drilling. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2022, no. 10 (358), pp. 5–11. (In Russ.) DOI: 10.33285/0130-3872-2022-10(358)-5-11.
3. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
5. Vtorushin E.V., Dorovsky V.N. *Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting*. San Francisco, ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. Vol. 4, 137 p.
6. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
7. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
8. Borisov K.I. Dynamics of work of cutters in the process of destruction of rocks by cutting-shearing tools of the PDC type. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 161–164. (In Russ.)
9. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. (In Russ.)
10. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
11. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
12. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.
13. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 147–152.
14. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
15. Tretyak A.Ya., Borisov K.A. Classification of PDC plate fractures caused by downhole vibrations during well drilling. *Research results-2020. Materials of the V National Conference of the teaching staff and researchers of the YRSPU (NPI)*. Novocherkassk, 2020. pp. 252–254. (In Russ.)
16. Neskormnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Influence of resistance forces on the depth of rock cutting-chipping by a diamond cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 40–48. (In Russ.)
17. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
18. Martyuchenko I., Zenin M., Ivanov S., Kolesnikov A. Drilling tools on frozen soils. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2022, no. 10-1, pp. 59–65. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_59.
19. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
20. Aslaksen H., Annand M., Duncan R., Fjaere A., Paez L., Tran U. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization. *Society of Petroleum Engineers. SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006. pp. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
21. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.
22. Pushmin P.S., Rozhkov A.A. Problems of optimizing the parameters of flushing systems of rock cutting tools. *Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research*, 2008, vol. 8, pp. 233–240. (In Russ.)
23. Pushmin P.S. Factors regulating hydrodynamic parameters for optimizing the process of diamond drilling. *Proceedings of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2010, no. 2 (37), pp. 167–172. (In Russ.)
24. Zhentichka M.V. Use of Smith bits (Schlumberger) PDC bits in well drilling at the Vankor field. *Engineering practice*, 2012, no. 10, pp. 54–58. (In Russ.)

25. Beknev V.S., Epifanov V.M., Leontiev A.I. *Gas dynamics. Mechanics of liquid and gas*. Moscow, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman Publ., 1997. 671 P. (In Russ.)
26. *Product Catalog. Smith bits*. France, Schlumberger Company, 2018. 87 p.
27. *Spear. Smith bits*. France, Schlumberger Company, 2012. 12 p.
28. *Product catalog. Successful path to the subsoil*. Ufa, Burservis Publ. 25 p. (In Russ.) Available at: https://www.burservice.ru/burservice_ru.pdf (accessed 04 July 2023).
29. Neskromnih V.V., Popova M.S., Birzyukov A.A. *Diamond drill bit*. Patent RF, no. 2745546, 2021.
30. Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Features of designing the operation of the cutting part of a diamond drilling tool. *Construction of oil and gas wells on land and offshore*, 2023, no. 2 (362), pp. 5–10. (In Russ.)
31. Serikov D.Yu. Promising design of a hydraulic monitor attachment for a roller-cone drilling tool. *Sphere. Oil and gas*, 2022, no. 3 (86), pp. 72–78. (In Russ.)

Information about the authors

Marina S. Popova, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russian Federation. alleniram83@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1462-8339>

Received: 05.07.2023

Revised: 12.07.2023

Accepted: 22.03.2024

УДК 665.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

Шифр специальности ВАК: 2.00.13

Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при совместной переработке вакуумного газойля и низкомаржинальных потоков нефтепереработки

Г.Ю. Назарова[✉], Е.Н. Ивашкина, Б.Д. Нафо, В.В. Мальцев, Т.А. Шафран

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]silko@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследований, связанных с расширением ресурсов сырья каталитического крекинга, обусловлена как потребностью в интенсификации процесса для увеличения выхода целевых продуктов (высокооктановый бензин, легкие олефины), так и в повышении глубины переработки нефти и утилизации низкомаржинальных потоков на нефтеперерабатывающих заводах. Поэтому существует острая необходимость в создании математических инструментов для прогнозирования и оптимизации процессов каталитического крекинга при изменении режимов и качества сырья, а также планировании производства, что требует детального исследования состава вовлекаемых в переработку нефтяных фракций, термодинамических и кинетических закономерностей гетерогенного процесса. Разработка и применение математической модели процесса каталитического крекинга, учитывающей состав и свойства вовлекаемых компонентов в переработку, позволяет количественно оценить выход и качество целевых и побочных продуктов в зависимости от состава и физико-химических свойств смесового сырья и параметров технологического режима с оценкой возможности их переработки на действующем промышленном объекте. **Целью** работы является экспериментальное исследование состава и свойств смесового сырья каталитического крекинга на базе вакуумного газойля, содержащего от 5 до 20 мас. % экстракта селективной очистки масел, деасфальтизата и потоков гачей дистилятного и остаточного, и прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при их совместной переработке с применением математической модели. **Методы:** методы жидкостной хроматографии для исследования состава смесового сырья процесса каталитического крекинга в сочетании с рядом стандартных методов определения физико-химических свойств. **Результаты.** С применением комплекса экспериментальных исследований установлены закономерности изменения состава и физико-химических свойств компонентов и смесового сырья каталитического крекинга, содержащего от 5 до 20 мас. % гачей дистилятного и остаточного, деасфальтизата и экстракта. Полученные результаты использованы при разработке математической модели гетерогенного каталитического процесса крекинга смесового сырья, учитывающей состав вовлекаемых в переработку нефтяных фракций и закономерности дезактивации катализатора под действием кокса. С применением математической модели установлены закономерности изменения состава и выхода продуктов процесса при вовлечении в переработку 5–20 мас. % гача дистилятного и экстракта селективной очистки масел в смеси с вакуумным дистилятом. Разработаны практические рекомендации по возможности расширения ресурсов углеводородного сырья процесса каталитического крекинга с учетом топливного или нефтехимического режима.

Ключевые слова: каталитический крекинг, смесовое сырье, вакуумный дистилят, гач, деасфальтизат, экстракт, математическое моделирование

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 22-79-00238. <https://rscf.ru/project/22-79-00238/>

Для цитирования: Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при совместной переработке вакуумного газойля и низкомаржинальных потоков нефтепереработки / Г.Ю. Назарова, Е.Н. Ивашкина, Б.Д. Нафо, В.В. Мальцев, Т.А. Шафран // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 172–184. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

UDC 665.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

Prediction of catalytic cracking performance during co-processing of vacuum gas oil and low-margin oil refining streams

G.Y. Nazarova✉, E.N. Ivashkina, B.J. Nafo, V.V. Maltsev, T.A. Shafran

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ silko@tpu.ru

Abstract. Relevance. Expansion of catalytic cracking feedstock resources both due to the need to intensify the process to increase the yield of target products (high-octane gasoline, light olefins) and to deepen oil refining through the utilization of low-margin streams at refineries. Along with this, there is an urgent need to develop domestic mathematical tools for predicting and optimizing the catalytic cracking when the modes and feedstock qualities changes, as well as planning of production. This requires in-depth analysis and detailed study of the composition of oil fractions involved in processing and thermodynamics and kinetics of a heterogeneous process. The development and application of a mathematical model of the catalytic cracking, taking into account the composition and properties of the components involved in processing, makes it possible to quantitatively assess the yield and quality of target and by-products depending on the composition, physicochemical properties of the mixed feedstock, and the parameters of the technological regime, with an assessment of the possibility of their processing at an existing industrial facility. **Aim.** Experimental study of the composition and properties of mixed feedstock of catalytic cracking based on vacuum gas oil containing 5 to 20 wt % of extract of deasphalted oil, distillate, residual slack wax, and prediction of the catalytic cracking indicators during their co-processing using a mathematical model. **Methods.** Liquid chromatography method to study the composition of feedstock materials of the catalytic cracking in combination with a number of standard methods for determining physico-chemical properties. **Results.** Using a set of experimental studies, the authors have established the patterns of changes in the composition and physico-chemical properties of the components and mixed feedstock of catalytic cracking containing 5–20 wt % of distillate and residual slack wax, deasphalted oil, and extract. The results obtained were used in development of a mathematical model of the heterogeneous catalytic cracking of feedstock, which takes into account the composition of oil fractions involved in processing and the patterns of catalyst deactivation by coke. Using a mathematical model, the authors established the patterns of changes in the composition and yield of process products when 5–20 wt % were involved in processing distillate slack wax and extracts of selective cleaning of oils mixed with vacuum distillate. Practical recommendations were developed on the possibility of expanding the hydrocarbon feedstock of the catalytic cracking, taking into account the fuel or petrochemical regime.

Keywords: catalytic cracking, mixed feedstock, vacuum distillate, slack wax, deasphalted oil, extract, mathematical modeling

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant (project no. 22-79-00238).

For citation: Nazarova G.Yu., Ivashkina E.N., Nafo B.J., Maltsev V.V., Shafran T.A. Prediction of catalytic cracking performance during co-processing of vacuum gas oil and low-margin oil refining streams. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 172–184. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

Введение

Оптимизация технико-экономических показателей нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) и повышение глубины переработки нефти являются ключевыми задачами современной нефтеперерабатывающей промышленности [1]. На российских и зарубежных НПЗ применяют технологию каталитического крекинга, обеспечивающую углубление переработки нефти и производство высокооктанового компонента товарного бензина, пропан-пропиленовую фракцию (ППФ) и бутан-бутиленовую фракцию (ББФ) с использованием цеолитсодержащих катализаторов. Сырьем процесса являются высокомолекулярные нефтяные фрак-

ции, как вакуумные газойли, так и остаточное нефтяное сырье. Учитывая широкое введение комплексов глубокой переработки нефти на НПЗ на базе гидрокрекинга, возникает необходимость расширения сырьевой базы углеводородного сырья. По этой причине повышается интерес к переработке и оптимизации смесового сырья процесса при вовлечении в переработку низкомаржинальных потоков [1].

Для повышения глубины переработки нефтяного сырья и повышения эффективности процессов [1–3] в переработку вовлекают не только вакуумные газойли с температурой кипения 370–540 °С, но и другие нефтяные фракции, такие как: дистил-

ляты смазочных масел, атмосферные газойли, потоки с установок замедленного коксования, остатки гидрокрекинга, среднедистиллятные фракции нефти, парафиновые гачи, деасфальтизированные нефтяные остатки, растительное сырье, рафинат, олефины C5–C8, петролатум и др. [4–12]. Это, с одной стороны, обеспечивает расширение ресурсов сырья каталитического крекинга и интенсификацию процесса для увеличения выхода целевых продуктов (высокооктановый бензин, легкие олефины, легкий газойль) и, с другой стороны, повышает глубину переработки нефти и утилизацию низкомаржинальных потоков на НПЗ.

Вместе с тем использование в переработке остаточного нефтяного сырья требует оптимизации температурного режима процесса или даже изменения конструктивных особенностей аппаратов, так как в составе присутствует высокое количество ароматических углеводородов и смолистых компонентов, содержащих тяжелые металлы. Это связано с тем, что конверсия сырья может ограничиваться избыточным коксообразованием и дезактивацией катализатора, в том числе термохимическими показателями процесса окисления кокса, при переработке высокоароматизированного сырья.

Сегодня технология каталитического крекинга внедрена на 15 НПЗ Российской Федерации и представлена как установками первого–третьего поколений, так и внедренными (2006–2021 гг.) и строящимися объектами (до 2023–2026 гг.). Вместе с тем при эксплуатации каждого промышленного объекта требуется непрерывная оптимизация как теплового режима работы реактора и регенератора в условиях изменения состава сырья и дезактивации катализатора, так и состава сырья, направляемого на переработку с целью обеспечения топливного или нефтехимического режимов.

Поэтому существует острая необходимость в создании математических инструментов для оптимизации процессов каталитического крекинга, прогнозирования показателей при изменении режимов и качества сырья, а также планирования производства [13], что требует детального исследования состава вовлекаемых в переработку нефтяных фракций, термодинамических и кинетических закономерностей гетерогенного процесса.

Целью работы является экспериментальное исследование состава и свойств смесового сырья каталитического крекинга на базе вакуумного газойля, содержащего от 5 до 20 % экстракта селективной очистки масел, деасфальтизата и потоков гачей дистиллятного и остаточного, и прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при их совместной переработке с использованием математической модели.

Задачи работы включают определение состава и физико-химических свойств потоков, являющихся потенциальным сырьем установки каталитического крекинга, и установление закономерностей изменения состава и свойств смесового сырья в зависимости от типа и количества вовлекаемых в переработку потоков, а также установление закономерностей изменения выхода и состава продуктов процесса при вовлечении на установку каталитического крекинга смесового сырья.

Методы исследования

Определение состава нефтяного сырья и его компонентов

Определение количественного группового химического состава тяжелых нефтяных фракций с температурой кипения выше 300 °C было выполнено на хроматографе «Градиент-М» методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением. В качестве неподвижной фазы использован силикагель АСКГ с размером частиц 63–100 мкм, подвижной фазой являлся многокомпонентный элюент в соответствии с документацией на прибор.

Определение физико-химических свойств смесового сырья и его компонентов

Для исследования физико-химических свойств компонентов сырья процесса каталитического крекинга использован ряд методов. Плотность, кинематическая и динамическая вязкость определены в соответствии с ASTM D7042-16 «Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity)». Показатель преломления определен по ГОСТ 18995.2-73 «Метод определения показателя преломления (Продукты химические жидкие)» с использованием рефрактометра Atago NAR-3T (диапазон измерения показателя преломления 1,3–1,7 nD, точность измерений $\pm 0,0001$ nD, температура 5–50 °C, точность измерений $\pm 0,2$ °C). Для определения молекулярной массы образцов смесового сырья и его компонентов использован криоскопический метод с применением лабораторного оборудования КРИОН-1 (точность температурных измерений составляет 0,001 °C, показатель точности ± 9 %) в бензоле в соответствии с ОСТ 153-39.2-048. Массовая доля серы в образцах определена в соответствии с ГОСТ 53203-2022 «Нефть и нефтепродукты. Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии» с использованием анализатора серы «СПЕКТРОСКАН SL» (рабочий диапазон концентраций серы 0,0007–5,0 %, нижний предел обнаружения серы 0,0005 %).

Приготовление образцов смесового сырья процесса каталитического крекинга

В качестве компонентов для приготовления смесового сырья каталитического крекинга были использованы: вакуумный дистиллят, экстракты, деасфальтизаты, гачи дистиллятные и гачи остаточные. Образцы смесового сырья каталитического крекинга, содержащего 5–20 мас. % гача дистиллятного, гача остаточного, деасфальтизата и экстракта, были приготовлены в лаборатории с применением мешалки магнитного типа в условиях нагревания до 50 °С при 100 об/мин в течение 20 минут.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментального исследования состава и свойств образцов смесового сырья процесса каталитического крекинга и его компонентов

При переработке смесового углеводородного сырья каталитического крекинга должен быть проанализирован состав и физико-химические свойства как компонентов, входящих в его состав, так и образцов приготовленных смесей. В табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования образцов смесового сырья и его компонентов. Согласно полученным данным вакуумный дистиллят характеризуется: высоким содержанием насыщенных углеводородов – 60,6 мас. %, общее содержание ароматиче-

ских углеводородов и смолистых соединений – 33,5 и 5,9 мас. %, соответственно. Наибольшее содержание ароматических углеводородов характерно для экстракта и деасфальтизата (38,4–59,8 мас. %), при этом данные компоненты характеризуются наибольшей величиной полиароматических углеводородов и смол (33,0–18,7 и 7,4–9,2 мас. %, соответственно). Вместе с тем наиболее насыщенным компонентом сырья крекинга является гач дистиллятный, в котором содержание насыщенных углеводородов составляет 99,4 мас. %. Важно учитывать, что гач остаточный, в отличие от гача дистиллятного, характеризуется высоким содержанием ароматических углеводородов и смолистых соединений – 13,1 и 3,0 мас. %, соответственно.

Закономерности изменения состава и свойств смесового сырья при добавлении гачей, деасфальтизата и экстракта в различных соотношениях к вакуумному дистилляту

Основная проблема смешения «темных» фракций связана с нелинейным и неаддитивным характером изменения их свойств. Представление о нефти и продуктах ее переработки как о дисперсных системах во многом уточняет и позволяет прогнозировать их поведение и пути интенсификации интересующих процессов [1, 14–16].

Таблица 1. Результаты по определению состава и свойств смесового сырья каталитического крекинга и его компонентов

Table 1. Results for determining the composition and properties of mixed catalytic cracking feedstock and its components

Состав и свойства Composition and properties	НУВ SH	ЛАУВ LAN	САУВ MAN	ТАУВ, НАН	БС BR	СБС, ABR	S	ρ_4^{20}	ММ, г/моль MW g/mol	ν , мм ² / mm ²	n (20 °C)
	мас. % /wt %										
ВД/VD	60,6	12,0	7,8	13,7	2,5	3,4	0,9655	0,9107	377,6	33,062	1,5098
ГД/SWD	99,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0029	0,8845	766,40	–	1,4555
ГО/RSW	83,9	8,4	1,6	3,4	1,2	1,9	0,1147	0,8913	709,70	–	1,4859
ДА/DAO	54,2	12,9	6,8	18,7	4,0	3,4	1,5011	0,9153	503,50	380,29	1,5147
Э/Е	31,1	14,5	12,3	33,0	3,8	5,4	1,5417	0,9763	378,10	118,90	1,5494
ВД+ГД (5 %)/VD+SWD (5 %)	67,4	11,4	6,0	10,7	1,5	3,1	0,953	0,903	250,94	–	1,5077
ВД+ГД (10 %)/VD+SWD (10 %)	74,2	9,4	4,6	7,9	1,4	2,5	0,910	0,8997	366,7	–	1,5047
ВД+ГД (15 %)/VD+SWD (15 %)	78,4	7,5	4,0	7,1	1,0	2,0	0,842	0,8923	155,38	–	1,5013
ВД+ГД (20 %)/VD+SWD (20 %)	80,5	6,7	3,6	6,7	0,8	1,7	0,815	0,8869	400,59	–	1,4979
ВД+ГО (5 %)/VD+RSW (5 %)	62,2	13,4	6,5	12,0	2,0	3,9	0,973	0,9066	383,21	–	1,5089
ВД+ГО (10 %)/VD+RSW (10 %)	63,2	12,8	6,3	11,2	1,8	3,9	0,898	0,9038	429,71	–	1,5069
ВД+ГО (15 %)/VD+RSW (15 %)	66,0	11,2	6,2	11,0	1,8	3,8	0,924	0,9008	352,94	–	1,5059
ВД+ГО (20 %)/VD+RSW (20 %)	67,6	10,1	5,9	10,9	1,9	3,6	0,865	0,8991	328,14	–	1,5041
ВД+ДА (5 %)/VD+DAO (5 %)	59,8	15,2	6,2	12,3	2,4	4,3	0,987	0,9097	376,47	36,257	1,5107
ВД+ДА (10 %)/VD+DAO (10 %)	58,7	14,5	5,3	14,7	2,6	4,3	1,001	0,9102	401,88	41,682	1,5109
ВД+ДА (15 %)/VD+DAO (15 %)	58,2	14,7	6,4	13,6	2,3	4,7	1,019	0,9108	315,97	43,344	1,5113
ВД+ДА (20 %)/VD+DAO (20 %)	57,2	13,7	7,3	14,6	2,5	4,8	1,031	0,9111	309,76	47,493	1,5121
ВД+Э (5 %)/VD+E (5 %)	58,0	14,2	6,7	14,4	2,7	4,0	1,022	0,9121	351,76	34,476	1,5126
ВД+Э (10 %)/VD+E (10 %)	56,8	14,3	6,9	15,1	2,8	4,1	1,047	0,9149	338,89	36,403	1,5145
ВД+Э (15 %)/VD+E (15 %)	54,9	14,3	7,3	16,1	2,8	4,6	1,074	0,9182	406,04	38,633	1,5155
ВД+Э (20 %)/VD+E (20 %)	53,6	14,3	7,6	16,8	2,7	5,0	1,101	0,9209	363,60	41,998	1,5179

НУВ – насыщенные углеводороды; ЛАУВ, САУВ, ТАУВ – легкие, средние, тяжелые ароматические углеводороды соответственно; БС, СБС – бензолные и спиртобензолные смолы соответственно; ММ – молекулярная масса; ν – кинематическая вязкость при 50 °С; S – содержание серы; n – показатель преломления; ВД – вакуумный дистиллят; ГД – гач дистиллятный; ГО – гач остаточный; ДА – деасфальтизат; Э – экстракт.

SH – saturated hydrocarbons; LAN, MAN, HAN – light, middle, heavy aromatic hydrocarbons; BR, ABR – benzene resin and alcohol-benzene resin; MW – molecular weight; ν – kinematic coefficient of viscosity at 50°C; S – sulphur content; n – refraction index; VD – vacuum distillate; SWD – slack wax distillate; RSW – residual slack wax; DAO – deasphalted oil; E – extract.

При смешивании дистиллятного гача и остаточного гача с вакуумным газойлем содержание насыщенных углеводородов в смеси увеличивается в обоих случаях, причем при добавлении гача дистиллятного более интенсивно (на 13,1 мас. %), в отличие от добавки гача остаточного (на 5,4 мас. %), который характеризуется большим количеством ароматических компонентов, согласно данным табл. 1. Количество ароматических и смолистых компонентов в общем случае снижается вследствие разбавления вакуумного газойля высоконасыщенным потоком. Снижение содержания этих групп более интенсивно при добавлении гача дистиллятного, что связано с его химическим составом и меньшим содержанием ароматических компонентов. Более того, при смешивании дистиллятного гача в соотношении от 5–20 % с вакуумным газойлем содержание ароматических и смолистых веществ резко снижается на 11,1 и 2,1 % и 5,0 и 0,4 %, соответственно, – при добавлении гача дистиллятного и остаточного, соответственно.

При смешении деасфальтизата и экстракта в соотношении 5–20 мас. % с вакуумным дистиллятом содержание насыщенных углеводородов в смеси уменьшается на 2,6 и 4,4 мас. %, соответственно, что связано с меньшим содержанием насыщенных углеводородов в потоке экстракта (31,1 мас. %). Причем при добавлении 5 мас. % экстракта полученная смесь близка по составу и свойствам к исходному вакуумному дистилляту. При добавлении 10–20 мас. % экстракта полученная смесь значительно отличается составом и физико-химическим свойствам от исходного вакуумного дистиллята. При переработке сырья, содержащего 5–20 мас. % экстракта в смеси с вакуумным дистиллятом, имеется склонность к коксообразованию из-за высокого содержания смолистых соединений ($>6,7$ мас. %). Общее содержание ароматических и смолистых соединений в смесевом сырье более значительно возрастает при добавлении высокоароматизированного компонента экстракта (на 3,4 и 1,0 мас. %) и отличается от исходного вакуумного дистиллята на 11,3–14,7 и 0,8–1,8 мас. %, соответственно. Увеличение содержания этих групп при добавлении 5–20 мас. % деасфальтизата составило 1,9 и 0,7 мас. %, соответственно.

Содержание легкой ароматики возрастает на 1,7–3,2 и 2,2–2,4 мас. % при добавлении деасфальтизата и экстракта к вакуумному газойлю. При этом наблюдается некоторое возрастание содержания легкой ароматики при добавлении 15 % деасфальтизата, содержание легкой ароматики при добавлении 5–20 % экстракта практически не изменяется.

При увеличении содержания гача дистиллятного и остаточного общее содержание смол в смесе-

вом сырье снижается с различной интенсивностью и возрастает при увеличении содержания деасфальтизата и экстракта в количестве 15–20 мас. %. Вовлечение такого вида сырья на установку каталитического крекинга может быть благоприятным для увеличения октанового числа бензина, при этом значительно увеличится склонность его к коксообразованию из-за высокого содержания смол ($>6,7$). Более того, в таких потоках важно оценить изменение содержания тяжелых металлов для предотвращения необратимой дезактивации катализатора крекинга и выбора оптимального количества добавляемого компонента.

При смешении нефтепродуктов, существенно различающихся по плотности, имеется возможность проявления эффекта «потери объема при смешении» [1, 14–19]. Изменения плотностей смесевое сырье, содержащего 5–20 мас. % гачей дистиллятных и остаточных, деасфальтизата и экстракта в вакуумном дистилляте в зависимости от содержания в смеси парафино-нафтяных и ароматических углеводородов, приведены на рис. 1, а–г.

Характер установленных изменений физико-химических свойств показал, что при увеличении содержания насыщенных углеводородов в сырье, содержащем гач дистиллятный и остаточный, деасфальтизат и экстракт в смеси с вакуумным дистиллятом, плотность полученной смеси снижается, в то время как при увеличении содержания ароматических углеводородов плотность смеси увеличивается, при этом зависимость плотности смеси носит нелинейный характер. Интенсивность снижения плотности более высока при добавлении к вакуумному газойлю гача дистиллятного, при увеличении доли гача дистиллята с 5–20 % плотность полученной смеси уменьшилась с 0,903 до 0,887 г/см³ и отличалась от расчетной с учетом доли компонентов на 0,72–2,6 кг/м³.

Вязкость нефтепродуктов обусловлена взаимодействиями между единицами вязкого течения. Параметры вязкого течения зависят от строения, состава и размеров фазовых частиц, вследствие чего характер изменения вязкостных показателей отражает совокупность структурных изменений, происходящих в системе при смешении [15]. Результаты изменения кинематической вязкости смеси вакуумного дистиллята с 5–20 % мас. деасфальтизатом и экстрактом приведены на рис. 3. При увеличении содержания деасфальтизата с 5–20 мас. % в вакуумном дистилляте кинематическая вязкость при 50 °C полученной смеси возрастает с 36,257 до 47,493 мм²/с, а при увеличении содержания экстракта с 5–20 мас. % кинематическая вязкость полученной смеси возрастает с 34,476 до 41,998 мм²/с.

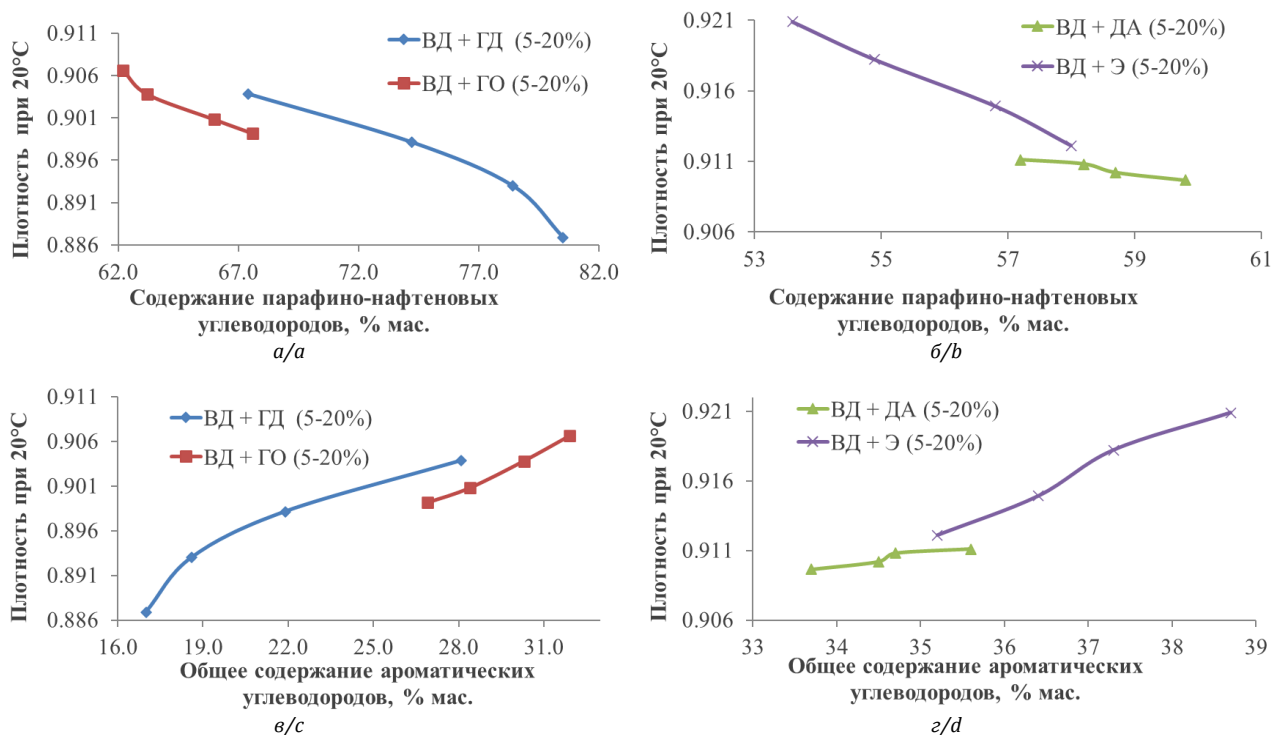


Рис. 1. Зависимости плотности смешанного сырья при добавлении гача дистиллятного и гача остаточного (а), десафальтизата и экстракта (б) к вакуумному дистилляту от содержания парафино-нафтеновых углеводородов, гача дистиллятного и гача остаточного (в), десафальтизата и экстракта (г) к вакуумному дистилляту от содержания ароматических углеводородов

Fig. 1. Dependence of mixed feedstock density when adding distillate slack wax and residual slack wax (a), desphalted oil and extract (b) to a vacuum distillate on the content of paraffin-naphthenic hydrocarbons, slack wax distillate and residual slack wax (c), desphalted oil and extract (d) to vacuum distillate on aromatic hydrocarbon content

Математическая модель процесса каталитического крекинга

На основании результатов экспериментального исследования состава сырья и продуктов процесса разработана новая реакционная схема процесса каталитического крекинга (рис. 2), отличающаяся от разработанной ранее [18] учетом химических превращений компонентов высокомолекулярных и среднестиллятных нефтяных фракций и основных классов сернистых соединений. Тем самым обеспечивается чувствительность модели к составу вовлекаемых в переработку компонентов и смешанного сырья.

Математическая модель, описанная уравнением (1), представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентраций компонентов и температуры процесса по длине лифт-реактора с учетом изменения объема реакционной смеси и активности катализатора. Лифт-реактор моделируется как реактор идеального вытеснения, поскольку скорость газа находится в диапазоне ~3,2–9,2 м/с, что значительно превышает начальную скорость псевдоожижения,

а число диффузии Пекле стремится к бесконечности:

$$\begin{cases} q \frac{dc_i}{dt} + C_i \frac{dq}{dt} = A_t \sum_{j=1}^n (\pm \psi \cdot r_j) \\ q \rho C_p \frac{dT}{dt} = A_t \sum_{j=1}^n (\pm \psi \cdot (\Delta_r H_T^0) \cdot r_j) \end{cases} \quad (1)$$

начальные условия $T_0 = T_{н.р.}$, $C_i = C_0$, где C_i – концентрации i -ой группы углеводородов, моль/м³; l – длина реактора, с; j – порядковый номер; ψ – параметр дезактивации катализатора [19, 20]; T – температура потока, К; ρ , C_p – плотность и теплоемкость потока, кг/м³, кДж/кг·К, соответственно; $(\Delta_r H_T^0)$, – тепловой эффект реакции в прямом и обратном направлениях, кДж/моль; q – объемный расход; A_t – площадь поперечного сечения реактора идеального вытеснения.

С использованием модели проведены прогнозные расчеты по влиянию состава образцов смешанного сырья, установленного в ходе проведения лабораторных испытаний. Сырье представляет собой смесь вакуумного дистиллята и добавки 5–20 мас. % гача дистиллятного и экстракта селективной очистки масел.

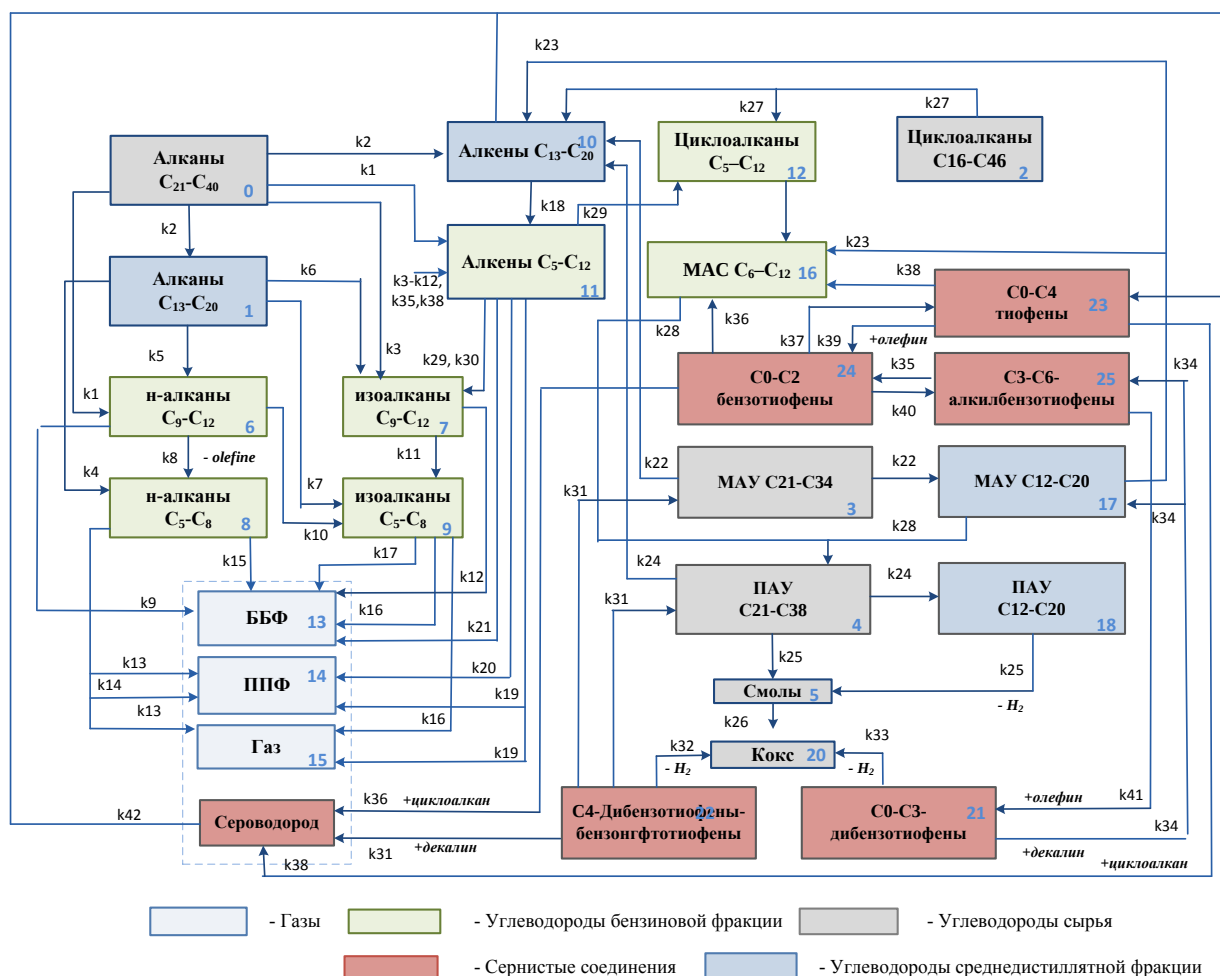


Рис. 2. Реакционная схема каталитического крекинга
 Fig. 2. Reaction scheme of catalytic cracking

Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку вакуумного дистиллята и гача дистиллятного и изменении температуры крекинга

Для проведения расчетов использованы потоки 100 мас. % вакуумного дистиллята (Сырье № 1), смеси вакуумного дистиллята и 20 мас. % дистиллятного гача (Сырье № 2) и 10 мас. % дистиллятного гача (Сырье № 3). Сырье № 1 содержит наименьшее количество насыщенных углеводородов – 60,6 мас. %, 33,5 мас. % ароматических углеводородов и 5,9 мас. % смолистых соединений. Сырье № 2 содержит наибольшее количество насыщенных углеводородов – 80,5 мас. %, ароматических углеводородов – 17 мас. % и смолистых соединений – 2,5 мас. %.

На исследуемой установке каталитического крекинга фактическая загрузка составляет 82,36 % от максимальной (5000 т/сут). Для обеспечения производительности установки по сырью выполнены прогнозные расчеты с применением математи-

ческой модели с целью определения целесообразности вовлечения и оптимального соотношения компонентов в смесевом сырье, содержащем вакуумный дистиллят и парафиновые гачи. Влияние состава смесового сырья при вовлечении в переработку гача дистиллятного на выход целевых продуктов процесса каталитического крекинга при прочих равных условиях показано (температура крекинга 528 °C) на рис. 3 и в табл. 2.

Модельные расчеты показали, что при крекинге Сырья № 1 обеспечивается наименьший выход легких олефинов (9,77 мас. % ББФ и 4,58 мас. % ППФ) и бензина (48,2 мас. %) с высоким октановым числом по исследовательскому методу (ОЧи) – 93,7 ед. за счет соответствующего содержания аренов.

Крекинг Сырья № 2 приводит к увеличению выхода бензина до 52,55 % мас., при этом наблюдается значительное снижение ОЧи бензина (89,5 ед.) за счет снижения содержания аренов в смесевом потоке. Переработка данного сырья характеризуется наибольшим выходом легких олефинов (12,8 мас. % ББФ и 6,18 мас. % ППФ).

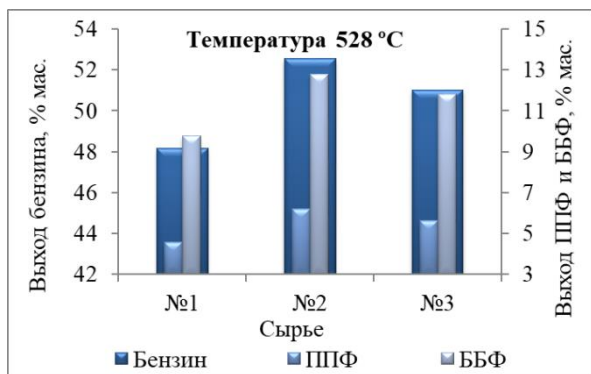


Рис. 3. Влияния состава смеси сырья на выход целевых продуктов процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку гача дистиллятного

Fig. 3. Influence of the mixed feedstock composition on the yield of target products of the catalytic cracking when involving slack wax distillate into processing

При крекинге Сырья № 3 выход бензина составил 51,02 мас. %, что на 1,53 мас. % ниже по сравнению с Сырьем № 2 (рис. 4, а), и это связано с уменьшением содержания насыщенных веществ в составе сырья. Хотя выход бензина снизился, ОЧи увеличилось на 2,27 ед. (с 89,5 до 91,7 ед.) благодаря возросшему содержанию ароматических соединений в составе Сырья № 3. Выход ББФ составил 11,8 мас. % (рис. 4, б), в переводе на т/сут это 486,2 т/сут и 5,6 мас. %, что соответствует выходу ППФ 231,3 т/сут (рис. 4, в) при постоянной температуре крекинга 528 °C. Массовые расходы продуктов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Выход продуктов с установки каталитического крекинга

Table 2. Yield of products from a catalytic cracking unit

Выход продуктов Yield of products	Сырье, т/сут/Feedstock, t/d		
	1	2	3
Бензин Gasoline	2009,85	2134,97	2100,75
ББФ/ППФ BBF/PPF	407,76/191,13	519,95/251,06	486,19/231,32

Результаты показывают, что при переработке Сырья № 3 нефтехимические режимы были достигнуты при температурах 531,5–543,7 °C, что соответствует выходам 6,45–9,85 мас. % (264,8–405,5 т/сут) по ППФ и 13,51–20,57 мас. % (566,2–846,8 т/сут) для ББФ. Таким образом, наиболее благоприятным сырьем для получения нефтехимических газов является Сырье № 2, содержащее 20 % гача дистиллятного, при этом бензиновая фракция характеризуется наименьшим октановым числом.

Максимальный выход бензинов для Сырья № 1–3 составил 49,27, 52,58, и 51,25 мас. %, соответственно, и достигается при 536,9, 530,3 и 531,5 °C, соответственно (рис. 4, а). Этот факт можно объяснить более высокими скоростями реакций вторичного крекинга с образованием газовых компонентов при каталитическом крекинге, причем переработка облегченного сырья при вовлечении гача дистиллятного способствует снижению температуры «перекрекинга» на 5–6 °C.

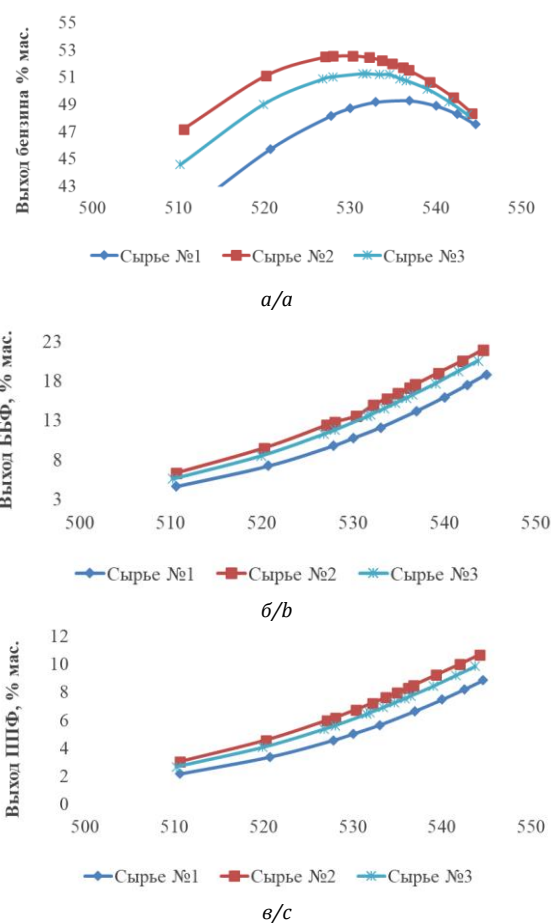


Рис. 4. Результаты влияния температуры крекинга на выход: а) бензина; б) ББФ; в) ППФ

Fig. 4. Results of cracking temperature influence on the yield of: а) gasoline; б) Butane-butylene fraction; в) Propane-propylene fraction

Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку вакуумного дистиллята и экстракта селективной очистки масел

Выполнены прогнозные расчеты (рис. 5) изменения выхода целевых продуктов при переработке вакуумного дистиллята (Сырье № 1), смеси вакуумного дистиллята и экстракта в различных массовых долях 5 % (Сырье № 4), 10 % (Сырье № 5), 20 % (Сырье № 6).

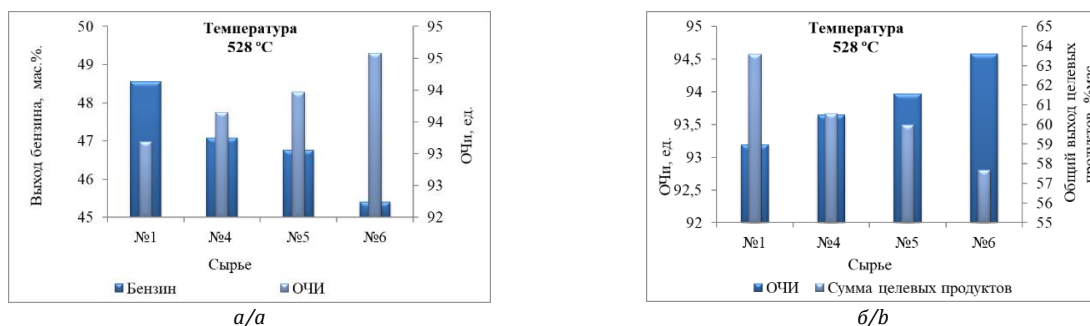


Рис. 5. Влияние количества вовлекаемого экстракта при смешении его с вакуумным дистиллятом на выход и ОЧИ бензина (а), изменений в составе сырья на ОЧИ бензина, общий выход бензина, ППФ и БФФ (б)

Fig. 5. Influence of the involved extract amount when mixing it with a vacuum distillate on the yield and Research octane number of gasoline (a), changes in the feedstock composition on gasoline Research octane number, overall yield of gasoline, PPF and BFF (b)

Применение модели показало, что при переработке Сырья № 1 обеспечивается производство максимального выхода бензина, ППФ и БФФ, что соответствует 48,56, 4,79 и 10,23 мас. %, соответственно (рис. 5, а, б), что связано с более высоким содержанием в нем насыщенных углеводородов, при этом ОЧИ бензина ниже относительно других типов сырья (93,19 ед.), что можно объяснить наименьшим содержанием ароматических углеводородов по сравнению с Сырьем № 2, 3. По мере увеличения количества экстракта в смесевом Сырье № 4–6 наблюдается снижение выхода бензина (47,08, 46,76 и 45,41 мас. %), ППФ (4,28, 4,2 и 3,88 мас. %) и ББФ (9,18, 9,02 и 8,38 мас. %) вследствие более высокой ароматичности вовлекаемого потока. При этом с увеличением ароматических соединений возрастает ОЧИ (93,6, 93,9 и 94,6 ед.), соответственно.

Вместе с тем Сырье № 2, 3 содержит значительное количество смолистых соединений (более 6 мас. %), которые обладают высокой склонностью к реакциям коксообразования и более интенсивно дезактивируют катализатор. Высокое содержание ароматических углеводородов и смолистых соединений в смесевом сырье при вовлечении экстракта в количестве от 5 до 20 мас. % приводит к увеличению содержания кокса на катализаторе на 0,1–0,2 мас. %, что потребует значительной корректировки режимов регенерации катализатора и оптимизации состава смесевых потоков, обеспечивающих получение высокооктанового бензина с высоким выходом.

В последнее время НПЗ особенно актуален вопрос о выборе оптимального соотношения компонентов при смешении низкомаржинальных потоков, поскольку компоненты смесевых потоков значительно различаются по составу. В связи с этим далее были разработаны рекомендации по расши-

рению ресурсов углеводородного сырья при использовании смесевых потоков.

Рекомендации по расширению ресурсов сырья на установке каталитического крекинга вакуумного дистиллята

Разработаны рекомендации по расширению ресурсов углеводородного сырья на установке каталитического крекинга вакуумного дистиллята в условиях дефицита традиционного вакуумного газойля, который составляет до 30 %. Предлагаются составы сырья (табл. 3), результаты модельных прогнозов (рис. 6, табл. 3) и рекомендаций вовлечения сырья с учетом топливного и нефтехимического режима процесса каталитического крекинга.

Прогнозные расчеты показали, что вовлечение 15 мас. % гача дистиллятного и 15 мас. % экстракта в переработку с вакуумным дистиллятом обеспечивает полную загрузку установки сырьем. При этом увеличение расхода бензина и олефинсодержащих газов составило 656,1 и 131,72 т/сут при температуре крекинга 528 °C.

Таблица 3. Рецептуры смесевых потоков

Table 3. Recipes of mixed feedstock

Сырье/ состав, мас. % Feedstock/ composition, wt %	% от максимальной загрузки % from maximum load			Групповой состав Group composition		
	Компонентный состав Component composition					
	ВД VD	Э E	ГД SWD	НУ SH	АУ AH	Смолы Resins
5	70	0	0	60,6	33,5	5,9
6	70	15	15	62,0	32,5	5,5
7	60	20	20	62,7	32,1	5,4
8	70	20	10	58,6	35,5	6,0

ВД – вакуумный дистиллят; Э – экстракт; ГД – гач дистиллятный; НУ – насыщенные углеводороды; АУ – ароматические углеводороды.
 VD – vacuum distillate; E – extract; SWD – slack wax distillate; SH – saturated hydrocarbons; AH – aromatic hydrocarbons.

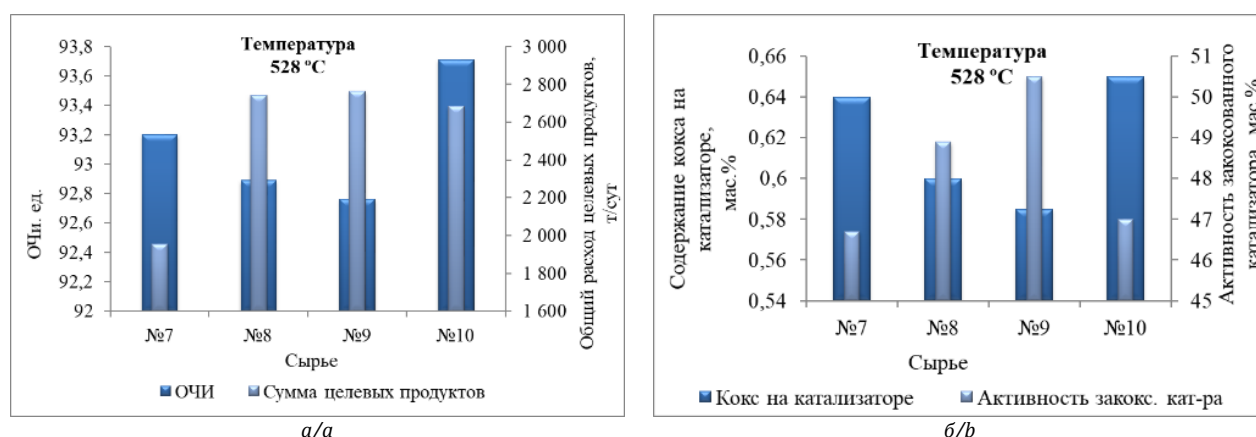


Рис. 6. Влияние изменений в составе сырья на сумму целевых продуктов и ОЧИ бензина (а) и содержание кокса и активность катализатора (б)

Fig. 6. Influence of changes in the feedstock composition on the amount of target products and gasoline RON (a) and coke content and catalyst activity (b)

Таблица 4. Результаты рекомендаций вовлечения смешанного сырья в процесс каталитического крекинга с учетом топливного и нефтехимического режима процесса

Table 4. Results on recommendation for involvement of mixed feedstock in process of FCC, taking into account the fuel and petrochemical regime of the process

Сырье Feedstock	Расход сырья, т/сут Feedstock consumption, t/day	Режим/Mode			
		Топливный/Fuel		Нефтехимический/Petrochemical	
		Температура крекинга Cracking temperature, °C	Расход бензина, т/сут Gasoline consumption, t/day	Температура крекинга Cracking temperature, °C	Расход жирного газа, т/сут Wet gas consumption, t/day
70 % ВД/VD	2866,5	528,0	1427,9	528,0	527,72
70 % ВД/VD+15 % ГД/SWD+ 15 % Э/E	4095,0	528,0	2084,0	528,0	659,44

ВД/VD – вакуумный дистиллят/vacuum distillate; ГД/SWD – гач дистиллятный/slack wax distillate, Э/E – экстракт/extract.

Закключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить составы и физико-химические свойства как отдельных компонентов смешанного сырья процесса каталитического крекинга, так и смешанного сырья, содержащего от 5 до 20 % гачей дистиллятного и остаточного, деасфальтизата и экстракта. Установлены закономерности изменения состава и свойств смешанного сырья процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку существенно различающихся по составу потоков. Характер изменения физико-химических свойств показал, что при содержании насыщенных углеводородов в смешанном сырье более 77 мас. % плотность изменяется нелинейно и значительно снижается.

С применением математической модели определены закономерности изменения состава и выхода продуктов процесса при вовлечении в переработку от 5 до 20 % гача дистиллятного и экстракта селективной очистки масел. Определено, что гачи являются благоприятным сырьем каталитического кре-

кинга при смешении с вакуумным газойлем, вместе с тем доля их в смешанном сырье должна определяться в зависимости от состава смешиваемых потоков и требуемого октанового числа бензина. Установлено, что при добавлении от 5 до 20 % экстракта к вакуумному газойлю выход кокса увеличивается значительно и может превышать нормы для действующего промышленного объекта, при этом октановое число бензина может достигать 94 ед.

Выполненные экспериментальные исследования и результаты расчетов по модели позволили разработать практические рекомендации по расширению ресурсов сырья процесса каталитического крекинга с учетом топливной или нефтехимической направленности процесса. Прогнозные расчеты показали, что вовлечение 15 % ГД и 15 % Э в переработку ВД обеспечивает полную загрузку установки сырьем. Увеличение расхода бензина и олефинсодержащих газов составило 668,4 т/сут (на 31,48 %) и 138,53 т/сут (на 19,97 %) при температуре крекинга 528 °C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышева Е.А., Пискунов И.В., Капустин В.М. Повышение эффективности процесса перегонки нефти на НПЗ путем предварительного оптимального смешения сырья (обзор) // НЕФТЕХИМИЯ. – 2020. – Т. 60. – № 1. – С. 3–19.
2. Effect of modification conditions on the physicochemical characteristics of Y zeolite as a component of a petrochemical cracking catalyst / A.S. Yurtaeva, T.P. Sorokina, K.S. Plekhova, O.V. Potapenko, T.I. Gulyaeva, V.P. Talsi, V.P. Doronin // *Petroleum Chemistry*. – 2021. – Vol. 61. – P. 325–331. URL: <https://doi.org/10.1134/S0965544121030038> (дата обращения 15.11.2023).
3. Fakhroleslam M., Sadrameli S.M. Thermal cracking of hydrocarbons for the production of light olefins; a review on optimal process design, operation, and control // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2020. – Vol. 59. – № 27. – P. 1–55. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00923> (дата обращения 15.11.2023).
4. Upgrading of heavy coker naphtha by means of catalytic cracking in refinery FCC unit / R. Palos, A. Gutierrez, M.L. Fernandez, D. Trueba // *Fuel Processing Technology*. – 2020. – Vol. 205. – № 7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106454> (дата обращения 15.11.2023).
5. Eight-lumped kinetic model for Fischer–Tropsch wax catalytic cracking and riser reactor simulation / W. Zhao, J. Wang, K. Song, Zh. Xu, L. Zhou, H. Xiang, H. Hao, Y. Yang, Y. Li // *Fuel*. – 2022. – Vol. 308. – № 122028. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122028> (дата обращения 15.11.2023).
6. Fundamental study of hierarchical millisecond gas-phase catalytic cracking process for enhancing the production of light olefins from vacuum residue / Y. Che, M. Yuan, Y. Qiao, Q. Liub, J. Zhang, Y. Tian // *Fuel*. – 2019. – Vol. 237. – P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.088> (дата обращения 15.11.2023).
7. Additional feedstock for fluid catalytic cracking unit / R. Venugopal, V. Selvavathy, M. Lavanya, K. Balu // *Petroleum Science and Technology*. – 2008. – Vol. 26. – P. 436–445.
8. Amos A., Avidan A., Owen H. Innovative improvements highlight FCC's past and future // *Oil Gas Journal*. – 1990. – Vol. 88. – P. 33–58.
9. Residual processing in Indian FCC units: prospects and problems / M.R. Rao, D. Bhattacharya, S. Mandal, A.K. Das, S. Ghosh // *Hydrocarbon Technol.* – 1994. – Vol. 571. – P. 3–19.
10. Combined mild hydrocracking and fluid catalytic cracking process for efficient conversion of light cycle oil into high-quality gasoline / Peipei Miao, Xiaolin Zhu, Yangling Guo, Jie Miao, Mengyun Yu, Chunyi Li // *Fuel*. – 2021. – Vol. 292. – P. 120364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120364> (дата обращения 15.11.2023).
11. Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design / M.C. Mastry, L. Dorazio, J.C. Fu, J.P. Gomez, S. Sedano, S.S. Ail, M.J. Castaldi, B. Yilmaz // *Front. Chem.* – 2023. – Vol. 11. – P. 1067488. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1067488>. DOI: [Frontiers | Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: Impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design \(frontiersin.org\)](https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1067488)
12. Studies on pretreatment of catalytic cracking slurry oil with added furfural. Petrol / F. Wang, D. Zhao, R. Song, K. Yue, R. Zhao // *Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 23. – P. 1303–1312.
13. Nazarova G.Y. et al. A predictive model of catalytic cracking: Feedstock- induced changes in gasoline and gas composition // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol. 217. – P. 1–17.
14. Вести газовой науки / Е.Е. Городецкий, В.А. Дешабо, В.И. Косов, В.А. Курьяков, Д.И. Юдин // *Сб. научн. статей ВНИИГАЗ*. – 2010. – Вып. 4. – № 1. – С. 240–252.
15. Неаддитивные изменения свойств углеводородных систем при смешении / В.М. Капустин, Е.А. Чернышева, О.Ф. Глаголева, И.В. Пискунов, А.Ю. Садыров, В.И. Кувыкин, А.Н. Гайнетдинова // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. – 2017. – № 4. – С. 3–9.
16. Correlation between feedstock SARA components and FCC product yields / C. Xu, J. Gao, S. Zhao, S. Lin // *Fuel*. – 2005. – № 84. – P. 669–674.
17. API MPMS 12.3. Manual of petroleum measurement standards. Chapter 12. Calculation of petroleum quantities. Section 3. Volumetric shrinkage resulting from blending light hydrocarbons with crude oil. – USA: American Petroleum Institute, 1996. – 8 p.
18. Чернышева Е.А. Перераспределение соединений между фазами в процессе прямой перегонки нефтяных смесей различного состава: автореф. дис.. канд. хим. наук. – М., 1989. – 226 с.
19. Расчет выхода и состава стабильного бензина и олефин содержащего газа каталитического крекинга: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664773, Российская Федерация; заявл. 03.11.2020; опубл. 18.11.2020.
20. A model of catalytic cracking: catalyst deactivation induced by feedstock and process variables / G.Y. Nazarova, E.N. Ivashkina, E.D. Ivanchina, M.Y. Mezheva // *Catalysts*. – 2022. – Vol. 12. – P. 98. URL: <https://doi.org/10.3390/catal12010098> (дата обращения 15.11.2023).

Информация об авторах

Галина Юрьевна Назарова, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. silko@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0159-300X>

Елена Николаевна Ивашкина, доктор технических наук, профессор отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ivashkinaen@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3984-1352>

Бариджа Джозеф Нафо, магистрант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nb01@tpu.ru

Владислав Вячеславович Мальцев, студент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vvm63@tpu.ru

Татьяна Александровна Шафран, аспирант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shafrantanya@mail.ru

Поступила в редакцию: 03.12.2023

Поступила после рецензирования: 13.12.2023

Принята к публикации: 21.02.2024

REFERENCES

1. Chernisheva E.A., Piskunov I.V., Kapustin V.M. Increasing the efficiency of the oil distillation process at refineries by preliminary optimal mixing of raw materials (review). *NEFTEHIMIYA*, 2020, vol. 60, no. 1, pp. 3–19. (In Russ.)
2. Yurtaeva A.S., Sorokina T.P., Plekhova K.S., Potapenko O.V., Gulyaeva T.I., Talsi V.P., Doronin V.P. Effect of modification conditions on the physicochemical characteristics of Y zeolite as a component of a petrochemical cracking catalyst. *Petroleum Chemistry*, 2021, vol. 61, pp. 325–331. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0965544121030038> (accessed 15 November 2023).
3. Fakhroleslam M., Sadrameli S.M. Thermal cracking of hydrocarbons for the production of light olefins; a review on optimal process design, operation, and control. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2020, vol. 59, no. 27, pp. 1–55. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00923> (accessed 15 November 2023).
4. Palos R., Gutierrez A., Fernandez M.L., Trueba D. Upgrading of heavy coker naphtha by means of catalytic cracking in refinery FCC unit. *Fuel Processing Technology*, 2020, vol. 205, no. 7. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106454> (accessed 15 November 2023).
5. Zhao W., Wang J., Song K., Xu Zh., Zhou L., Xiang H., Hao H., Yang Y., Li Y. Eight-lumped kinetic model for Fischer-Tropsch wax catalytic cracking and riser reactor simulation. *Fuel*, 2022, vol. 308, no. 122028. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122028> (accessed 15 November 2023).
6. Che Y., Yuan M., Qiao Y., Liub Q., Zhang J., Tian Y. Fundamental study of hierarchical millisecond gas-phase catalytic cracking process for enhancing the production of light olefins from vacuum residue. *Fuel*, 2019, vol. 237, pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.088> (accessed 15 November 2023).
7. Venugopal R., Selvavathy V., Lavanya M., Balu K. Additional feedstock for fluid catalytic cracking unit. *Petroleum Science and Technology*, 2008, vol. 26, pp. 436–445.
8. Amos A., Avidan A., Owen H. Innovative improvements highlight FCC's past and future. *Oil Gas Journal*, 1990, vol. 88, pp. 33–58.
9. Rao M.R., Bhattacharya D., Mandal S., Das A.K., Ghosh S. Residual processing in Indian FCC units: Prospects and problems. *Hydrocarbon Technol.*, 1994, vol. 571, pp. 3–19.
10. Peipei Miao, Xiaolin Zhu, Yangling Guo, Jie Miao, Mengyun Yu, Chunyi Li. Combined mild hydrocracking and fluid catalytic cracking process for efficient conversion of light cycle oil into high-quality gasoline. *Fuel*, 2021, vol. 292, pp. 120364. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120364> (accessed 15 November 2023).
11. Mastry M.C., Dorazio L., Fu J.C., Gomez J.P., Sedano S., Ail S.S., Castaldi M.J., Yilmaz B. Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design. *Front. Chem.*, 2023, vol. 11, P. 1067488. DOI: Frontiers | Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: Impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design (frontiersin.org)
12. Wang F., Zhao D., Song R., Yue K., Zhao R. Studies on pretreatment of catalytic cracking slurry oil with added furfural. *Petrol. Sci. Technol.*, 2005, vol. 23, pp. 1303–1312.
13. Nazarova G.Y. A predictive model of catalytic cracking: Feedstock- induced changes in gasoline and gas composition. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 217, pp. 1–17.
14. Gorodeckij E.E., Deshabo V.A., Kosov V.I., Kuryakov V.A., Yudin D.I. News of gas science. *Sb. nauchnykh statey VNIIGAZ*, 2010, Iss. 4, no. 1, pp. 240–252. (In Russ.)
15. Kapustin V.M., Chernysheva E.A., Glagoleva O.F., Piskunov I.V., Sadyrov A.Y., Kuvykin V.I., Gaynetdinova A.N. Non-additive changes in the properties of hydrocarbon systems during mixing. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoy opyt*, 2017, no. 4, pp. 3–9. (In Russ.)
16. Xu C., Gao J., Zhao S., Lin S. Correlation between feedstock SARA components and FCC product yields. *Fuel*, 2005, no. 84, pp. 669–674.
17. API MPMS 12.3. *Manual of petroleum measurement standards. Chapter 12. Calculation of petroleum quantities. Section 3. Volumetric shrinkage resulting from blending light hydrocarbons with crude oil.* USA, American Petroleum Institute, 1996. 8 p.
18. Chernysheva E.A. *Redistribution of compounds between phases during direct distillation of petroleum mixtures of various compositions.* Cand. Diss. Abstract. Moscow, 1989. 226 p. (In Russ.)
19. Nazarova G.Y., Ivashkina E.N., Oreshina A.A. Calculation of the output and composition of stable gasoline and olefin-containing gas from catalytic cracking. *The state registration certificate of a computer program RF*, no. 2020664773, 2020. (In Russ.)
20. Nazarova G.Y., Ivashkina E.N., Evanchina E.D., Mezheva M.Y. A model of catalytic cracking: catalyst deactivation induced by feedstock and process variables. *Catalysts*, 2022, vol. 12, pp. 98. Available at: <https://doi.org/10.3390/catal12010098> (accessed 15 November 2023).

Information about the authors

Galina Yu. Nazarova, Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. silko@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0159-300X>

Elena N. Ivashkina, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ivashkinaen@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3984-1352>

Barida J. Nafo, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nb01@tpu.ru

Vladislav V. Maltsev, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vvm63@tpu.ru

Tatyana A. Shafran, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shafrantanya@mail.ru

Received: 03.12.2023

Revised: 13.12.2023

Accepted: 21.02.2024

УДК 622.24

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4129

Шифр специальности ВАК: 2.8.2

Эффективность методики подбора роторно-управляемых систем на основе алгоритма машинного обучения Random Forest Classifier

В.В. Никишин[✉], П.А. Блинов, В.А. Терехин

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

[✉]Nikishin_VV@pers.spmi.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в острой необходимости рассмотрения и определения возможных путей использования методов машинного обучения в буровой отрасли, поскольку искусственный интеллект развивается стремительными шагами. Достижение этой задачи предоставит промышленным предприятиям огромное конкурентное преимущество и внесёт важный вклад в научное сообщество для его будущих исследований. Это подчёркивается такими нормативными актами, как Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» и «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года». *Цель:* исследование эффективности применения метода машинного обучения Random Forest Classifier для разработки методик подбора роторно-управляемых систем, рассмотрения работоспособности машинного обучения для определения целевых параметров при решении поставленной перед ним задачи в рамках буровой отрасли и определению примерного количества времени, которое может быть затрачено алгоритмом для проработки возможного решения. *Объект:* метод машинного обучения Random Forest Classifier в условиях решения задачи из буровой отрасли по подбору оптимальной роторно-управляемой системы под конкретно заданные условия. *Методы.* Выполнены два вычислительных эксперимента с применением двух вычислительно электронных машин, а именно ноутбука и удалённого сервера, предпосылкой для которых стали данные, собранные и проанализированные на основе изучения научной литературы по направлению исследования. В данной статье исследуется возможность применения метода машинного обучения Random Forest Classifier для оптимизации процесса строительства скважин на примере разработки методики подбора роторно-управляемых систем. Вычислительные эксперименты выполнены на двух вычислительных машинах с применением языка программирования Python версии 3.8.10, а также следующих библиотек: NumPy, Pandas, Scikit-learn. *Результаты.* Проведённые вычислительные эксперименты доказали способность рассматриваемого метода машинного обучения решать задачи по выбору подходящего бурового оборудования, примером которого выступали роторно-управляемые системы. Данный метод способен самостоятельно определять необходимые для выполнения поставленной задачи зависимости и затрачивать на этот процесс незначительное количество времени. Совокупность этих выводов позволяет сделать предположение о целесообразности и необходимости разработки новых способов использования методов машинного обучения в буровой отрасли, а также выполнению множественных научных исследований вопросов о возможностях применения машинного обучения в процессе строительства скважин и анализа их эффективности, поскольку данное направление является передовым и может кардинально изменить существующие представления о протекающих во время бурения скважин процессах.

Ключевые слова: машинное обучение в бурении, применение машинного обучения в бурении скважин, машинное обучение для выбора роторно-управляемых систем, методика выбора роторно-управляемых систем, применение алгоритма случайного леса в бурении скважин, искусственный интеллект в бурении, искусственный интеллект в нефтегазовой отрасли

Для цитирования: Никишин В.В., Блинов П.А., Терехин В.А. Эффективность методики подбора роторно-управляемых систем на основе алгоритма машинного обучения Random Forest Classifier // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 185–199. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4129

UDC 622.24

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4129

Effectiveness of the method for selecting rotary-steerable systems based on the machine learning algorithm Random Forest Classifier

V.V. Nikishin✉, P.A. Blinov, V.A. Terekhin

St. Petersburg Mining University, Russian Federation, St. Petersburg

✉Nikishin_VV@pers.spmi.ru

Abstract. Relevance. Urgent need to consider and determine possible ways to use machine learning methods in drilling industry, since artificial intelligence is developing rapidly. Achieving this task will provide industrial enterprises with a huge competitive advantage and make an important contribution to the scientific community for its future research. This is emphasized by such regulations as the Decree of the President of the Russian Federation dated 10.10.2019 G. No. 490 "On the development of Artificial Intelligence in the Russian Federation" and "The National Strategy for the Development of Artificial Intelligence for the period up to 2030". **Aim.** To study the effectiveness of using the machine learning method Random Forest Classifier, to develop methods for selecting rotary-steerable systems, to consider the efficiency of machine learning to determine target parameters when solving the task assigned to it within the drilling industry and to determine the approximate amount of time that can be spent by the algorithm to work out a possible solution. **Object.** Random Forest Classifier machine learning method in the conditions of solving a problem from the drilling industry on the selection of an optimal rotary-steerable system for specified conditions. **Methods.** The authors have performed two computational experiments using two computing and electronic machines, namely a laptop and a remote server, the prerequisite for which was the data collected and analyzed on the basis of the study of the scientific literature in the field of research. This article explores the possibility of using the machine learning method Random Forest Classifier, to optimize well construction, using the example of developing a method for selecting rotary-steerable systems. Computational experiments were performed on two computers using the Python programming language, version 3.8.10, as well as the following libraries: NumPy, Pandas, Scikit-learn. **Results.** The computational experiments carried out proved the ability of the considered method to solve the problems of choosing suitable drilling equipment, an example of which was rotary-steerable systems. This method is able to independently determine the dependencies necessary to perform the task and spends a small amount of time on this process. The totality of these conclusions makes it possible to unequivocally assert the expediency and necessity of developing new approaches to the use of machine learning methods in the drilling industry, as well as performing multiple scientific studies on the possibilities of using machine learning in well construction and analyzing their effectiveness, since this direction is advanced and can radically change the existing ideas about the processes occurring during well drilling.

Keywords: machine learning in drilling, machine learning application in drilling wells, machine learning for selecting rotary-steerable systems, method of selecting rotary-steerable systems, application of the random forest algorithm in drilling wells, artificial intelligence in drilling, artificial intelligence in the oil and gas industry

For citation: Nikishin V.V., Blinov P.A., Terekhin V.A. Effectiveness of the method for selecting rotary-steerable systems based on the machine learning algorithm Random Forest Classifier. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 185–199. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4129

Введение

Строительство скважин – многофакторный процесс [1], общая эффективность которого зависит от качества составляющих его элементов [2], к которым можно отнести такие характеристики, как: качество пробуренного ствола скважины [3] и соответствие его траектории [4], предусмотренной рабочим проектом [5]. Качество упомянутых характеристик напрямую зависит от выбранного бурового оборудования [6–8]. На текущий момент самым эффективным таким оборудованием являются роторно-управляемые системы (РУС) [9–11]. В свою очередь, чтобы правильно подобрать РУС, необходимо учитывать множество различных параметров

[12, 13], которые в идеале должны корректироваться [14, 15] с учетом постоянно увеличивающегося опыта промыслового бурения [16, 17]. При этом невозможно учитывать все эти параметры лишь с помощью человеческих ресурсов [18, 19]. Даже если и получится вывести ключевые признаки, на основании которых будет составлена специальная методика, она может быть недостаточно точной [20–22], или ее применение будет занимать весьма большое количество времени [23–25], снижая эффективность всего процесса строительства скважин [26–28]. Поэтому каждая разработанная методика должна быть проверена различными испытаниями [29], на основании которых нужно бу-

дет вносить определенные правки [30, 31]. При этом могут иметь место особые случаи [32, 33], решить которые можно лишь составлением новой методики [34], что еще больше удлиняет рабочий процесс [35–37].

Возможным решением данной проблемы может быть использование методов машинного обучения [38, 39], основным преимуществом которых является высокая скорость обучения [40, 41] и выполнения вычислительных операций [42, 43], а также возможность работы с большими объемами данных (BigData) [44, 45]. Данные методы уже активно используются для прогнозирования геологии пласта [44, 45] и корректирования траектории бурения [46, 47], ведь она может анализировать параметры, поступающие с бурового оборудования [48, 49], такие как уровень вибрации [50], скорость бурения и вращения ротора [51], нагрузку на долото [52] и т. д., и определять состав породы вокруг скважины [53, 54]. Это позволяет оперативно реагировать на изменения геологии [55] и поддерживать темпы бурения в рамках рабочего проекта [56]. Также существуют разработки по прогнозированию осложнений во время бурения и оценки надёжности оборудования [57], которые позволяют выявлять аномалии [58], свидетельствующие о возможных неисправностях или предпосылках к авариям [59]. Подобные разработки используются в компании British Petroleum. Само собой, в сферу оптимизации работы бурового оборудования также активно интегрируются решения на базе машинного обучения [60, 61].

В настоящее время существует большое количество различных моделей для машинного обучения, но наиболее часто применяемые из них – методы ансамблей [62]. Random Forest Classifier (RFC) – один из таких методов, который является более точным, чем большинство существующих моделей, и удобным в применении, так как имеет возможность передачи в его алгоритмы данных не только с численным типом, но и как объекты [63, 64].

Данная работа направлена на исследование эффективности применения метода машинного обучения RFC для разработки различных методик подбора роторно-управляемых систем. Оценка производится по следующим параметрам: скорость выполнения рабочих процессов и точность конечного результата. Граничные области данного исследования обозначены таким образом, чтобы можно было приблизить рабочие параметры к как можно более идеальным условиям, чтобы использовать наиболее успешные подходы как отправную точку в вопросах нахождения взаимосвязи между параметрами.

Методология

Направление исследования – повышение эффективности бурения скважин. Предмет исследования – оптимизация процесса подбора оборудования с применением современных технологий для совершенствования процесса строительства скважин. Задачи исследования: выполнить построение методик подбора РУС на примере датасетов различной информативности с использованием метода машинного обучения RFC; проверить качество составленных методик по показателям точности получаемых результатов и скорости выполнения поставленной задачи; выполнить сравнение используемых подходов к обучению модели между собой и сделать соответствующие выводы.

Идея исследования заключается в том, что применение технологии машинного обучения позволит значительно сократить время на исследование взаимосвязей между характеристиками оборудования и рабочими параметрами технологических процессов, по сути, предсказывая результаты на всех этапах различных версий сценариев проведения буровых работ, в основе чего лежит определение основных параметров, учёт которых и позволяет прийти к видению возможного будущего. Достигается это за счёт подбора оптимального оборудования, условные зависимости для выбора которого алгоритм машинного обучения находит или составляет сам, таким образом создавая новые методики для определения наиболее подходящего рабочего оборудования под конкретную рабочую ситуацию с каждой новой моделью. Поэтому необходимо показать и доказать то, что модели, основанные на машинном обучении, способны самостоятельно находить целевые параметры среди множества заданных, которые являются наиболее важными при выборе того или иного оборудования, и делать это за очень короткие временные промежутки.

Наиболее точная методика выбора оборудования, применимая в реальных промысловых условиях, обязана учитывать большое количество различных факторов, которые можно определить лишь при подробном анализе реальных практических данных, по результатам которого можно породить новые вопросы, и если заранее не обозначить граничные условия применения, то их необходимо будет сразу же проработать. А с учетом задач данного исследования подобное является излишним, соответственно, можно ограничиться данными, сгенерированными с учетом условия их соответствия реальным роторно-управляемым системам, и абстрагироваться от большинства излишних факторов. В результате чего разработка методик подбора РУС будет осуществляться с учетом удовлетворения следующим рабочим характеристикам: диаметр скважины (в миллиметрах и дюймах), интенсивность пространственного искривления

(°/30 м), скорость вращения долота (об/мин), скорость потока (л/мин), плотность бурового раствора (кг/м³) и рабочая температура на забое скважины (градус С).

Экспериментальная часть была выполнена на двух разных вычислительных машинах: Ноутбуке HP Pavilion Gaming 15-dk0069ur (с использованием вычислительного инструмента Jupyter Notebook) и сервере компании Google Серверный ускоритель Python 3 на базе Google Compute Engine, используемом через сервис Google Colaboratory. Написание кода осуществлялось на языке Python, версия 3.8.10. Используемые библиотеки: NumPy, Pandas, Scikit-learn. Графическая часть выполнена в рабочей среде MS Excel 2016. Кодировка для загрузки датасетов в рабочие переменные – UTF-8. Средние скорости обучения моделей (погрешность ÷12,5 мс) и выполнения операций подбора оборудования (погрешность ÷1,5 мс) рассчитывались с помощью метода «%%timeit –n200», встроенного в используемые вычислительные инструменты.

Выбор параметров для датасетов осуществлялся по данным рабочих характеристик РУС, которые были взяты из разделов официальных сайтов и документов сервисных компаний, являющихся владельцами этих систем. Часть информации о рабочих моделях одних компаний представлена в более расширенном виде, в то время как другие компании предоставляют более ограниченную информацию о параметрах своих РУС. Поэтому в рамках исследования было принято решение ограничиться выбором нескольких параметров, наиболее часто встречающихся в открытых источниках, рабочих характеристик РУС, которые в действительности учитываются при выборе роторно-управляемых систем под бурение скважин на реальных месторождениях.

Исследование зависимости между точностью обученных моделей и объемом данных

Точность методов машинного обучения напрямую зависит от количества и качества данных в датасете. Именно данная закономерность была рассмотрена в начале работы. При этом необходимо учитывать, что качество модели, обученной на основе алгоритма RFC, напрямую зависит от его начального значения параметра random_state. Выполнив первоначальный анализ всех имеющихся данных, было принято решение о разделении их на три отличимых между собой датасета, на основе которых было поставлено три вычислительных эксперимента, в рамках которых было обучено по 200 моделей, для которых параметр random_state изменялся от 1 до 200 с шагом в единицу.

Основная задача первого эксперимента – проверка работоспособности модели, обученной на наборе данных, в которые входят лишь граничные

значения предусмотренных методологией параметров (максимальные и минимальные значения). Так как с подобными условиями тренировочный датасет сильно ограничен количеством данных, было принято решение наполнить его только уникальными моделями РУС, применимость которых можно, в первую очередь, определить по заданному диаметру скважины. Это делается с целью проверки, сможет ли метод RFC понять, что ему переданы именно граничные параметры. Таким образом, тренировочный датасет данного эксперимента включает в себя 9 строк и 7 столбцов. В табл. 1 показаны его первые 5 строк. В рамках этого датасета информативность о применимости каждой модели РУС ограничивается двумя строками, на одной из которых указаны минимальные, а на другой максимальные значения рабочих параметров.

Так как в рамках данного эксперимента тестовый датасет составлен таким образом, что представлены такие модели РУС, которые работают в совершенно разных диапазонах диаметров скважин, то точность модели достаточно полно и просто определяется с применением метрики Accuracy classification score из библиотеки ПО Scikit-learn.

Однако её точность может быть не совсем объективной, поэтому была разработана и реализована в программном коде дополнительная специальная метрика, результаты которой будут сравниваться с результатами Accuracy classification score. Алгоритм работы данной метрики представлен на рис. 1.

Таблица 1. Часть датасета для первого вычислительного эксперимента [составлено авторами]

Table 1. Part of the dataset for the first computational experiment [compiled by the authors]

Ключ/Key	РУС RSS	Диаметр скважины, мм Hole size, mm	Диаметр скважины, дюйм Hole size, in	Интенсивность искривления, град/30 м DLS, deg/30 m
0	RSS-HM-195	220,7	8,6875	0,5
1	RSS-HM-195	222,3	8,7500	7,5
2	PowerDrive Archer 475 RSS	149,2	5,8750	0,5
3	PowerDrive Archer 475 RSS	171,5	6,7500	18
4	PowerDrive ICE 675 RSS	215,9	8,5000	0,5
Ключ/Key	Скорость вращения долота, об/мин Bit speed, RPM	Расход бурового раствора, л/мин Flow range, L/min	Плотность бурового раствора, кг/м ³ Mud density kg/m ³	Рабочая температура, °С Temperature, °C
0	0	960	1000	0
1	200	2580	1500	125
2	0	492	1000	0
3	350	1343	2160	150
4	0	1040	1000	0

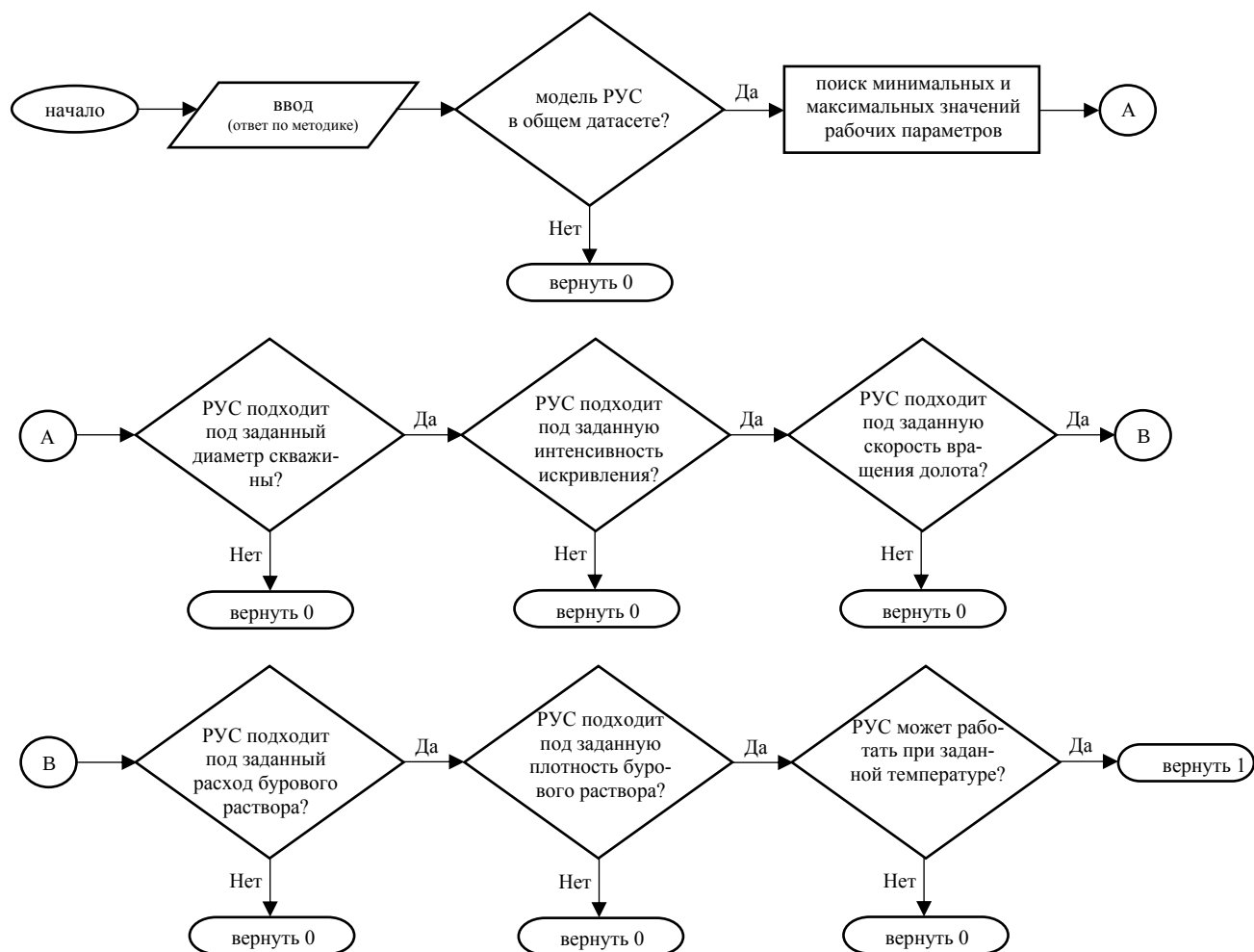


Рис. 1. Алгоритм работы специальной метрики [составлено авторами]

Fig. 1. Algorithm for a special metric operation [compiled by the authors]

Среди 200 проведенных экспериментов для каждой вычислительной машины при использовании ядер случайной генерации в диапазоне от 1 до 200 включительно были получены следующие результаты о качестве моделей, которые представлены в табл. 2.

После проверки точности моделей, обученных на наборе данных, состоящем только из минимальных и максимальных рабочих значений оборудования, в соответствии с метрикой *Assigasy_score*, результаты показывают, что ни в одном из случаев оборудование не было правильно подобрано со 100 % точностью. Однако проверка точности построенных моделей с использованием специальной метрики позволила выявить наличие четырех моделей, которые смогли определить все правильные РУС для условий, указанных в тестовом наборе данных. Несмотря на то, что в большинстве случаев точность полученных моделей крайне низка, есть некоторые из них, которые могут решать поставленные задачи с высокой точностью.

Однако получение таких моделей может потребовать больших усилий. В этом случае низкая точность большинства моделей может быть объяснена как сущностью случайной генерации условных признаков модели, на которые она опирается при выполнении операции, так и недостаточной информативностью обучающего набора данных для полноценного обучения модели в рамках задачи. Однако алгоритм RFC является одним из наиболее распространенных и используемых в реальных программных решениях, поэтому давайте рассмотрим второй вариант более подробно.

Набор данных для второго эксперимента представлен в виде списка практических данных, который включает около 68 примеров возможного выбора определенных моделей РУС. В табл. 3 показана часть данных из обучающего набора данных для этого эксперимента. Результаты о качестве моделей представлены в табл. 4.

По результатам второго вычислительного эксперимента видно, что общая точность моделей стала на порядок лучше. Это особенно заметно по ре-

зультатам проверки точности работы моделей с использованием специально разработанной для исследования метрики, в которых выявлено, что из 200 обученных моделей 185 сделали абсолютно правильный выбор, и только 15 моделей допустили одну ошибку.

Таблица 2. Точность работы полученных моделей из первого вычислительного эксперимента [составлено авторами]

Table 2. Accuracy of the obtained models from the first computational experiment [compiled by the authors]

Вычислительная машина Computing machine	Accuracy score		Разработанная метрика Designed metric		Средняя скорость обучения модели за 200 циклов, мс Average model learning rate for 200 cycles, ms	Средняя скорость операции подбора оборудования за 200 циклов, мс Average speed of the equipment selection operation for 200 cycles, ms
	Точность модели Model accuracy, %	Количество моделей Number of models	Точность модели Model accuracy, %	Количество моделей Number of models		
Ноутбук/Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0069ur	92,9	20	100	4	135	13,5
	89,3	37	96,4	27		
	85,7	46	92,9	56		
	82,1	52	89,3	60		
	78,6	31	85,7	40		
	75	10	82,1	12		
	71,4	3	78,6	1		
Сервер/Server Google Colaboratory	92,9	20	100	4	131	12,9
	89,3	37	96,4	27		
	85,7	46	92,9	56		
	82,1	52	89,3	60		
	78,6	31	85,7	40		
	75	10	82,1	12		
	71,4	3	78,6	1		

Несмотря на то, что во втором эксперименте были получены хорошие результаты, разница в результатах определения точности обученных моделей между метриками все еще слишком велика. Низкие показатели точности, измеряемые метрикой Accuracy_score, могут быть результатом специфики ее работы, поскольку она определяет правильность выбора РУС по его названию, которое должно совпадать с таковым в тестовом наборе данных, однако рабочие характеристики различных роторно-управляемых систем могут соответствовать одним и тем же условиям работы, но среди всего многообразия оборудования RFC может выбрать только один ответ. Это не проблема, в таких случаях, когда необходимо определить список подходящего оборудования, можно использовать специально

обученный алгоритм для поиска нужного кластера потенциальных ответов, предварительно выполнив необходимые операции кластеризации.

Таблица 3. Часть данных тренировочного датасета для второго вычислительного эксперимента [составлено авторами]

Table 3. Part of the data of the training dataset for the second computational experiment [compiled by the authors]

Ключ/Key	PVC RSS	Диаметр скважины, мм Hole size, mm	Диаметр скважины, дюйм Hole size, in	Интенсивность искривления, град/30 м DLS, deg/30 m	Скорость вращения долота, об/мин Bit speed, RPM	Расход бурового раствора, л/мин Flow range, L/min	Плотность бурового раствора, кг/м³ Mud density kg/m³	Рабочая температура, °C Temperature, °C
46	iCruise X™ 4.75	171,0	6,750	6,5	361	908	1350	100
47	iCruise X™ 4.75	171,0	6,750	7,0	97	1086	1160	119
48	PowerDrive Orbit G2 825 RSS	269,9	10,625	4,0	344	5075	2630	106
49	PowerDrive Orbit G2 825 RSS	269,9	10,625	1,0	201	2169	2660	84
50	PowerDrive Orbit G2 825 RSS	269,9	10,625	5,0	32	5846	2380	45

Таблица 4. Точность работы полученных моделей из второго вычислительного эксперимента [составлено авторами]

Table 4. Accuracy of the obtained models from the second computational experiment [compiled by the authors]

Вычислительная машина Computing machine	Accuracy score		Разработанная метрика Designed metric		Средняя скорость обучения модели за 200 циклов, мс Average model learning rate for 200 cycles, ms	Средняя скорость операции подбора оборудования за 200 циклов, мс Average speed of the equipment selection operation for 200 cycles, ms
	Точность модели Model accuracy, %	Количество моделей Number of models	Точность модели Model accuracy, %	Количество моделей Number of models		
Ноутбук/Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0069ur	100	22	96,4	15	13,0	13,3
	96,4	81				
	92,9	79				
	89,3	18				
Сервер/Server Google Colaboratory	100	22	96,4	15	13,1	12,7
	96,4	81				
	92,9	79				
	89,3	18				

Однако в нашем случае рабочий подход заключается в том, чтобы сосредоточиться на характеристиках одной выбранной модели. Именно этот нюанс учитывается в специальной метрике.

Но полагаться только на одну метрику не является достаточно верным подходом, более того, в первом эксперименте метрика Accuracy_score в некоторых случаях могла определять нужные модели со 100 % точностью. Поэтому следует провести третий эксперимент, который будет соединять в себе подходы обоих предыдущих экспериментов.

Соответственно, в третьем эксперименте учитываются как данные по граничным значениям, так и практические данные (все объединено в общий датасет), однако они будут слегка переработаны, а точнее, доля ситуаций, когда под решение задачи подходят сразу несколько правильных ответов, была существенно сокращена. Результаты данного эксперимента представлены в табл. 5.

Таблица 5. Точность работы полученных моделей из третьего вычислительного эксперимента [составлено авторами]

Table 5. Accuracy of the received models from the third computational experiment [compiled by the authors]

Вычислительная машина Computing machine	Accuracy score		Разработанная метрика Designed metric		Средняя скорость обучения модели за 200 циклов, мс Average model learning rate for 200 cycles, ms	Средняя скорость операции подбора оборудования за 200 циклов, мс Average speed of the equipment selection operation for 200 cycles, ms
	Точность модели Model accuracy, %	Количество моделей Number of models	Точность модели Model accuracy, %	Количество моделей Number of models		
Ноутбук/Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0069ur	100	178	100	195	144	14,1
	96,4	22	96,4	5		
Сервер/Server Google Colaboratory	100	178	100	195	137	13,2
	96,4	22	96,4	5		

По результатам третьего вычислительного эксперимента отчетливо заметно увеличение количества моделей со 100 % точностью работы, измеренной как по метрике Accuracy_score, так и по специальной метрике. Поскольку обе метрики показывают очень хорошие результаты, можно с уверенностью сказать, что наиболее подходящим набором данных для решения задач выбора оптимальной РУС является набор данных, содержащий

практические данные в сочетании с данными о минимальных и максимально допустимых рабочих параметрах оборудования, именно такой набор данных и можно назвать наиболее информативным. Однако стоит учитывать, что существует определенный предел объема данных, начиная с которого рост точности работы моделей либо будет незначительным, либо его не будет вовсе.

Исследование зависимости времени обучения моделей от объема данных

Несмотря на повышение точности модели при относительно небольшом изменении объема набора данных, значение средней скорости обучения модели практически не меняется, что делает невозможным точное определение зависимости этого параметра от объема набора данных в рамках данного исследования. Наличие информации об этой зависимости носит важный характер для правильного распределения рабочего времени специалистов при выполнении работ по нахождению зависимостей между заданными параметрами. Поэтому для полноты исследования был проведен дополнительный эксперимент, в котором учитывалось изменение средней скорости обучения модели в зависимости от: количества строк в наборе данных с одинаковым количеством столбцов (рис. 2); количества столбцов с одинаковым количеством строк (рис. 3); количества строк и столбцов с одинаковым объемом набора данных (рис. 4).

Несмотря на увеличение времени обучения модели с увеличением объема набора данных, скорость обучения поражает своими низкими значениями. Например, как видно из рис. 2, при общем размере набора данных 8000 строк на 7 столбцов средняя скорость обучения одной модели составляет всего 248 мс. Соответственно, использование такого подхода для разработки методологии выбора рабочего оборудования может сэкономить огромное количество времени, особенно при проверке гипотез о возможных зависимостях между заданными параметрами, предоставляя возможность для более подробного изучения рассматриваемых зависимостей.

Для более наглядного представления взаимосвязи между объемом обучающего датасета и средней скоростью обучения одной модели (τ , мс) был проведен анализ данных методом множественной линейной регрессии, результаты которого выявили следующую взаимосвязь, записанную ниже с коэффициентом, учитывающим мощность вычислительной машины, на которой выполняется процедура обучения:

$$\tau = k_m \cdot (102,74 + 0,18 \cdot r + 0,43 \cdot c), \text{ мс}$$

где k_m — коэффициент, учитывающий мощность вычислительного оборудования; r — количество строк в датасете, шт; c — количество столбцов в датасете, шт.

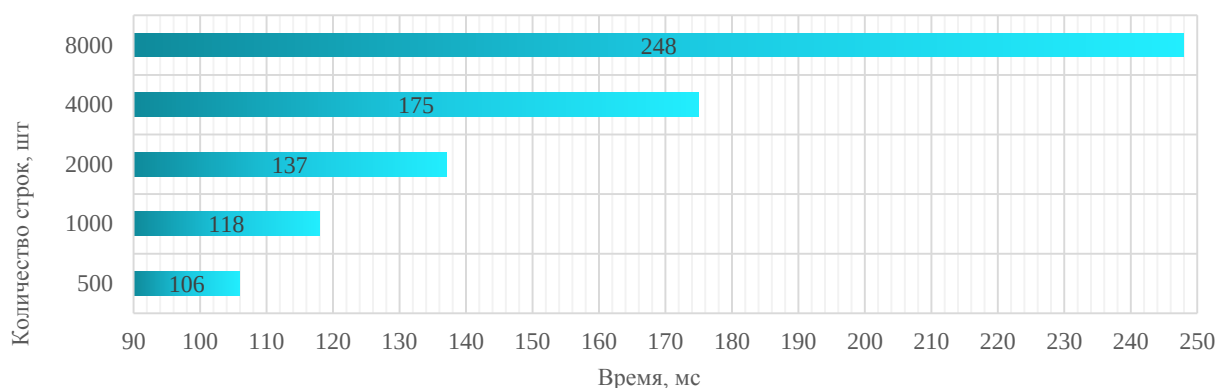


Рис. 2. Зависимость между средней скоростью обучения модели и количеством строк в датасете [составлено авторами]

Fig. 2. Dependence between the model average learning rate and the number of rows in the dataset [compiled by the authors]

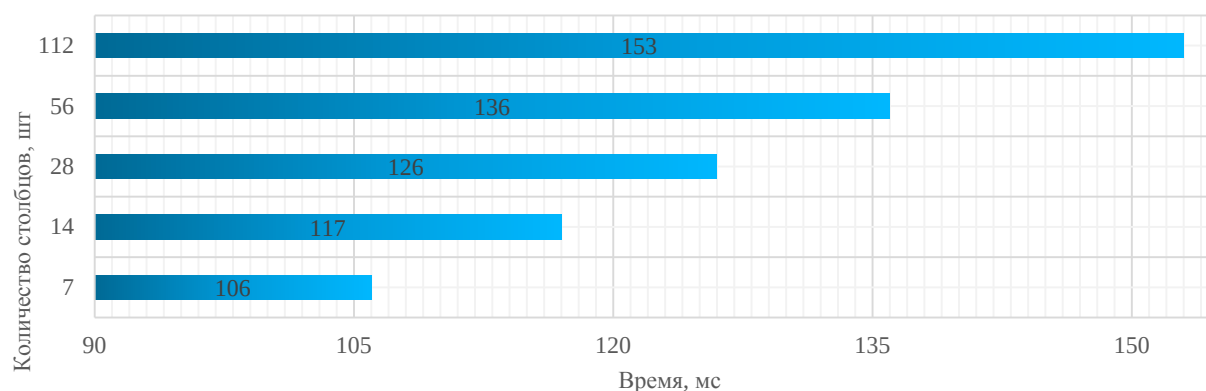


Рис. 3. Зависимость между средней скоростью обучения модели и количеством столбцов в датасете [составлено авторами]

Fig. 3. Dependence between the model average learning rate and the number of columns in the dataset [compiled by the authors]

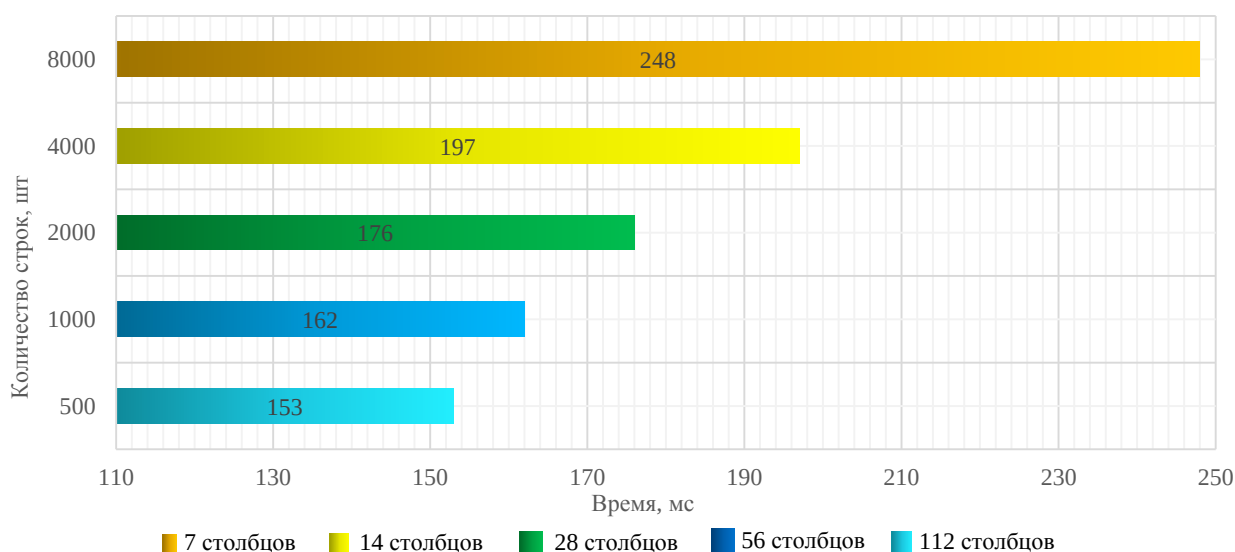


Рис. 4. Зависимость между средней скоростью обучения модели и объемом данных в датасете [составлено авторами]

Fig. 4. Dependence between the model average learning rate and the amount of data in the dataset [compiled by the authors]

Заключение

Точность моделей, обученных алгоритмом RFC, напрямую зависит от количества и качества данных, используемых при обучении. Наилучшие результаты показали модели из третьего вычислительного эксперимента. Это можно объяснить тем фактом, что набор данных для этого эксперимента содержал большое количество примеров, на основе которых модель смогла наилучшим образом выстроить взаимосвязи между параметрами и определить их граничные значения для каждой указанной модели РУС.

Более того, необходимо аккуратно подходить к вопросу выбора подходящей метрики для проверки точности модели, поскольку разные метрики имеют разные целевые характеристики для сравнения, что может определенным образом исказить конечные результаты. Графическое представление точности обученных моделей и их количества для каждого из экспериментов можно увидеть на рис. 5, где точность оценивалась с использованием метрики *Accuracy_score*, и на рис. 6, где точность оценивалась с использованием специальной метрики.

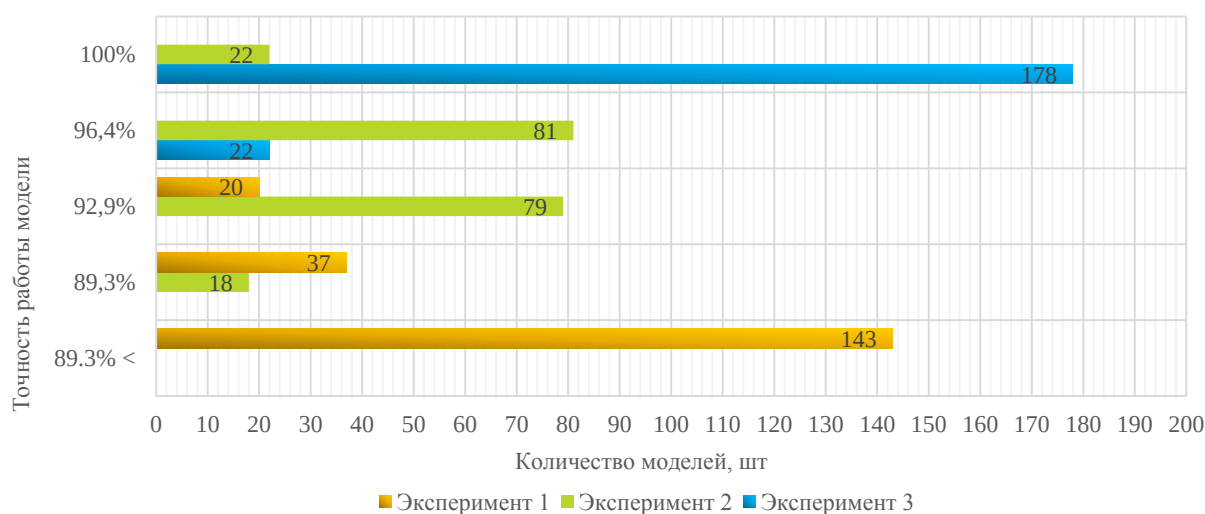


Рис. 5. Точность полученных моделей, оцененная по метрике *Accuracy_score* [составлено авторами]

Fig. 5. Accuracy of the obtained models, estimated by the metric *Accuracy_score* [compiled by the authors]

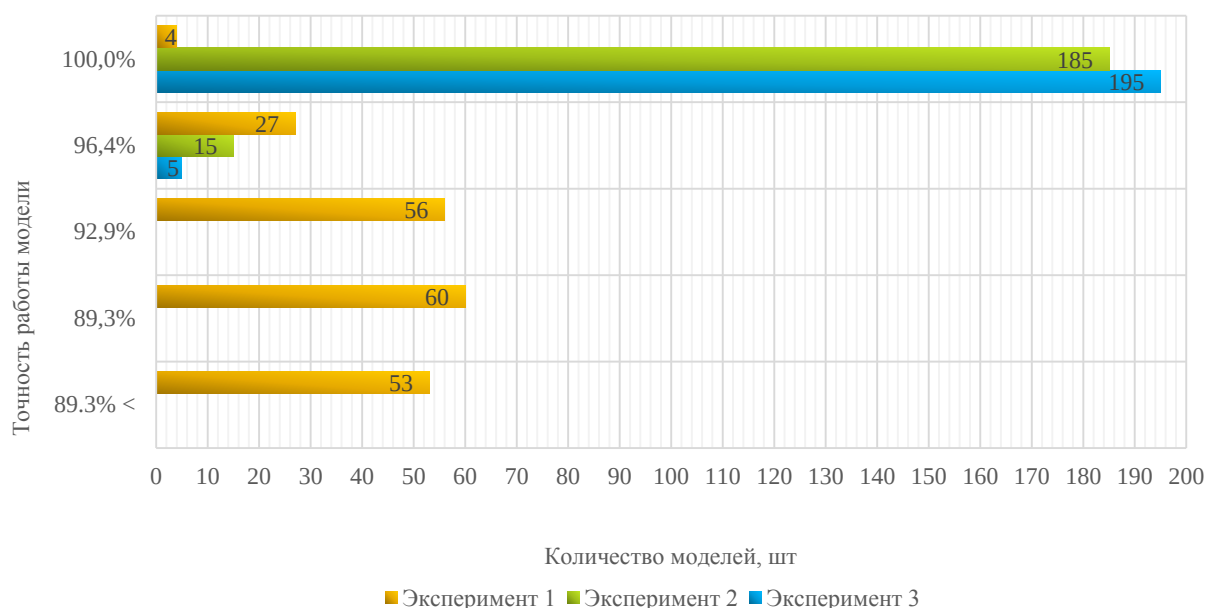


Рис. 6. Точность полученных моделей, оцененная по специальной метрике [составлено авторами]

Fig. 6. Accuracy of the obtained models, estimated by a special metric [compiled by the authors]

Таблица 6. Средняя скорость обучения и выполнения моделей [составлено авторами]

Table 6. Average learning and execution rates of models [compiled by the authors]

Номер вычислительного эксперимента Number of computational experiment	Вычислительная машина Computing machine	Средняя скорость обучения модели за 200 циклов, мс Average model learning rate for 200 cycles, ms	Средняя скорость операции подбора оборудования за 200 циклов, мс Average speed of the equipment selection operation for 200 cycles, ms
1	Ноутбук/Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0069ur	135	13,5
	Сервер/Server Google Colaboratory	131	12,9
2	Ноутбук/Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0069ur	130	13,1
	Сервер/Server Google Colaboratory	133	13,7
3	Ноутбук / Laptop HP Pavilion Gaming 15-dk0069ur	144	14,1
	Сервер/Server Google Colaboratory	137	13,2

При этом, несмотря на постепенное увеличение количества тренировочных данных, с переходом от одного эксперимента к другому средние скорости выполнения операций создания экземпляров модели, их обучения и использования для решения поставленной задачи изменяются в малом диапазоне и больше зависят от параметров вычислительной машины. В табл. 6 представлены результаты вычисления средних скоростей выполнения всех построенных моделей в рамках проведенных экспериментов.

Полученные результаты вычислительных экспериментов, проведенных в рамках данного исследования, подтверждают целесообразность использования машинного обучения для решения прикладных задач, которые прямо или косвенно направлены на выявление взаимосвязей между исследуемыми параметрами, так как машинно-обученные модели позволяют создавать разнообразные методики за максимально короткие сроки, благодаря чему можно более глубоко изучить влияние рассматриваемых параметров на протекающие процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. New methods for preventing crumbling and collapse of the borehole walls / I.I. Chudyk, Y.M. Femiak, M.I. Orynychak, A.K. Sudakov, A.I. Riznychuk // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2021. – № 4. – P. 17–22. DOI: 10.33271/nvngu/2021-4/017
2. Совершенствование технологии строительства горизонтальных скважин / Д.Л. Бакиров, М.М. Фаттахов, Э.В. Бабушкин, В.Н. Ковалев, А.М. Шурупов, В.В. Фатихов, О.Ф. Тергулов // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 1. – С. 55–59.
3. Проблемы и решения, возникающие при бурении скважин в неустойчивых глинисто-аргиллитовых породах / Д.А. Бакирова, Д.В. Шаляпин, Э.В. Бабушкин, Д.Л. Бакиров, В.Г. Кузнецов // Нефть и газ. – 2020. – № 2. – С. 18–25.
4. Леушева Е.Л., Алиханов Н.Т., Бровкина Н.Н. Исследование реологических свойств безбаритного бурового раствора повышенной плотности // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 976–985. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.38>
5. Кузьмин В.Н., Трефилова Т.В. Ингибирование буровых растворов с целью безаварийной проходки интервалов неустойчивых глинистых пород // Нефтяная провинция. – 2020. – № 1. – С. 73–82.
6. Уляшева Н.М., Леушева Е.Л., Галишин Р.Н. Разработка композиции бурового раствора для проводки наклонно направленного ствола скважины с учетом реологических параметров жидкости // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 454–461. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.8>
7. Шмелев В.А. Автоматизированные системы управления процессом бурения нефтяных и газовых скважин, состояние разработок // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 9. – С. 49–59.
8. Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Разработка составов промывочных жидкостей для повышения эффективности бурения твердых горных пород // Записки Горного института. – 2016. – Т. 219. – С. 412–420. DOI: 10.18454/PMI.2016.3.412
9. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.24>
10. Kadochnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of technology for hydromechanical breakdown of mud plugs and improvement of well cleaning by controlled buckling of the drill string // Appl. Sci. – 2022. – Vol. 12. – 6460. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136460>
11. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks / R. Gizatullin, M. Dvoynikov, N. Romanova, V. Nikitin // Energies. – 2023. – Vol. 16. – 2387. DOI: 10.3390/en16052387
12. Двойников М.В. Исследования технико-технологических параметров бурения наклонных скважин // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.18454/pmi.2017.1.86>
13. Двойников М.В., Куншин А.А. Повышение эффективности бурения наклонных и горизонтальных скважин // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – № 4 (100). – С. 98–101.

14. Российские и зарубежные роторно-управляемые системы / В.В. Никишин, П.А. Блинов, В.Г. Гореликов, В.А. Терехин // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. – 2023. – № 1. – С. 52–58.
15. Чудинова И.В., Николаев Н.И. Разработка состава и исследование свойств бурового раствора для бурения скважин в неустойчивых глинистых породах // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 8. – С. 85–89.
16. Gorelikov V.G. et al. Investigation of thermal operational regimes for diamond bit drilling operations // International Journal of Engineering. – 2019. – Vol. 32. – № 5. – P. 790–793. DOI: 10.5829/ije.2019.32.05b.21
17. Drilling the new 5G-5 branch hole at Vostok Station for collecting a replicate core of old meteoric ice / A.V. Turkeev, N.I. Vasilev, V.Y. Lipenkov, A.V. Bolshunov, A.A. Ekaykin, A.N. Dmitriev, D.A. Vasilev // Annals of Glaciology. – 2021. – Vol. 62. – № 85–86. – P. 305–310. DOI: 10.1017/aog.2021.4
18. Двойников М.В., Кучин В.Н., Минцаев М.И. Разработка вязкоупругих систем и технологии изоляции водоносных горизонтов с аномальными пластовыми давлениями при бурении нефтегазовых скважин // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 57–65. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7
19. Кочнев А.А., Зотиков В.И., Галкин С.В. Анализ влияния геолого-технологических показателей на эффективность технологии радиального бурения на примере эксплуатационных объектов Пермского края // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/12/16>
20. A numerical study on the application of stress cage technology / P. Abdollahpour, Tabatabaee S.S. Moradi, E. Leusheva, V. Morenov // Energies. – 2022. – Vol. 15. – 5439. DOI: 10.3390/en15155439
21. Leusheva E., Morenov V., Liu T. Dependence of the equivalent circulation density of format drilling fluids on the molecular mass of the polymer reagent // Energies. – 2021. – Vol. 14. – 7639. DOI: 10.3390/en14227639
22. Кравчук М.В., Уляшева Н.М. Выбор бурового раствора при вскрытии терригенных отложений на месторождениях Тимано-Печорской провинции // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 2. – С. 42–44.
23. Преимущества применения буровых растворов на углеводородной основе при бурении нефтяных и газовых скважин / В.Ю. Гришконец, Ю.С. Давыдов, Т.А. Редкин, Л.В. Николаева, А.В. Карпиков // Науки о Земле и недропользование. – 2013. – № 2 (43). – С. 95–102.
24. Petrakov D., Kupavykh K., Kupavykh A. The effect of fluid saturation on the elastic-plastic properties of oil reservoir rocks // Curved and Layered Structures. – 2020. – Vol. 7. – № 1. – P. 29–34. DOI: 10.1515/cls-2020-0003
25. Мухаметшин В.В. Устранение неопределенностей при решении задач воздействия на призабойную зону скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 40–50.
26. Третьяков И.А. Преимущества применения буровых растворов на углеводородной основе при бурении нефтяных и газовых скважин // Трибуна ученого. – 2020. – № 11. – С. 122–128.
27. Тумаев М.О., Ханжигитов Т.Е., Кожина Т.В. Ингибированные буровые растворы для вскрытия терригенных отложений большой толщины с применением силиката натрия // Технологические инновации в современном мире: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. – Уфа, 28 ноября 2019. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2019. – Т. 1. – С. 11–15. EDN ETNCMF
28. Полимерные буровые растворы. Эволюция «из грязи в князи» / В.П. Овчинников, Н.А. Аксенова, Л.А. Каменский, В.А. Федоровская // Бурение и нефть. – 2014. – № 12. – С. 24–29.
29. Сидоркин Д.И., Купавых К.С. Обоснование выбора винтовых насосных установок как энергоэффективной технологии механизированной добычи // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 143–151. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-2-143-151
30. Утяжеленный инвертный эмульсионный раствор с регулируемым реологическим профилем для строительства горизонтальных скважин / П.А. Хвоцин, И.Л. Некрасова, О.В. Гаршина, Г.В. Конесев // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 35–44.
31. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling / M.V. Dvoynikov, D.I. Sidorkin, A.A. Kunshin, D.A. Kovalev // Appl. Sci. – 2021. – Vol. 11. – 7517. DOI: 10.3390/app11167517
32. Изменение состава и структуры терригенных пород под воздействием буровых растворов / И.Л. Некрасова, К.П. Казымов, А.А. Предеин, П.А. Хвоцин, П.А. Клыков, О.В. Гаршина, Б.М. Осовецкий, Н.Е. Молоштанова, В.М. Жданов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 6. – С. 37–43.
33. Леушева Е.Л., Алиханов Н.Т. Исследование безбаритных буровых растворов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 123–130.
34. Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности бурения твердых горных пород // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 38–47.
35. Нуцкова М.В., Кучин В.Н., Ковальчук В.С. Профилактика и ликвидация осложнений, возникающих при заканчивании скважин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 14–26.
36. Jia J., Jia Y., Li X. Analysis, design, and experimental verification of a parallel wireless power and data transmission method for rotary steering systems // Energies. – 2022. – Vol. 15. – 6349. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176349>
37. Разработка технологии освоения газовых и газоконденсатных скважин на регулируемом давлении / М.В. Двойников, Н.Ю. Кузнецова, Я.Д. Минаев, Е.В. Крюков // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2022. – № 1. – С. 23–29.
38. Moazzeni A.R., Khamsehchi E. Rain optimization algorithm (ROA): a new metaheuristic method for drilling optimization solutions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 195. – 107512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107512>
39. Anya A., Emadi H., Watson M. A novel apparatus and method for lab-scale study of wellbore integrity using CT imaging and analysis // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2023. – Vol. 220. – 111209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111209>

40. Experimental simulation of obtaining the reflector azimuth using azimuthal acoustic reflection tool in the underwater environment / J. Ben, W. Qiao, X. Che, X. Ju, J. Lu, B. Men // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 195. – 107649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107649>
41. Artificial intelligence techniques and their applications in drilling fluid engineering: a review / O.E. Agwu, J.U. Akpabio, S.B. Alabi, A. Dosunmu // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 167. – P. 300–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.019>
42. A study on the contribution of the intermolecular forces to the stabilization of the high internal phase emulsion: a combined experimental and molecular dynamics study / P. Shi, A. Yu, H. Zhang, M. Duan, W. Pu, R. Liu // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 220. – 111188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111188>
43. Developing new correlations for asphaltene deposition involving SARA fractions and colloidal instability index / A.A. Sulaimon, A. Habineswaran, L. Rajan, A. Qasim, N.P. Christiana, P.I. Murungi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 220. – 111143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111143>
44. Field performance and numerical simulation study on the toe to heel air injection (THAI) process in a heavy oil reservoir with bottom water / H. Anbari, J.P. Robinson, M. Greaves, S.P. Rigby // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 220. – 111202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111202>
45. Modified Laponite synthesized with special wettability as a multifunctional additive in oil-based drilling fluids / X. Ni, H. Shi, J. Zhang, R. Liu, J. Wang, R. Cheng // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 220. – 111211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111211>
46. Applying massively parallel interface for MPFA scheme with advanced linearization for fluid flow in porous media / L. Li, M. Khait, D. Voskov, K.M. Terekhov, A. Abushaikh // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 220. – 111190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111190>
47. Evaluating the rock wettability using multi-frequency dielectric measurements: A review on the fundamental concept and experimental approach / A. Oshaish, A. Hassan, M. Mahmoud, A. El-Husseiny, S. Al-Ofi, A. Al-Yaseri // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 220. – 111177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111177>
48. The heterogeneity of petrophysical and elastic properties in carbonate rocks controlled by strike-slip fault: a case study from Yangjikan outcrop in the Tarim basin / F. Gong, Y. Song, L. Zeng, G. Zou // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 220. – 111170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111170>
49. Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud / A.O. Gbadamosi, R. Junin, Y. Abdalla, A. Agi, J.O. Oseh // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 172. – P. 1226–1234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.09.097>
50. Experimental investigation of the effect of drilling fluid on wellbore stability in shallow unconsolidated formations in deep water / X. Zhao, Z. Qiu, M. Wang, J. Xu, W. Huang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 175. – P. 595–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.067>
51. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations / Y. Zhao, A. Noorbakhsh, M. Koopaliipour, A. Azizi, M.M. Tahir // *Engineering with Computers*. – 2020. – Vol. 36. – P. 587–595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00715-2>
52. A novel approach to pore pressure modeling based on conventional well logs using convolutional neural network / M. Matinkia, A. Amraeiniya, M.M. Behboud, M. Mehrad, M. Bajolvand, M.H. Gandomgoun, M. Gandomgoun // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 211. – 110156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110156>
53. A comprehensive review of nanoparticles in water-based drilling fluids on wellbore stability / A.H. Abdullah, S. Ridha, D.F. Mohshim, M. Yusuf, H. Kamyab, S. Krishna, M.A. Maoinsar // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 308. – 136274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136274>
54. Alhemdi A., Gu M. Method to account for natural fracture induced elastic anisotropy in geomechanical characterization of shale gas reservoirs // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 101. – 104478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104478>
55. New approach to evaluate the equivalent circulating density (ECD) using artificial intelligence techniques / K.Z. Abdelgawad, M. Elzenary, S. Elkatatny, M. Mahmoud, A. Abdulraheem, S. Patil // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1569–1578. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0572-y>
56. Ibrahim A. A review of mathematical modelling approaches to tackling wellbore instability in shale formations // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 89. – 103870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103870>
57. A numerical approach to investigate the impact of acid-asphaltene sludge formation on wormholing during carbonate acidizing / I. Khurshid, E.W. Al-Shalabi, I. Afgan, H. Al-Attar // *Journal of Energy Resources Technology*. – 2022. – Vol. 144. – № 6. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4051738>
58. Hassan A., Elkatatny S., Al-Majed A. Coupling rate of penetration and mechanical specific energy to Improve the efficiency of drilling gas wells // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 83. – 103558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103558>
59. A new method for determination of optimal borehole drilling location considering drilling cost minimization and sustainable groundwater management / A.N. Khan, B.W. Kim, A. Rizwan, R. Ahmad, N. Iqbal, K. Kim, D.H. Kim // *ACS Omega*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06854>
60. Optimization of drilling parameters using improved play-back methodology / V. Ramba, S. Selvaraju, S. Subbiah, M. Palanisamy, A. Srivastava // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 206. – 108991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108991>
61. Rajabi M., Ghorbani H., Aghdam K.Y. Sensitivity analysis of effective factors for estimating formation pore pressure using a new method: the LSSVM-PSO algorithm // *Journal of Petroleum Geomechanics*. – 2022. – Vol. 4. – № 3. – P. 96–113. DOI: <https://doi.org/10.22107/JPG.2022.298551.1152>

62. Reducing the number of trees in a forest using noisy features / Y. Manzali, Y. Akhiat, M. Chahhou, M. Elmohajir, A. Zinedine // *Evolving Systems*. – 2022. – P. 1–18. DOI: 10.1007/s12530-022-09441-5.
63. Zhong R., Salehi C., Johnson Jr R. Machine learning for drilling applications: a review // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 108. – 104807. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104807.
64. Olukoga T.A., Feng Y. Practical machine-learning applications in well-drilling operations // *SPE Drilling & Completion*. – 2021. – Vol. 36. – № 04. – P. 849–867. DOI: 10.2118/205480-PA.

Информация об авторах

Вячеслав Валерьевич Никишин, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 125993, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2. Nikishin_VV@pers.spmi.ru, <http://orcid.org/0009-0008-7973-1856>

Павел Александрович Блинов, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 125993, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2. Blinov_PA@pers.spmi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4379-8804>

Вадим Алексеевич Терехин, магистрант кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 125993, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2. terekhinvada@mail.ru

Поступила в редакцию: 07.06.2023

Поступила после рецензирования: 01.11.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Chudyk I.I., Femiak Y.M., Orynychuk M.I., Sudakov A.K., Riznychuk A.I. New methods for preventing crumbling and collapse of the borehole walls. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2021, no. 4, pp. 17–22. DOI: 10.33271/nvngu/2021-4/017.
2. Bakirov D.L., Fattakhov M.M., Babushkin E.V., Kovalev V.N., Shurupov A.M., Fatikhov V.V., Teregulov O.F. Improvement of construction technology horizontal wells. *Oilfield business*, 2020, no. 1, pp. 55–59. (In Russ.)
3. Bakirova D.A., Chaliapin D.V., Babushkin E.V., Bakirov D.L., Kuznetsov V.G. Problems and solutions arising when drilling wells in unstable clay-mudstone rocks. *Oil and gas*, 2020, no. 2, pp. 18–25. (In Russ.)
4. Leusheva E.L., Alikhanov N.T., Brovkina N.N. Rheological research properties of high-density barite-free drilling fluid. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 976–985. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.38>
5. Kuzmin V.N., Trefilova T.V. Inhibition of drilling fluids for the purpose accident-free drilling of intervals of unstable clay rocks. *Oil provinces*, 2020, no. 1, pp. 73–82. (In Russ.)
6. Ulyasheva N.M., Leusheva E.L., Galishin R.N. Drilling composition development solution for drilling a directional wellbore, taking into account the rheological fluid parameters. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 454–461. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.8>
7. Shmelev V.A. Automated control systems for the drilling process oil and gas wells, the state of development. *Automation, telemechanization and communications in the oil industry*, 2021, no. 9, pp. 49–59. (In Russ.)
8. Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Development of compositions of flushing liquids to improve the efficiency of drilling in hard rocks. *Journal of Mining Institute*, 2016, vol. 219, pp. 412–420. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.3.412>
9. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Rationale for the choice of mode parameters well drilling by rotary controlled systems. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 24–29. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.24>
10. Kadochnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of technology for hydro-mechanical breakdown of mud plugs and improvement of well cleaning by controlled buckling of the drill string. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 13, 6460. DOI: 10.3390/app12136460
11. Gizatullin R., Dvoynikov M., Romanova N., Nikitin V. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 5, 2387. DOI: 10.3390/en16052387
12. Dvoynikov M.V. Research on technical and technological parameters of enclosed drilling. *Notes of the Mining Institute*, 2017, vol. 223, pp. 86–92. (In Russ.) DOI: 10.18454/pmi.2017.1.86
13. Dvoynikov M.V., Kunshin A.A. Improving the efficiency of drilling inclined and horizontal wells. *Business Magazine Neftegaz.RU*, 2020, no. 4 (100), pp. 98–101. (In Russ.)
14. Nikishin V.V., Blinov P.A., Gorelikov V.G., Terexhin V.A. Russian and foreign rotary-controlled systems. *Business magazine NEFTEGAZ.RU*, 2023, no. 1, pp. 52–58. (In Russ.) Available at: <https://vk.cc/cmy0Bd> (accessed 22 March 2023).
15. Chudinova I. V., Nikolaev N. I. Development of composition and investigation of properties of drilling mud for drilling wells in unstable clay rocks. *The successes of modern natural science*, 2019, no. 8, pp. 85–89. (In Russ.)
16. Gorelikov V.G. Investigation of thermal operational regimes for diamond bit drilling operations. *International Journal of Engineering*, 2019, vol. 32, no. 5, pp. 790–793. DOI: 10.5829/ije.2019.32.05b.21
17. Turkeev A.V., Vasilev N.I., Lipenkov V.Y., Bolshunov A.V., Ekaykin A.A., Dmitriev A.N., Vasilev D.A. Drilling the new 5G-5 branch hole at Vostok Station for collecting a replicate core of old meteoric ice. *Annals of Glaciology*, 2021, vol. 62, no. 85–86, pp. 305–310. DOI: 10.1017/aog.2021.4
18. Dvoynikov M.V., Kuchin V.N., Mintsaeve M.Sh. Development of viscoelastic systems and technology of isolation of aquifers with abnormal reservoir pressures during drilling of oil and gas wells. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 57–65. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2021.1.7

19. Kochnev A.A., Zotikov V.I., Galkin S.V. Analysis of the influence of geological technological parameters on the effectiveness of radial drilling technology on the example of operational objects in perm region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 20–29. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/12/16>
20. Abdollahpour P., Tabatabaee Moradi S.S., Leusheva E., Morenov V. A numerical study on the application of stress cage technology. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 15, 5439. DOI: 10.3390/en15155439
21. Leusheva E., Morenov V., Liu T. Dependence of the equivalent circulation density of formate drilling fluids on the molecular mass of the polymer reagent. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 22, 7639. DOI: 10.3390/en14227639
22. Kravchuk M.V., Ulyasheva N.M. The choice of drilling mud during the opening of terrigenous deposits in the deposits of the Timan-Pechora province. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2015, no. 2, pp. 42–44. (In Russ.)
23. Grishkovets V.Yu., Davydov Yu.S., Redkin T.A., Nikolaeva L.V., Karpikov A.V. Advantages of using hydrocarbon-based drilling fluids when drilling oil and gas wells. *Earth Sciences and subsoil use*, 2013, no. 2 (43), pp. 95–102. (In Russ.)
24. Petrakov D., Kupavykh K., Kupavykh A. The effect of fluid saturation on the elastic-plastic properties of oil reservoir rocks. *Curved and Layered Structures*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 29–34. DOI: 10.1515/cls-2020-0003
25. Mukhametshin V.V. Elimination of uncertainties in solving the problems of impact on the bottomhole well zone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 40–50. (In Russ.)
26. Tretyakov I.A. Advantages of using hydrocarbon-based drilling fluids when drilling oil and gas wells. *Tribune of the Scientist*, 2020, no. 11, p. 122–128. (In Russ.)
27. Tumaev M.O., Khanzhigitov T.E., Kozhina T.V. Inhibited drilling fluids for opening large-thickness terrigenous deposits using silicate sodium. *Technological innovations in the modern world*, 2019, vol. 1 pp. 11–15. (In Russ.)
28. Ovchinnikov V.P., Aksenova N.A., Kamensky L.A., Fedorovskaya V.A. Polymer drilling fluids. Evolution "from mud to princes". *Drilling and oil*, 2014, no. 12, pp. 24–29. (In Russ.)
29. Sidorkin D.I., Kupavykh K.S. Rationale for the choice of screw pumps installations as an energy-efficient technology for artificial lift. *Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*, 2021, vol. 64, no. 2, pp. 143–151. (In Russ.) DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-2-143-151
30. Khvoshchin P.A., Nekrasova I.L., Garshina O.V., Konesev G.V. Weighted invert emulsion solution with adjustable rheological profile for the construction of horizontal wells. *Oil and gas business*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 35–44. (In Russ.)
31. Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Kunshin A.A., Kovalev D.A. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 16, 7517. DOI: 10.3390/app11167517
32. Nekrasova I.L., Kazymov K.P., Predein A.A., Khvoshchin P.A., Klykov P.A., Garshina O.V., Osovetsky B.M., Moloshtanova N.E., Zhdanov V.M. Changes in the composition and structure of terrigenous rocks under the influence of drilling fluids. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2017, no. 6, pp. 37–43. (In Russ.)
33. Leusheva E.L., Alikhanov N.T. Investigation of barrier-free drilling fluids. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology, oil and gas and mining*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 123–130. (In Russ.)
34. Nikolaev N. I., Leusheva E. L. Theoretical and experimental studies of the efficiency of drilling of solid rocks. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology, oil and gas and mining*, 2015, no. 15, pp. 38–47. (In Russ.)
35. Nutskova M.V., Kuchin V.N., Kovalchuk V.S. Prevention and elimination of complications arising during the completion of wells. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology, oil and gas and mining*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 14–26. (In Russ.)
36. Jia J., Jia Y., Li X. Analysis, design, and experimental verification of a parallel wireless power and data transmission method for rotary steering systems. *Energies*, 2022, vol. 15, 6349. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176349>
37. Dvoynikov M.V., Kuznetsova N.Yu., Minaev Ya.D., Kryukov E.V. Development of technology for the development of gas and gas condensate wells at controlled pressure. *Drilling Contractors*, 2022, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)
38. Moazzeni A.R., Khamsehchi E. Rain optimization algorithm (ROA): a new metaheuristic method for drilling optimization solutions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 195, 107512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107512>
39. Anya A., Emadi H., Watson M. A novel apparatus and method for lab-scale study of wellbore integrity using CT imaging and analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 220, 111209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111209>
40. Ben J., Qiao W., Che X., Ju X., Lu J., Men B. Experimental simulation of obtaining the reflector azimuth using azimuthal acoustic reflection tool in the underwater environment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 195, 107649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107649>
41. Agwu O.E., Akpabio J.U., Alabi S.B., Dosunmu A. Artificial intelligence techniques and their applications in drilling fluid engineering: a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 167, pp. 300–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.019>
42. Shi P., Yu A., Zhang H., Duan M., Pu W., Liu R. A study on the contribution of the intermolecular forces to the stabilization of the high internal phase emulsion: a combined experimental and molecular dynamics study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 220, 111188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111188>
43. Sulaimon A.A., Habineswaran A., Rajan L., Qasim A., Christiana N.P., Murungi P.I. Developing new correlations for asphaltene deposition involving SARA fractions and colloidal instability index. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 220, 111143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111143>
44. Anbari H., Robinson J.P., Greaves M., Rigby S.P. Field performance and numerical simulation study on the toe to heel air injection (THAI) process in a heavy oil reservoir with bottom water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 220, 111202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111202>
45. Ni X., Shi H., Zhang J., Liu R., Wang J., Cheng R. Modified Laponite synthesized with special wettability as a multifunctional additive in oil-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 220, 111211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111211>

46. Li L., Khait M., Voskov D., Terekhov K.M., Abushaikh A. Applying Massively Parallel Interface for MPFA scheme with advanced linearization for fluid flow in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 220, 111190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111190>
47. Oshaish A., Hassan A., Mahmoud M., El-Husseiny A., Al-Ofi S., Al-Yaseri A. Evaluating the rock wettability using multi-frequency dielectric measurements: A review on the fundamental concept and experimental approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 111177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111177>
48. Gong F., Song Y., Zeng L., Zou G. The heterogeneity of petrophysical and elastic properties in carbonate rocks controlled by strike-slip fault: a case study from Yangjikan outcrop in the Tarim basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, vol. 220, 111170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111170>
49. Gbadamosi A.O., Junin R., Abdalla Y., Agi A., Oseh, J.O. Experimental investigation of the effects of silica nanoparticle on hole cleaning efficiency of water-based drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 172, pp. 1226–1234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.09.097>
50. Zhao X., Qiu Z., Wang M., Xu J., Huang W. Experimental investigation of the effect of drilling fluid on wellbore stability in shallow unconsolidated formations in deep water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 595–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.067>
51. Zhao Y., Noorbakhsh A., Koopialipoor M., Azizi A., Tahir M.M. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations. *Engineering with Computers*, 2020, vol. 36, pp. 587–595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00715-2>
52. Matinkia M., Amraeiniya A., Behboud M.M., Mehrad M., Bajolvand M., Gandomgoun M.H., Gandomgoun M. A novel approach to pore pressure modeling based on conventional well logs using convolutional neural network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 211, 110156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110156>
53. Abdullah A.H., Ridha S., Mohshim D.F., Yusuf M., Kamyab H., Krishna S., Maoinsar M.A. A comprehensive review of nanoparticles in water-based drilling fluids on wellbore stability. *Chemosphere*, 2022, 136274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136274>
54. Alhemdi A., Gu M. Method to account for natural fracture induced elastic anisotropy in geomechanical characterization of shale gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, vol. 101, 104478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104478>
55. Abdelgawad K.Z., Elzenary M., Elkatatny S., Mahmoud M., Abdullaheem A., Patil S. New approach to evaluate the equivalent circulating density (ECD) using artificial intelligence techniques. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, pp. 1569–1578. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0572-y>
56. Ibrahim A. A review of mathematical modelling approaches to tackling wellbore instability in shale formations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, vol. 89, 103870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103870>
57. Khurshid I., Al-Shalabi E.W., Afgan I., Al-Attar H. A numerical approach to investigate the impact of acid-asphaltene sludge formation on wormholing during carbonate acidizing. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, vol. 144, no. 6. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4051738>
58. Hassan A., Elkatatny S., Al-Majed A. Coupling rate of penetration and mechanical specific energy to improve the efficiency of drilling gas wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 83, 103558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103558>
59. Khan A.N., Kim B.W., Rizwan A., Ahmad R., Iqbal N., Kim K., Kim D.H. A new method for determination of optimal borehole drilling location considering drilling cost minimization and sustainable groundwater management. *ACS Omega*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06854>
60. Ramba V., Selvaraju S., Subbiah S., Palanisamy M., Srivastava A. Optimization of drilling parameters using improved play-back methodology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 206, 108991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108991>
61. Rajabi M., Ghorbani H., Aghdam K.Y. Sensitivity analysis of effective factors for estimating formation pore pressure using a new method: the LSSVM-PSO algorithm. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 2022, vol. 4, no. 3, pp. 96–113. DOI: <https://doi.org/10.22107/JPG.2022.298551.1152>
62. Manzali Y., Akhlat Y., Chahhou M., Elmohajir M., Zinedine A. Reducing the number of trees in a forest using noisy features. *Evolving Systems*, 2022, pp. 1–18. DOI: [10.1007/s12530-022-09441-5](https://doi.org/10.1007/s12530-022-09441-5)
63. Zhong R., Salehi C., Johnson Jr R. Machine learning for drilling applications: a review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, vol. 108, 104807. DOI: [10.1016/j.jngse.2022.104807](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104807)
64. Olukoga T.A., Feng Y. Practical machine-learning applications in well-drilling operations. *SPE Drilling & Completion*, 2021, vol. 36, no. 04, pp. 849–867. DOI: [10.2118/205480-PA](https://doi.org/10.2118/205480-PA)

Information about the authors

Vyacheslav V. Nikishin, Cand. Sc., Associate Professor, St. Petersburg Mining University, 2, V.O. 21st line, St. Petersburg, 125993, Russian Federation. Nikishin_VV@pers.spmi.ru; <http://orcid.org/0009-0008-7973-1856>

Pavel A. Blinov, Cand. Sc., Associate Professor, St. Petersburg Mining University, 2, V.O. 21st line, St. Petersburg, 125993, Russian Federation. Blinov_PA@pers.spmi.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4379-8804>

Vadim A. Terekhin, Master Student, St. Petersburg Mining University, 2, V.O. 21st line, St. Petersburg, 125993, Russian Federation. terekhinva@mail.ru

Received: 07.06.2023

Revised: 01.11.2023

Accepted: 22.03.2024

UDC 621.316.728

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4504

Power hardware-in-loop emulation of a battery for charging systems and grid applications

H.M. Jassim^{1,2✉}, A.M. Ziuzev¹, M.V. Mudrov¹

¹ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

² University of Technology, Baghdad, Iraq

✉ Khdzhassim@urfu.ru

Abstract. Relevance. Batteries are playing an increasingly vital role in power systems due to their utilization in various applications including microgrids, electric vehicles, sustaining geographically isolated communities, and energization of automated devices. Since they are considered as the enabling technology for renewable energy integration, the absence of battery systems from islanded microgrids can result in decreased system reliability and compromised performance due to the intermittency of local sources. Nevertheless, the hazardousness associated with their charging mechanism has led to the urgent continuous development of charging technologies and battery management systems. **Aim.** To develop a safe testbed to examine the functionality of newly produced battery charging stations and battery managers without employing actual physical batteries to avoid the hazardous manipulation of batteries and increase flexibility during the design and validation stage. This is accomplished by modeling the electrochemical dynamics of the battery system and integrating the device-under-test to a DC converter, which reacts based on these modeled dynamics. **Novelty.** This work adapts one of the most successful Li-ion battery models available in the literature and utilizes it to interact with power electronic devices that exchange power signals. Unlike other work in this field, the design is based on power hardware-in-loop principles and has minimized power consumption characteristics due to its unique configuration. The constructed computer model can be easily reparametrized to describe the dynamics of various battery capacities. **Methods.** MATLAB-based simulations of the proposed testbed were conducted for high and low power capacity. A LabView-based program was interfaced with the testbed hardware using a NI-DAQ board to validate the proposed design practically. The testbed hardware components were entirely developed from scratch for experimentation purposes. **Results.** The proposed testbed successfully imitated the dynamics of the battery, while the practical results concurred the simulated ones.

Keywords: battery emulation, battery system, renewable energy, power hardware-in-loop, battery chargers

For citation: Jassim H.M., Ziuzev A.M., Mudrov M.V. Power hardware-in-loop emulation of a battery for charging systems and grid applications. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 200–211. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4504

УДК 621.316.728

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4504

Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Программно-аппаратная эмуляция аккумуляторной батареи для систем зарядки и энергосистем

Х.М. Джассим^{1,2✉}, А.М. Зюзев¹, М.В. Мудров¹

¹ Уральский Федеральный Университет, Россия, г. Екатеринбург

² Технологический университет, Ирак, г. Багдад

✉ Khdzhassim@urfu.ru

Аннотация. Актуальность. Аккумуляторные батареи играют все более важную роль в энергосистемах из-за их использования в различных приложениях, включая микросети, электромобили, электроснабжение географически изолированных районов и питание автоматизированных устройств. Поскольку они считаются технологией, обеспе-

чивающей интеграцию возобновляемых источников энергии, отсутствие аккумуляторных систем в изолированных микросетях может привести к снижению их надежности и производительности из-за прерывистого характера генерирования энергии. Особенности, характерные для функционирования аккумуляторных батарей, приводят к необходимости развития технологий и контроля систем заряда батарей. **Цель:** разработка испытательного стенда для контроля зарядных станций и устройств управления ими без использования реальных аккумуляторных батарей, позволяющего повысить безопасность и гибкость этапов проектирования и контроля зарядных станций. Поставленная цель достигается путем компьютерного моделирования динамики электрохимических процессов аккумуляторной батареи и интеграции тестируемого устройства с преобразователем постоянного тока, управляемого этой моделью. **Новизна.** В работе применительно к задаче адаптируется одна из самых известных моделей литий-ионных аккумуляторов для управления взаимодействием силовых электронных устройств, которые обмениваются энергией. В отличие от других работ в этой области, конструкция основана на принципах аппаратного обеспечения силовой части и имеет минимальные показатели энергопотребления благодаря своей уникальной конфигурации. Предложенная компьютерная модель параметрируется для описания процесса заряда-разряда аккумуляторов различной емкости. **Методы:** компьютерное моделирование и экспериментальная проверка предлагаемых решений. Разработана MATLAB-модель испытательного стенда повышенной мощности. Модель аккумуляторной батареи и системы управления малого энергопотребления в среде LabView с платой NI-DAQ использована для экспериментального подтверждения предлагаемых решений. Для построения экспериментального испытательного стенда разработаны специальные аппаратные компоненты, включая контроллеры. **Результаты.** Предложенный испытательный стенд успешно имитировал процесс заряда батареи, при этом практические результаты совпали с расчетными результатами, полученными при моделировании.

Ключевые слова: эмулятор, аккумуляторная система, возобновляемые источники энергии, программно-аппаратный комплекс, зарядные устройства

Для цитирования: Джассим Х.М., Зюзев А.М., Мудров М.В. Программно-аппаратная эмуляция аккумуляторной батареи для систем зарядки и энергосистем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 200–211. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4504

Introduction

Energy storage devices are gradually becoming the key element in the modernized power system, especially with the high penetration of renewable distributed generators RDGs. This is a direct consequence of the increased consumer demand and environmental concerns that encouraged the adoption of storage devices as a solution with reduced environmental impact. Recently, storage devices have been extensively utilized in grid applications including frequency and voltage regulation, providing ancillary services like demand peak shaving, balancing renewable energy generation and consumption, and proportionately increasing the reliability of the distribution grid [1]. It has been alleged that the integration of storage devices in conjunction with renewable energy generators, like photovoltaic solar cells, can improve the impact of greenhouse gases by 36–68% for each 1.5 kW of installed capacity [2]. Battery systems, particularly lithium-ion batteries, are considered as the leading candidate for such applications due to their high-energy density, stable performance, long life cycle, and high power capacity [3, 4]. These battery-on-grid applications was boosted by the considerable advancements in microgrids and the rising popularity of renewable-based generation, which can sustain partitions of the electricity grid. Large countries, like the Russian Federation, with numerous communities sprawling across its massive land area can undoubtedly benefit from such

configuration to support the local demand of critical and isolated loads during emergencies and grid faults. The proper implementation of battery systems is not confined to on-grid applications, but includes the vogue application in the electric transportation sector which is gaining a lot of attention globally due to the flourishing electric vehicles EVs demand and global regulations [5]. The adoption of EVs has attracted massive investments in the development of charging infrastructure to satisfy the demand and handle the problem of driving anxiety. Although these applications, exemplified in Fig. 1, advertise the importance of battery storage devices and their vast implementations, battery systems suffer from safety challenges due to their thermal, physical, and electrical characteristics [4, 6–8]. Lithium metal is a flammable solvent with exothermal activities and thermal runaway [6]. Thermal, electrical, and aging factors are some of the drivers of lithium-ion batteries hazardous operation, which can lead to high temperatures and combustion. Electrical factors, on the other hand, are caused by the mismanagement of charging and discharging [4]. For this reason, state-of-the-art battery management systems are required to be developed to induce safety and reliability in operation of such systems [8]. Furthermore, hardware and software safety systems and regulations that address concerns such as degradation, cyberattacks, and energy mismatch are imperative for efficient battery utilization [6, 7]. New charging station topologies are also

continuously evolving to satisfy the changing operational requirements for each specific application. Nevertheless, these synthesized hardware and software technologies cannot be tested on real-physical batteries due to the potential safety issues previously mentioned. It is, therefore, prime essential to manifest a testing platform that can imitate the power behavior of batteries while interacting with these deployed technologies in the design and verification phase. Ergo, the academic literature is enriched with articles on battery emulation based on various designs.

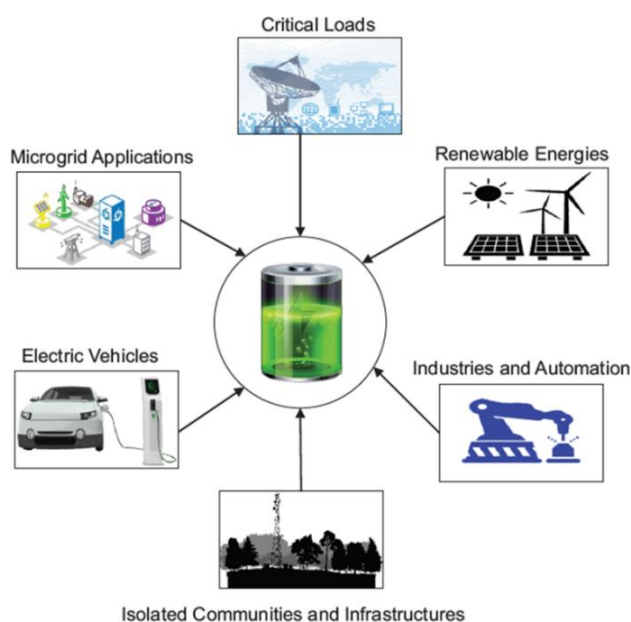


Fig. 1. Applications of battery systems

Рис. 1. Применение аккумуляторных систем энерго-снабжения

The majority of contributions in this field are concentrated on constructing a battery simulator based on hardware-in-loop technologies to test designed battery management systems (BMSs). These systems are ordinarily in constantly developing, since they are obligated to manage thermal and cellular behavior of the battery pack. This direction is similar to our current work in terms of the utilization of generic battery models to test modern designs that typically interact with batteries in real-time. The architecture of such testbeds consists of a battery model, battery simulator deployed on a DSP processor, and power component to establish the communication between the BMS under test and the simulation testbench. However, no power signals are exchanged during these tests and the employed battery models usually focus on analyzing a cell thermal behavior and thermal dynamics. The research in [9] utilized HIL technology to test the cell-to-cell performance of the emulated battery system for

BMS applications. The testbench consisted of the battery model in real-time on a dSPACE GmbH battery emulator as an equivalent circuit model for battery cells. The testbench also consists of a switch box, thermal sensors, and a battery charger modeled as an electric vehicle charger. Specialized battery emulators were reviewed and applied to test some commercially available BMS controllers [10]. These emulators are expensive and devised to test certain low-voltage functionalities of battery cells which makes them unsuitable for power tests. Other research implemented the XPC technology, which consists of two PCs, working in real-time, to emulate the battery behavior in managing both the power and temperature of the battery pack [11]. However, only models of the battery and controllers were tested without assessing the capabilities of the power components. A cell-in-loop technology was employed to test the response of a live cell installed in an environmental container [12]. This method is equally effective only when the BMSs and thermal reaction of battery cells are the center of interest. Another application of battery emulators is to test the battery behavior when integrated and interacting with the power grid and power components. A DC/DC converter was used to emulate a decentralized battery management system [13]. The device under test DUT, in this case, was the DC/DC converter while programmable loads, communication devices, and local controllers were used to emulate the simulation scenario. A converter-based battery emulation was introduced in [14] to simulate the battery-on-grid functionality. The testbed used active, reactive, and inertial controllers to investigate the effect of the battery system on a microgrid. The interaction between the regenerative load and battery system in a microgrid scenario was studied in [15], using the HIL testbench. Renewable energy sources were also emulated in the test to establish their effectiveness in charging the battery module.

There is a small portion of the reviewed research articles addressed the implementation of a converter-based battery emulator. These types of testbeds imply the power characteristics of the battery system are to be examined. An interleaved DC/DC boost converter was utilized to emulate the discharge behavior of lithium-ion batteries for testing certain battery-operated applications [16]. A stable power supply was used to energize the converter while a thevenin-based battery model was used with voltage and current controllers to manipulate the converter output and achieve battery emulation. The design, however, can only test the discharge characteristics of the battery. Another research proposed a parametric battery emulator, using a comprehensive set of power converters [17]. The primary objective of the experimental setup is to evaluate the interaction of the battery system with the

electric vehicle motoring system based on specific driving patterns. Consequently, the power converters that compose the testbench are controlled to imitate the behavior of both batteries and drive systems in both discharge and charge “regenerative” modes of operation. For emulating the charging and discharging behavior of the battery system, a two-converter testbench was proposed to accomplish more accurate control over the bidirectionally exchanged power [18]. A z-type converter with a single switch was controlled to emulate the battery voltage using a battery model and voltage controller. Power hardware-in-loop (PHIL) technology was used collectively with an RTDS specialized system hardware, which includes a lithium-ion physical model, to evaluate the impact of battery-on-grid operation and related issues [19]. Rapid and stiff frequency rate of change in response to RDGs integration into the electricity grid was studied and mitigated using a battery system in an emulation environment [20]. The authors, however, employed a physical battery model which is arguably a hazardous experimentation provided that extensive safety measures had to be taken.

This research proposes a PHIL-based testbed for battery charging operation. Although the proposed testbed concurs with the reviewed literature in principal objectives and mechanisms, the design building blocks and utilized equipment are deployed to increase efficiency, flexibility, and reduce losses of the testbed. A converter-based battery emulator was employed to imitate the power dynamics of the lithium-ion battery module. A half-bridge topology was utilized for that purpose, which is typically characterized by its simplicity and reduced switching losses. The emulator circuit shares the same power terminals as the charging station DC bus, which implies the exchanged energy between the emulator and charger is in balance. This induced stability and increased safety of emulation as the absorbed energy by the battery emulator fed back to the charging station. The battery dynamics was developed based on the Shepherd model, which accepts the battery current as input and produces the emulated battery voltage as an output. Voltage and current controllers are employed to regulate the emulation converter such that the resulting behavior resembles real battery operation. The ultimate objective of the proposed testbed is to emulate the battery power interactions when connected to the charging station in a manner that enables researchers and designers to safely test their software and hardware products before operational deployment. MATLAB simulations were conducted to verify the design requirements and expected results. While LABVIEW software along with specialized hardware, completely designed and assembled in our laboratory, was used to validate the testbed practically.

Battery model

Many battery models have been reviewed and introduced in the literature. Depending on the targeted applications, these models largely contrast in the addressed parameters and variables. However, this work is more implicated in a battery model that can formulate and emulate the relationship between the battery voltage and current based on the input power. These models must exploit the V-I characteristics of the battery pack while projecting the internal battery parameters on its power behavior. The model utilized in MATLAB/Simulink software, called the Shepherd model, is considered a sufficient, efficient, and accurate description of the battery states during charging and discharging modes. This model was sufficiently developed based on the combined work of different research papers to emulate power, thermal, and aging variations [21–23]. For lithium-ion batteries operating in the discharge mode the input battery current is greater than zero and the discharge characteristics adhere to the following equation:

$$f(i, i^*) = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int i} i^* - K \frac{Q}{Q - \int i} \int i + A \exp^{-B \int i}.$$

While, when the battery current is reversed, the battery operates in the changing mode and the characteristic equation becomes:

$$f(i, i^*) = E_0 - K \frac{Q}{\int i + 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - \int i} \int i + A \exp^{-B \int i}.$$

Considering the battery internal resistance, the battery voltage equation can be written as:

$$V_{\text{battery}} = f(i, i^*) - R_{\text{int}} \cdot i.$$

In these equations E_0 is the constant battery voltage, K is the polarization constant in V/Ah, Q is the battery capacity in Ah, $\int i$ is the integration of the battery current to represent the extended capacity in Ah, i^* is the filtered battery current, A is the amplitude of the exponential region in V, B is the exponential capacity in Ah^{-1} , R_{int} is the battery internal resistance in ohm, i is the unfiltered battery current. By proper selection of battery voltage and capacity, these parameters are adjusted for battery scaling purposes.

The developed model acquires the battery current as input and manifests the battery voltage as output. As illustrated in the model, the battery voltage contains nonlinear dynamics that vary with the supplied current, the battery internal parameters, and the current capacity. Therefore, scaling the battery system by recalibrating the battery internal parameters significantly influences the battery dynamics. Although the adopted MATLAB model accounts for the aging and thermal characteristics of the battery, they are

omitted from this work, since they are not relevant to the essential target of the charger testbed.

Proposed testbed design

As previously established, the adopted fundamental concept of this work is to emulate the V-I dynamics of the battery system while interacting with the charging station. The synthesized emulator should behave explicitly like a real battery imitating power interactions based on the selected battery parameters. The proposed battery power simulator contains the following parts:

- bidirectional DC/DC converter to emulate the battery voltage;
- battery model operating on a processor or computer to estimate the actual battery voltage;
- charging station, consisting of the active rectifier and DC/DC charging converter;
- control systems of the charging station and the emulator circuit.

The block diagram of the charging station, connected to the battery emulator, is demonstrated in Fig. 2. The objective of the single-phase rectifier is to stabilize the DC voltage across the DC line capacitor and supply the DC/DC charger with the required current. A half-bridge DC/DC converter was employed to implement the DC charger with the target of adequately providing the charging current through the output filter. This is considered as the simplest charging station which employs uncomplicated battery manager. More complicated charging station architectures are provided in [24].

The battery emulator circuit is illustrated in Fig. 3. As it is seen in the figure, the buck-boost DC/DC converter is utilized to emulate the battery characteristics by emulating the battery voltage on the input terminals. The essential idea here is to manage the voltage and current on the DC line between the device under test DUT “Battery Charging Station” and the DC/DC converter. This can be achieved by

supplying voltage in the opposite direction to the charger voltage to emulate battery voltage response. The DC/DC converter will ensure voltage balance by constantly changing the operation mode from buck to boost and vice versa. The following equations represent the battery emulator function:

$$V_{battery} = V_{charger} - V_{emulator},$$

$$I_{battery} = i = -I_{charger}.$$

It is imperative that the battery current is in the opposite direction to the charger current because one is considered an energy generator while the other is assumed as an energy consumer. As it was previously mentioned, the battery model receives the measured battery current and produces the battery voltage, which will be considered as a reference for the outer loop control system of the DC/DC converter. It should be emphasized that both the battery charger and the emulator circuit are supplied from the same DC line, which implies that the excess exchanged energy is fed back to the DC line where the voltage level is maintained by the rectifier control system. Capacitor and inductor filter parameters in Fig. 2, 3 are designed based on the maximum allowable voltage and current ripples respectively.

Fig. 4 exhibits the DC charger control system. The outer control loop receives the measured battery voltage and compares it to the set reference voltage. The generated error is regulated using a PI controller, which formulates the current reference signal. Current limitation is integrated with the voltage controller, which represent the maximum and minimum allowable current, I_{Max} and I_{Min} respectively. A second PI controller is then utilized as a current controller and produces the charger control signal. This signal is limited to the range of 0–0.95, which represents the controller saturation levels shown in Fig. 4. The control signal is then translated to PWM signals to control the switching patterns of the DC/DC charger shown in Fig. 2.

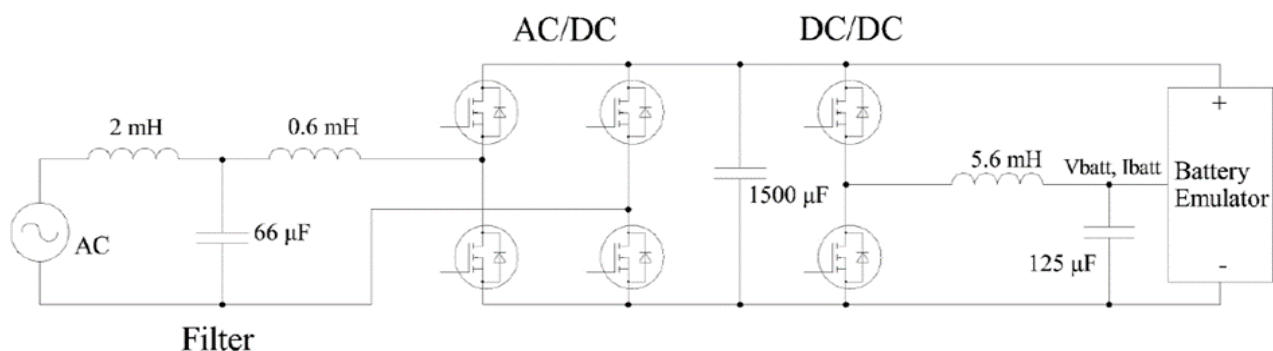


Fig. 2. Charging station connected to battery emulator terminals

Рис. 2. Схема подключения зарядной станции к эмулятору аккумуляторной батареи

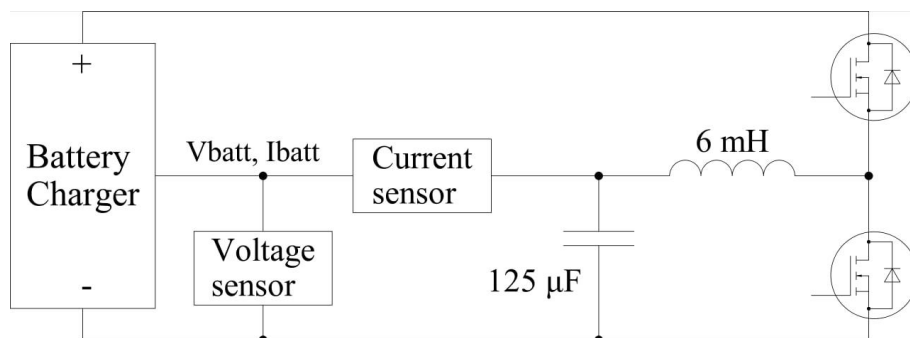


Fig. 3. Battery emulator circuit connected to charging station terminals

Рис. 3. Схема подключения эмулятора аккумулятора к зарядной станции

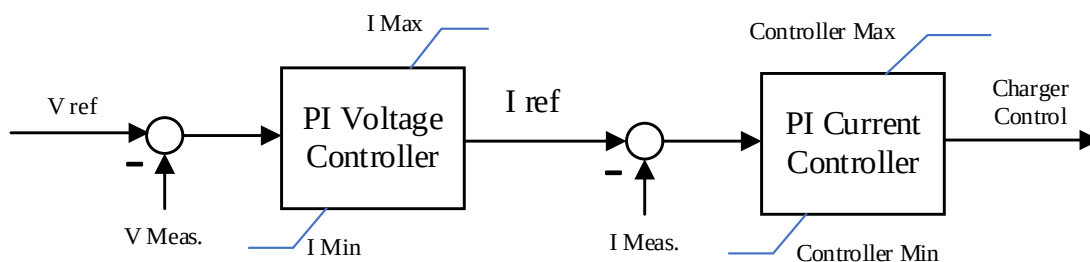


Fig. 4. DC charger control loops

Рис. 4. Структура системы управления зарядной станцией

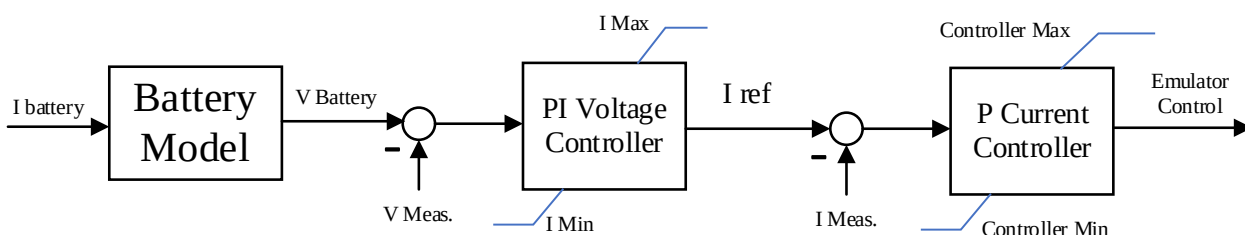


Fig. 5. Battery emulator control loops

Рис. 5. Структура системы управления эмулятором аккумуляторной батареи

In a similar manner, the battery voltage in the DC line is compared to the modeled battery voltage, and the resulting error signal is regulated by the voltage controller. The output of the PI controller is assumed to be the reference current for the DC/DC emulator converter and is compared to the measured battery current to generate a current error signal. A proportional P controller is then employed to control the internal current and produce the reference signal to the PWM generator. The current controller also acts to limit the exchanged current between the DC line and the buck-boost converter, which will protect the DUT from driving high currents or returning circulating current. The employed P controller is also used to calibrate the system when the battery model is changed, or the tested charger is varied. This particularity is very important, since the proposed

testbed is adaptable and should work with all tested charging stations and for all battery models. The block diagram of the battery emulator control system is demonstrated in Fig. 5.

Simulation results

In this section, the proposed testbed is constructed in a MATLAB environment to evaluate design parameters and tune the controller blocks. The emulator converter circuit and the charging station are designed in SIMULINK with standard electrical library tools while the battery voltage and capacity were specified based on commercial heavy-duty CTS-Lifepo4 battery modules used in truck applications. The battery model parameters, exhibited in Table 1, were extracted from the exponential discharge curve of the battery. This curve can be obtained from

parametrization of generic battery block in MATLAB and plotting the battery characteristics. These parameters significantly vary when the battery rating is changed due to the high nonlinearity of the discharge characteristic curve. Control loops for both the charging station and battery emulator were equally developed jointly in the same environment while a battery model was developed from scratch based on the previously illustrated lithium-ion battery dynamics. The motivation for such an action is to allow a more flexible battery model design and adapt the developed function in various environments for practical implementation.

Table 1. System parameters (high power)

Таблица 1. Параметры системы (высокая мощность)

Module Модуль	Parameter Параметр	Value Величина	Units Ед. измерения
Battery charger Зарядное устройство	Total power Полная мощность	≈10	kW/кВ
	Output current Выходной ток	19	A/A
	Output voltage Выходное напряжение	540	V/B
Battery Model Модель аккумулятора	E_0	542.179	V/B
	K	0.0397	$V(Ah)^{-1} / B(A \cdot ч)^{-1}$
	Q	100	Ah/A·ч
	A	44.507	V/B
	B	0.6106	Ah ⁻¹ /A·ч ⁻¹
	Battery time constant Постоянная времени батареи	1	sec/c
	Initial state of charge Исходное состояние заряда	50	%
	R_{int}	0.053	Ω

Fig. 6 shows the battery charging response assuming that the charger set voltage is relatively higher than the battery-rated voltage. The charging curve is increasing gradually while the battery voltage and modeled voltage are temporarily stabilized to 496 V, which corresponds to the rated battery voltage at the specified state of charge (SoC). The battery voltage represents the voltage of the emulator circuit, while the modeled battery voltage represents the voltage estimated by the numerical model. The fluctuations experienced in the emulated battery voltage are due to the electronic devices employed attempting to imitate the battery behavior. These fluctuations, however, were attenuated when the emulator dynamics converged to the modeled battery dynamics. This behavior is common in PHiL testbeds where a short period is required for the emulation device to perform its task. The battery current attained at 19 A, while the negative sign indicates the direction of the current from the charging station to the battery pack. Although this test verified the effectiveness of the proposed testbed, the accomplishment of the

experiential setup is challenging because of the chosen battery parameters and rated power of the charging station. As a consequence, the battery parameters are scaled down by selecting lower voltage and battery capacity. The new parameters are exhibited in Table 2.

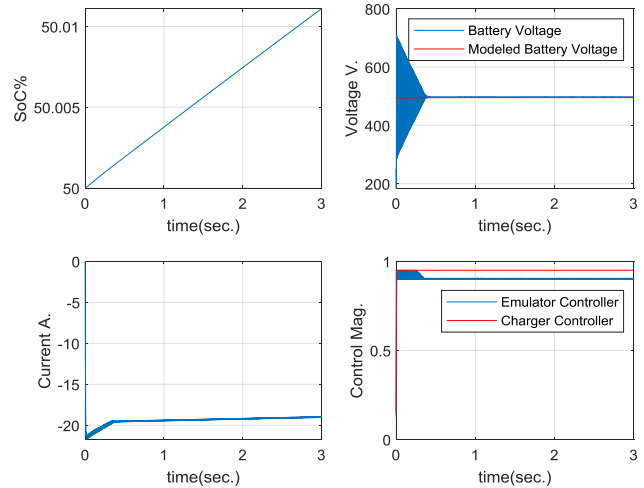


Fig. 6. Simulation of battery emulator (high power)

Рис. 6. Моделирование процесса заряда на эмуляторе аккумуляторной батареи большой мощности

Table 2. System parameters (low power)

Таблица 2. Параметры системы (низкая мощность)

Module Модуль	Parameter Параметр	Value Величина	Units Ед. измерения
Battery charger Зарядное устройство	Total power Полная мощность	15.375	kW/кВ
	Output current Выходной ток	3.75	A/A
	Output voltage Выходное напряжение	4	V/B
Battery model Модель аккумулятора	E_0	4.1748	V/B
	K	0.0057	$V(Ah)^{-1} / B(A \cdot ч)^{-1}$
	Q	5.06	Ah/A·ч
	A	0.32331	V/B
	B	12.067	Ah ⁻¹ /A·ч ⁻¹
	Battery time constant Постоянная времени батареи	1	sec/c
	Initial state of charge Исходное состояние заряда	50	%
	R_{int}	0.007608	Ω

Once again, the simulation is conducted based on the new parametrization, and the results are compiled in Fig. 7. In the figure, the SoC rate of change is steeper than the previously obtained results, which corresponds to the lower battery capacity. The modeled and simulated battery voltages are concurring with each other, which inferring that both charger and emulator controllers are properly functioning. The dynamic fluctuation in the battery voltage was also observed for

less than a second then the emulated voltage coincided with modeled voltage. Battery current is maintained at 3.75 A, while the control signals are retained at a lower level, which also corresponds to the reduced battery rating. Finally, it is immensely important to mention that during the previous tests, the proposed emulator results were evaluated against the results obtained by MATLAB generic battery model. It was discovered that the errors between the estimated battery behavior for both modules were bounded and insignificant. Their errors fluctuated around zero with an RMS value of less than 1. This implies that the developed model and the corresponding testbed are accurately operating with comparable results to the frequently used SIMULINK battery emulation block.

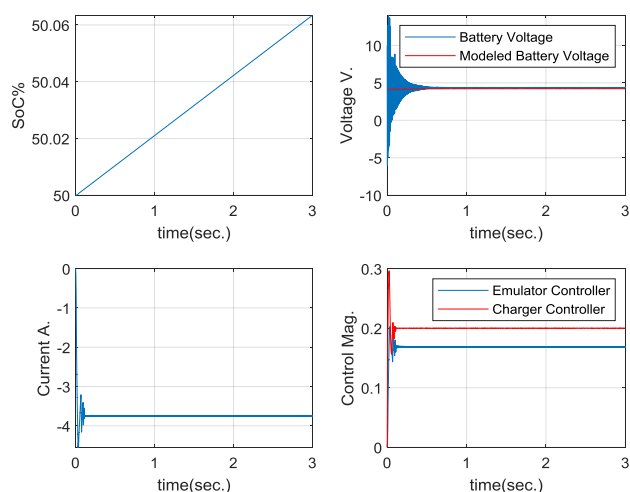


Fig. 7. Simulation of battery emulator (low power)

Рис. 7. Моделирование процесса заряда на эмуляторе аккумуляторной батареи малого энергопотребления

Practical results

In this part, the testbed design is implemented practically for validation purposes. The formulated models and controllers in the previous section are transferred into the LABVIEW G-language environment to establish a more empirical and experimental-based real-time application. The experimental layout is shown in Fig. 8 where the main hardware components are labeled. A dedicated NI-DAQ PXI-6025e interface card was employed to establish the communication between the LABVIEW environment and the integrated hardware. This DAQ device has an astonishing speed of 200 kS/s for analog input functionality, which qualifies it to read from multiple channels almost simultaneously. Furthermore, it was utilized to deliver the control signals from the computer to the controller module. Although this DAQ device can produce an output voltage signal within the range of ± 10 V, the signals were scaled down to

accommodate the analog input capabilities of the Amigo Heart controller, which is based on STM microcontroller technology. This controller, which functions as a PWM signal generator, was developed by one of our team members to tackle the practical implementation of industrial control systems. In the design, each controller was employed to generate opposing polarities PWM signals that drive two transistors forming the corresponding converter leg. These power converters are wired to power filters that work contrary to each other to emulate the power characteristics of the battery system. Voltage and current sensors were installed between two power filters, while the sensed signals were wired back to the DAQ device. Scaling and calibration were conducted on both the computer and controller to compensate for the variable operational range of different components. Software filters were also implemented to isolate noise and prevent spiky measurements.

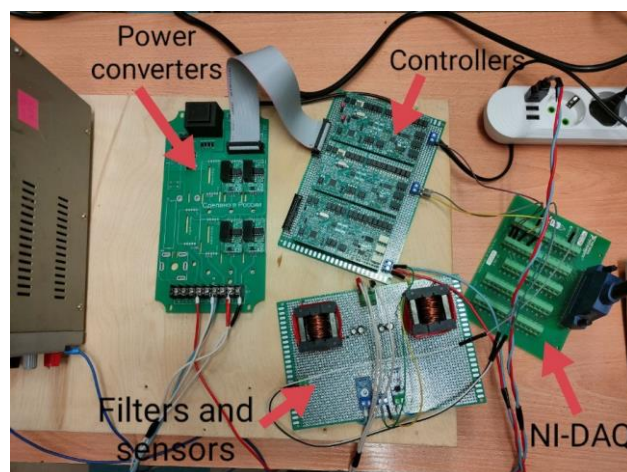


Fig. 8. Experimental setup of the proposed testbed (low power)

Рис. 8. Экспериментальный стенд зарядного устройства с эмулятором аккумуляторной батареи малого энергопотребления

The front panel of the developed LABVIEW program is exhibited in Fig. 9 [25]. This program double functions as a control and monitoring platform. The battery parameters can be specified within the panel, which means that the battery model can be scaled with simple modification. Sensor and controller calibration can also be performed using this interactive panel. Furthermore, the sensor measurements are demonstrated and registered.

Fig. 10 demonstrates the emulated and real measured voltages. The emulated voltage is generated by the real-time battery dynamics with real current as input to the model. The tracking error between two voltages is minimal, while the small fluctuations are

due to sensor noise and controller calibration. These fluctuations could be reduced by employing more accurate voltage and current sensors and upscaled hardware devices. This behavior is attenuated in higher power testbed according to the noise reduction characteristics of utilized sensors.

The measured battery current is illustrated in Fig. 11. The current maintained at 3.75 A level, which is considered as realization of the previously obtained MATLAB results. This current is the maximum allowable current by the currently available power supply unit.

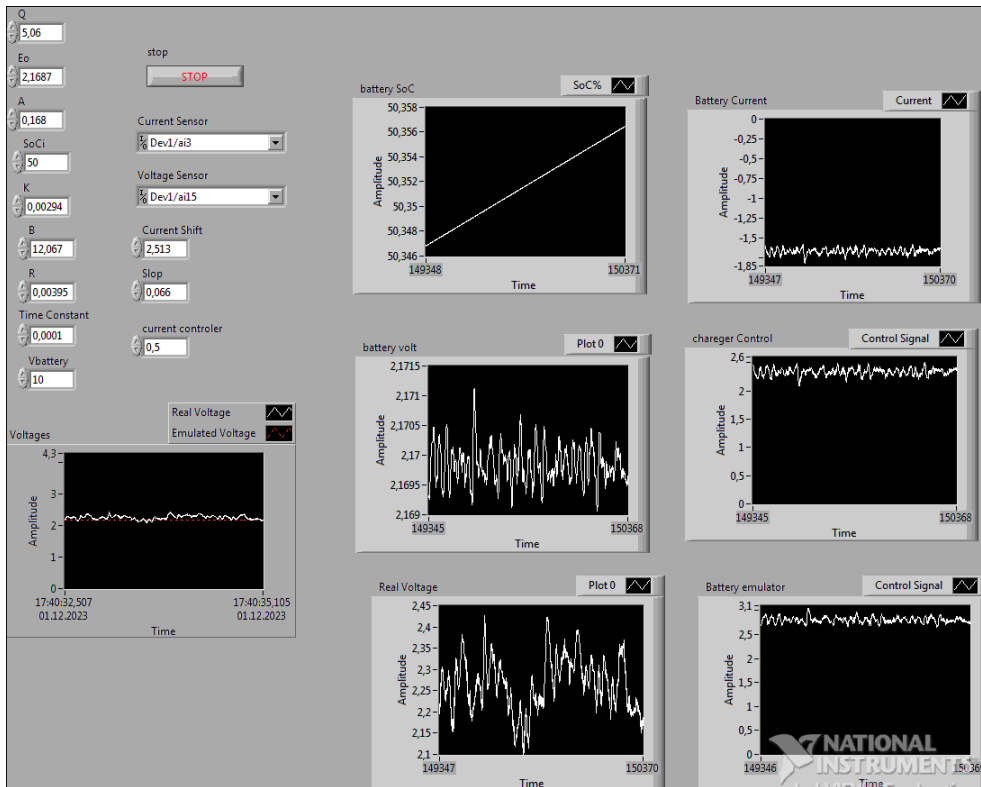


Fig. 9. Front panel of the LABVIEW control and monitoring center

Рис. 9. Лицевая панель центра управления и мониторинга экспериментальным стендом в среде LABVIEW

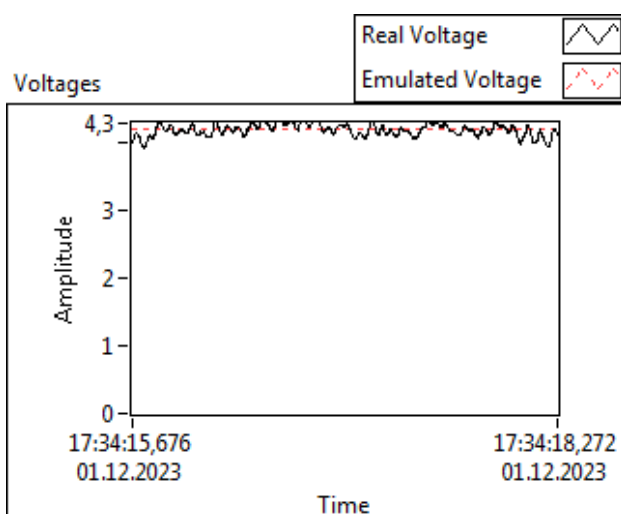


Fig. 10. Emulated and real battery voltage

Рис. 10. Диаграммы эмулируемого и реального напряжения батареи

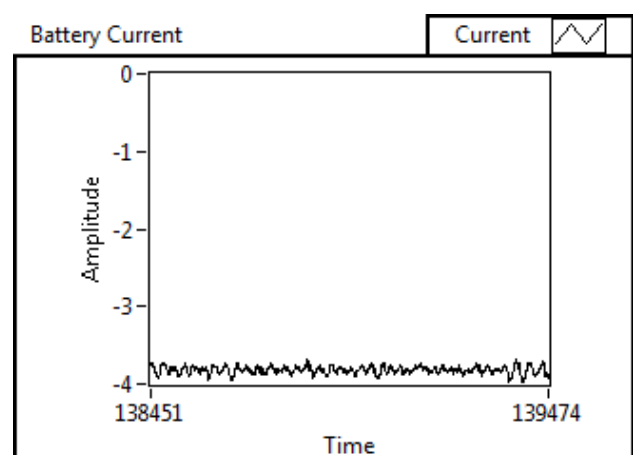


Fig. 11. Battery current

Рис. 11. Диаграмма тока заряда аккумуляторной батареи

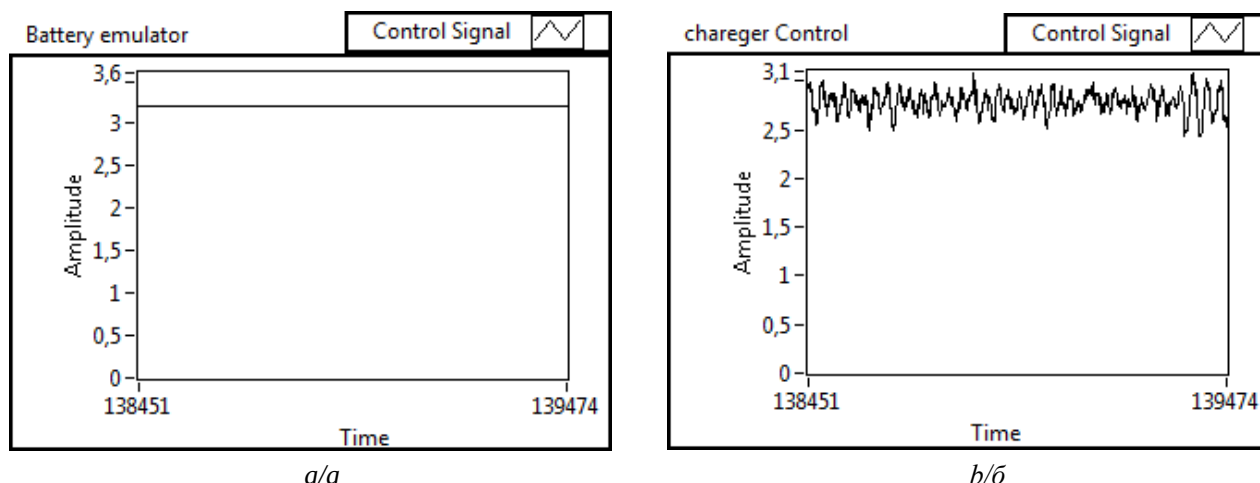


Fig. 12. Emulator (a) and charger (b) control signals

Рис. 12. Диаграммы сигналов управления эмулятором (а) и зарядным устройством (б)

Fig. 12 compares the generated control signals by the charging station and the battery emulator controllers. It can be observed that the emulator controller saturated at the maximum achievable control signal output 3.2 V, which represents the maximum analog input of the microcontroller system. The charger controller, however, fluctuates below the 3.1 V level. The proximity between two signals is crucial to accomplish power balance and battery emulation. The SoC of the emulated battery is shown in Fig. 13 with a gradually increasing value. This indicates that the battery is charging, and the direction of energy is from the charging station toward the emulated battery. The battery emulator can be made to test the discharge functionality. However, it is a less critical test, since the most hazardous battery behavior occurs in charging. Furthermore, the discharge process requires a load emulation, which is out of the scope of this research.

According to the exhibited performance and by comparing the MATLAB simulations with the obtained practical results, the proposed testbed effectively accomplished the desired design targets. The testbed can emulate a battery system with any capacity and functionality and can only be limited by the utilized hardware capabilities. Conclusively, the proposed testbed offers a more flexible battery emulation variant and satisfactory performance, with a substantially cheaper price tag than the commercially available counterparts.

The obtained results of the operational testbed indicated the possibility of utilizing the proposed design for testing real battery charging stations with the compliance with the international standers of electrical system installation parameters and test methods IEC 62933-2-1:2017 and IEC 62933-1:2018 for ESS. The tested system capacity was in compliance with the systematic performance testing procedures described in the standers under nominal voltage and current. Round-trip testing and other parametric tests like charge-discharge effectiveness were not carried out, since the discharge procedure lays outside the scope of this research. Furthermore, it should be mentioned that the designed testing power hardware devices obeyed the UL 1741 (2010) international standers for axillary enabling power devices.

Conclusion

The presence of batteries in power systems has become vitally important due to their regulative and energy-balancing functionates. Applications of battery systems range from automated devices and industries to grid-supporting and renewables integration. Industries and research facilities are increasingly engaging in the development of battery-related technologies to enable faster charging and safer utilization. Nevertheless, batteries pose significant

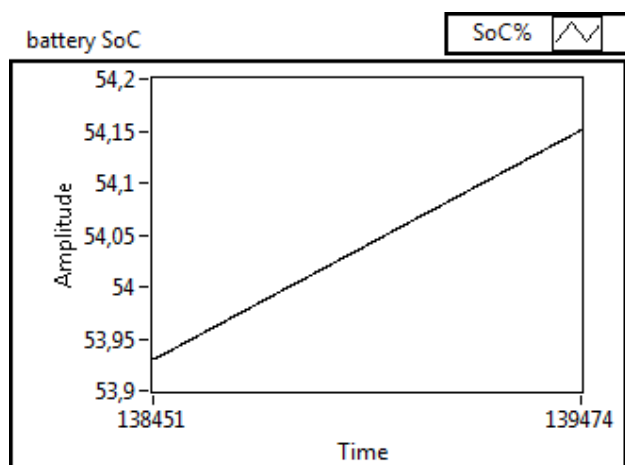


Fig. 13. Battery state of charge

Рис. 13. Диаграмма уровня заряда аккумуляторной батареи

hazards because of their exothermal reactions and electrical mismanagement. This is detrimental to the battery industry and researchers involved in this scientific sphere since they constantly devise modern charging stations and battery managers to accommodate the soaring demand of various applications. This work proposed a battery emulation testbed to allow safer and more flexible experimentation of newly created technologies during the design and validation stages. The testbed emulates the V-I characteristics of lithium-ion batteries by using battery model dynamics and power converter. This converter is regulated to interact with the charging station resembling the behavior of a physical battery. MATLAB simulations were conducted to verify the design parameters and set a reference of anticipated performance. Then, the proposed testbed was

implemented practically using the LABVIEW environment and synthesized power components. The practical results coincide with the simulated results, and the testbed accomplished the required performance. The designed testbed is quite competitive in terms of price and flexibility to other commercially available solutions. Future goals are to utilize the testbed flexibility and reconfigurability to emulate more complicated functionalities and control systems that involve the interaction of battery systems with different loads and grid scenarios. Furthermore, the battery model could be developed in the VHDL environment and deployed on an FPGA device to reduce the bulky size of the computer and associated interface devices. This modification will also eliminate the need for foreign licensed software.

REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akinyele D.O., Rayudu R.K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, vol. 8, pp. 74–91.
2. Akinyele D., Belikov J., Levron Y. Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 11, pp. 1760.
3. Richter F., Vie P.J., Kjelstrup S., Burheim O.S. Measurements of ageing and thermal conductivity in a secondary NMC-hard carbon Li-ion battery and the impact on internal temperature profiles. *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 250, pp. 228–237.
4. Ouyang D., Chen M., Huang Q., Weng J., Wang Z., Wang J. A review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 12, pp. 2483.
5. Ghavami M., Essakiappan S., Singh C. A framework for reliability evaluation of electric vehicle charging stations. *IEEE power and energy society general meeting (PESGM)*. Boston, MA, USA, IEEE, 2016. pp. 1–5.
6. Lisbona D., Snee T. A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, 2011, vol. 89, no. 6, pp. 434–442.
7. Wang B., Dehghanian P., Wang S., Mitolo M. Electrical safety considerations in large-scale electric vehicle charging stations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 6603–6612.
8. Akdere M., Giegerich M., Wenger M., Schwarz R., Koffel S., Fühner T., Waldhör S., Wachtler J., Lorentz V.R., März M. Hardware and software framework for an open battery management system in safety-critical applications. *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Florence, Italy IEEE, 2016. pp. 5507–5512.
9. Barreras J.V., Fleischer C., Christensen A.E., Swierczynski M., Schaltz E., Andreasen S.J., Sauer D.U. An advanced HIL simulation battery model for battery management system testing. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 5086–5099.
10. Tschritter C.D., Wetz D.A., Turner G.K., Heinzel J.M. Battery Management System (BMS) test stand utilizing a Hardware-in-the-Loop (HIL) emulated battery. *2021 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*. Arlington, VA, USA, IEEE, 2021. pp. 1–8.
11. Li Y., Sun Z., Wang J. Design for battery management system hardware-in-loop test platform. *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. Beijing, China, IEEE, 2009. pp. 399–402.
12. Bui T.M., Niri M.F., Worwood D., Dinh T.Q., Marco J. An advanced hardware-in-the-loop battery simulation platform for the experimental testing of battery management system. *2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT)*. Salerno, Italy, IEEE, 2019. pp. 1–6.
13. Reindl A., Singer T., Meier H., Niemetz M., Park S. Framework to Test DC-DC converters developed for a decentralized battery management system. *2021 International Conference on Applied Electronics (AE)*. Pilsen, Czech Republic, IEEE, 2021. pp. 1–6.
14. Boles J.D., Ma Y., Cao W., Tolbert L.M., Wang F. Battery energy storage emulation in a converter-based power system emulator. *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Tampa, FL, USA, IEEE, 2017. pp. 2355–2362.
15. Vijay V., Kini P.G., Viswanatha C., Adhikari N. Regenerative load emulator with battery charging for evaluation of energy management in microgrid with distributed renewable sources. *2015 Modern Electric Power Systems (MEPS)*. Wroclaw, Poland, IEEE, 2015. pp. 1–6.
16. Hidalgo-León R., Urquiza J., Litardo J., Jácome-Ruiz P., Singh P., Wu J. Li-ion battery discharge emulator based on three-phase interleaved DC-DC boost converter. *2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX)*. Guatemala City, Guatemala, IEEE, 2019. pp. 1–6.
17. Li R., Ji Y., Fu Y., Hu B., Hu H. Design and implementation of a parametric battery emulator based on a power converter. *IET Electric Power Applications*, 2022, vol. 16, no. 11, pp. 1300–1316.
18. Choi S.C., Lee J.H., Noh Y.S., Kim D.Y., Kim B.J., Won C.Y. Load and source battery simulator based on Z-source rectifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 32, no. 8, pp. 6119–6134.
19. Taylor Z., Akhavan-Hejazi H., Mohsenian-Rad H. Power hardware-in-loop simulation of grid-connected battery systems with reactive power control capability. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. Morgantown, WV, USA, IEEE, 2017. pp. 1–6.

20. Bruno S., Giannoccaro G., Iurlaro C., La Scala M., Rodio C. Power hardware-in-the-loop test of a low-cost synthetic inertia controller for battery energy storage system. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 9, pp. 3016.
21. Omar N., Monem M.A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van den Bossche P., Coosemans T., Van Mierlo J. Lithium iron phosphate based battery – assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*, 2014, vol. 113, pp. 1575–1585.
22. Saw L.H., Somasundaram K., Ye Y., Tay A.A.O. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2014, vol. 249, pp. 231–238.
23. Tremblay O., Dessaint L.A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 289–298.
24. Jassim Haider M., Ziuzev A., Kostylev A., Mudrov M., Khabarov A. Topologies and technologies of electric vehicle fast charging station: review and comparison. Electrotechnics, information technologies, control systems. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin*, 2023, no. 46, pp. 5–46.
25. Ziuzev A., Jassim Haider M., Mudrov M. *Real-time battery emulator*. Certificate of state registration of the computer program, no. 2024612062, 2024.

Information about the authors

Haider M. Jassim, Graduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation. khdzhassim@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2542-6150>

Anatolii M. Zyuzev, Dr. Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation. a.m.zyuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Mikhail V. Mudrov, Cand. Sc., Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation. m.v.mudrov@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7873-2437>

Received: 18.12.2023

Revised: 13.03.2024

Accepted: 22.03.2024

Информация об авторах

Хайдер Майтам Джассим, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. khdzhassim@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2542-6150>

Анатолий Михайлович Зюзов, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. a.m.zyuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Мудров Михаил Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. m.v.mudrov@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7873-2437>

Поступила в редакцию: 18.12.2023

Поступила после рецензирования: 13.03.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 26.04.2024. Дата выхода журнала: 30.04.2024.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 24,66. Уч.-изд. л. 22,30.
Заказ 113-24. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.

