



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 335, № 5, 2024

Издательство
Томского политехнического университета
2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Оствальд 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)
Конторович 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)
Чогегуров 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)
Мин Р.С., д-р хим. 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 геологических объектов.

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.

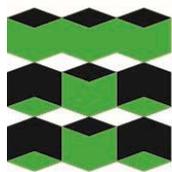
Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

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, № 5, 2024

Tomsk Polytechnic University Publishing House
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)
Belozеров 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)
Min R.S., Dr. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is 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 Communications).

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 (GA) 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 by international experts. 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

- Отбор скважин-кандидатов при обработке призабойной зоны пласта методами машинного обучения**
Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У., Ямкин А.В. 7
- Синтезированный метод оценивания состояния режимных параметров энергосистем для программных комплексов реального времени**
Бацева Н.Л., Фоос Ю.А., Синицын В.И., Белоусов В.В. 17
- Растворение многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири**
Половников В.Ю., Бульба Е.Е., Шелемехова С.Д., Любивый Е.В. 30
- Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усолья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой**
Цветкова Е.А., Поletaева В.И., Пастухов М.В. 39
- Приближенное решение задачи оптимального резервирования сложной технологической системы измельчения руды**
Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. 59
- Сорбция тяжелых металлов лигнинсодержащими осадками целлюлозно-бумажной промышленности**
Шатрова А.С., Богданов А.В., Тюкалова О.В. 66
- Рекомендации по проведению промысловых геофизических исследований профиля притока в горизонтальных скважинах с многостадийным ГРП**
Топольников А.С., Яруллин Р.К., Муртазин Р.Р., Торопов К.В. 75
- Характеристики и условия воспламенения влажных угольных частиц при высокотемпературном нагреве**
Косторева Ж.А., Сыродой С.В., Омаров А.А. 85
- Интегральная фитотоксичность нефтезагрязненного чернозема после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом**
Минникова Т.В., Колесников С.И., Минин Н.С. 95
- Оценка влияния различных факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира**
Проворная И.В., Филимонова И.В., Крутилина А.Д. 107
- Прогнозирование дебита горизонтальных скважин с применением модели машинного обучения**
Пискунов С.А., Давуди Ш. 118
- Цифровой графический мониторинг энергетического состояния нефтяных залежей**
Захаров Л.А., Пономарева И.Н., Мартюшев Д.А. 131
- Оценка экологической опасности золоторудного месторождения Улюк-Бар (Южный Урал)**
Казбулатова Г.М., Мичурин С.В. 142
- Микро-ГЭС с регулированием гидроагрегата по цепи якоря гидрогенератора**
Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М. 158
- Machine learning methods for selecting candidate wells for bottomhole formation zone treatment**
Yamkin M.A., Safiullina E.U., Yamkin A.V. 7
- Synthesized method for estimating a power system regime parameters state for real time hardware and software packages**
Batseva N.L., Foos Yu.A., Sinitin V.I., Belousov V.V. 17
- Thawing of permafrost rocks when exploiting geothermal wells in Eastern Siberia**
Polovnikov V.Yu., Bulba E.E., Shelemekhova S.D., Lyubivy E.V. 30
- Characteristics of wastewater from the industrial zone of Ussolye-Sibirskoe and its impact on hydrochemical composition of the Angara river during periods with different technogenic load**
Tsvetkova E.A., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. 39
- Approximate solution of the problem of redundancy optimization of a complex technological ore grinding system**
Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. 59
- Heavy metal sorption with lignin-containing sludge from the pulp and paper industry**
Shatrova A.S., Bogdanov A.V., Tyukalova O.V. 66
- Recommendations for field geophysical research of inflow profile in horizontal wells with multiple hydraulic fracturing**
Topolnikov A.S., Yarullin R.K., Murtazin R.R., Toropov K.V. 75
- Characteristics and conditions of ignition of wet coal particles during high-temperature heating**
Kostoreva Zh.A., Syrodoy S.V., Omarov A.A. 85
- Integral phytotoxicity of oil-contaminated chernozem after remediation with biochar and bacterial preparation**
Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Minin N.S. 95
- Assessment of the impact of different factors on changes in carbon intensity of the world economies**
Provornaya I.V., Filimonova I.V., Krutilina A.D. 107
- Horizontal well flow rate prediction applying machine-learning model**
Piskunov S.A., Davoodi Sh. 118
- Digital graphic monitoring of energy condition of oil reservoirs**
Zakharov L.A., Ponomareva I.N., Martyushev D.A. 131
- Environmental hazard assessment of the Ulyuk-Bar gold deposit (Southern Urals)**
Kazbulatova G.M., Michurin S.V. 142
- Micro-hydroelectric power station with a hydraulic unit regulation along a hydrogenerator anchor circuit**
Lukutin B.V., Shandarova E.B., Popov M.M. 158

- Estimation of erosion-deposition trends across the Quang Nam coast in the background of the climate variability**
Nguyen Tien Thanh
- Обзор современных методов сушки углей с оценкой их эффективности**
Саломатов В.В., Карелин В.А.
- Технология плазменного разрядного синтеза нитрит-ионов для очистки сточных вод от водорастворимых соединений реакционного азота**
Цхе А.А., Мостовщиков А.В., Пилипец Н.В., Цхе Ал.Ал.
- Компьютерное моделирование технологических параметров и методов предотвращения образования гидратов**
Савенок О.В., Жарикова Н.Х., Верисокин А.Е., Арутюнян А.С., Хадид М.
- Альтернативный метод получения квазимонодисперсной водомасляной эмульсии**
Филипас А.А., Кучман А.В., Исаев Ю.Н.
- Теллуру-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан)**
Николаева А.Н., Мазуров А.К.
- 172 Оценка тенденций эрозии и аккумуляции на побережье Куанг Нама на фоне изменчивости климата**
Нгуен Тьен Тхань
- 182 Review of modern coal drying methods with the evaluation of their efficiency**
Salomatov V.V., Karelin V.A.
- 194 Plasma discharge synthesis of nitrite ions for wastewater treatment from water-soluble compounds of reactive nitrogen**
Tskhe A.A., Mostovshchikov A.V., Pilipets N.V., Tskhe Al.Al.
- 202 Computer simulation of technological parameters and methods for preventing hydrate formation**
Savenok O.V., Zharikova N.Kh., Verisokin A.E., Arutyunyan A.S., Hadid M.
- 219 Alternative method for obtaining a quasi-monodisperse oil-water emulsion**
Filipas A.A., Kuchman A.V., Isaev Yu.N.
- 233 Tellurium-bismuth mineralization in ores of the Maleevskoe pyrite deposit (Eastern Kazakhstan)**
Nikolaeva A.N., Mazurov A.K.

УДК 622.276.66
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4428
Шифр специальности ВАК: 01.02.01

Отбор скважин-кандидатов при обработке призабойной зоны пласта методами машинного обучения

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* данной работы связана с тем, что в настоящее время на месторождениях нефти широко применяются различные технологии по увеличению нефтеотдачи и интенсификации притока, такие как обработка призабойной зоны соляной кислотой. В связи с массовым применением данной технологии на передний план выходят проблемные вопросы, в том числе связанные с выбором правильных на данный момент времени скважин-кандидатов для проведения обработки призабойной зоны. *Цель* данной работы заключается в оптимизации поиска скважин-кандидатов для проведения обработки призабойной зоны. В работе исследуется возможность использования моделей машинного обучения для предсказания ответа, будет ли скважина являться правильным кандидатом для проведения обработки призабойной зоны. *Объектом* исследования являются модели машинного обучения библиотеки sklearn. *Методы.* Для решения задачи предсказания, является ли скважина кандидатом для проведения обработки призабойной зоны, использовались три модели машинного обучения библиотеки sklearn: RandomForestClassifier (далее модель обучающего леса), DecisionTreeClassifier (далее модель обучающего дерева), LinearRegression (далее модель линейной регрессии). Для оценки качества построенных моделей использовались следующие метрики той же библиотеки: F1-score, AUC-ROC-score. *Результаты.* Наилучший результат при обучении показала модель обучающего леса. На метрике F1-score данная модель, примененная на тестовой выборке, показала сходимость 99,5 %, а на метрике AUC-ROC-score точность составила 99,9 %. Полученная точность указывает на корректность использования модели обучающего леса для решения задачи определения правильных скважин-кандидатов. *Заключение.* Получена модель машинного обучения, дающая предсказание, будет ли скважина являться правильным кандидатом для проведения обработки призабойной зоны, с точностью 99,5 %.

Ключевые слова: обработка призабойной зоны пласта, скважины-кандидаты, машинное обучение, модель обучающего леса, sklearn, F1-score

Для цитирования: Ямкин М.А., Сафиуллина Е.У., Ямкин А.В. Отбор скважин-кандидатов при обработке призабойной зоны пласта методами машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4428

UDC 622.276.66
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4428

Machine learning methods for selecting candidate wells for bottomhole formation zone treatment

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 currently various technologies are widely used in oil fields to increase oil recovery and intensify the inflow, such as treatment of a bottomhole zone with hydrochloric acid. In relation to the widespread use of this

technology, problematic issues are coming to the fore, including those related to the selection of the right candidate wells at a given time for carrying out well treatment. **Aim.** To optimize the search for candidate wells for carrying out treatment of the bottomhole zone. The work explores the possibility of using machine learning models to predict whether a well will be the right candidate for a well treatment. **Object.** Machine learning models of the sklearn library. **Methods.** To solve the problem of predicting whether a well is a candidate for bottomhole treatment, three machine learning models of the sklearn library were used: RandomForestClassifier, DecisionTreeClassifier, LinearRegression. To assess the quality of the constructed models, the following metrics from the same library were used: F1-score, AUC-ROC-score. **Results.** The learning forest model showed the best results during training. Using the F1-score metric, this model showed 99.5% convergence on the testing dataset, and using the AUC-ROC-score metric, the accuracy was 99.9%. The resulting accuracy indicates the correctness of using RandomForestClassifier model to solve the problem of identifying the correct candidate wells. **Conclusion.** The machine learning model was obtained that predicts with 99.5% accuracy whether a well will be the right candidate for a well treatment.

Keywords: treatment of a bottomhole formation zone, candidate wells, machine learning, RandomForestClassifier, sklearn, F1-score

For citation: Yamkin M.A., Safiullina E.U., Yamkin A.V. Machine learning methods for selecting candidate wells for bottomhole formation zone treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4428

Введение

Технология обработки призабойной зоны (ОПЗ) в настоящее время является популярной технологией увеличения нефтеотдачи и интенсификации притока [1]. Суть данной технологии заключается в нагнетании под высоким давлением жидкостной смеси, состоящей из кислоты, воды, интенсификаторов, ингибиторов, растворителей, стабилизаторов и других компонентов [2]. Кислота, находящаяся в закачиваемой смеси, растворяет горную породу, тем самым увеличивая ее пористость и проницаемость [3, 4]. В пласт закачивают различные составы в зависимости от состава горной породы. Так, например, если в горной породе будут преобладать карбонаты, закачиваться будет соляная кислота [5].

Технология обработка призабойной зоны пласта применяется на ряде стадий разработки месторождений. Так, например, на первой и второй стадиях данная технология используется для увеличения притока путем очистки призабойной зоны пласта (ПЗП) от загрязнений, которые вызваны бурением. На третьей и четвертой стадиях разработки месторождений данная технология используется для увеличения нефтеотдачи пластов путем соединения между собой нефтенасыщенных пластов, которые разъединены различными глинистыми пропластками для улучшения их гидродинамической связи [6].

В связи с широким применением данной технологии в нефтегазовых компаниях анализируется совокупность различных параметров для выбора правильных скважин-кандидатов для проведения ОПЗ. Одним из эффективных подходов для проведения данного анализа является использование моделей машинного обучения.

Актуальность

Оптимизация процесса отбора скважин-кандидатов с целью минимизации влияния челове-

ческого фактора, сокращения времени и исключения ошибок является актуальной проблемой. В данной работе исследуется решение данной проблемы при помощи машинного обучения. Рассматриваемая задача является задачей классификации: если скважина является правильным кандидатом для проведения ОПЗ, модель выдает ответ «1», если скважина не является правильным кандидатом для проведения ОПЗ, модель выдает «0» [7]. Объектом исследования являются скважины месторождения, расположенного в Западной Сибири, добывающие нефть с трех пластов. Данное месторождение является молодым и находится на второй стадии разработки. В связи с этим операция ОПЗ проводилась на скважине в том случае, если она не вышла на проектный режим после ее запуска в эксплуатацию. Машинное обучение применяется для скважин до попытки их вывода на режим для определения тех, которые потенциально не выйдут на режим. Это актуально в силу того, что увеличивает полезное время работы скважины, так как при проведении ОПЗ на правильных скважинах-кандидатах они сразу выйдут на режим. В качестве метода интенсификации притока или в качестве метода увеличения нефтеотдачи ОПЗ на данном месторождении не рассматривается. Скважина считается вышедшей на режим, если ее дебит соответствует рабочей характеристике насоса, динамический уровень установился на постоянной отметке и объем жидкости, отобранной из скважины, равен двум объемам ее обсадной колонны, но не менее двух объемов использованной при ремонте жидкости глушения [8].

Для создания корректной модели машинного обучения в данной работе с целью обучения выбраны признаки, которые анализируются инженерами-нефтяниками для принятия решения о назначении скважины кандидатом, чтобы прове-

сти ОПЗ. В соответствии с работой [9] для принятия решения об объявлении скважины кандидатом для проведения ОПЗ анализируются следующие факторы: тип, литология и расчлененность коллектора, степень обводненности скважины, температура пласта, дебит жидкости, скин-фактор, пластовое давление, толщина продуктивного горизонта, проницаемость.

На данный момент машинное обучение в основном применяется для решения следующих задач в нефтегазовой отрасли:

- 1) Модель временных рядов для предсказания пластового давления во времени. Данная модель используется вместо проведения гидродинамических исследований скважин (ГДИС) для построения кривой восстановления давления (КВД) [10, 11]. Точность данной модели составляет около 90 % [10, 11].
- 2) Классификационная модель для принятия решения, будет ли скважина являться кандидатом для проведения гидроразрыва пласта. Точность данной модели составила также около 90 % [12].
- 3) Регрессионная модель для предсказания дебита после проведения ОПЗ на скважине.

Таким образом, в литературе описано применение машинного обучения для ОПЗ только для решения регрессионной задачи. При этом использовалось простое дерево решений, описанное автором вручную [13, 14]. Для задачи, рассматриваемой в данной работе, решение с помощью методов машинного обучения не было найдено. В связи с этим в данной работе исследуется возможность использования моделей машинного обучения для предсказания ответа, будет ли скважина являться правильным кандидатом для проведения ОПЗ.

Методы исследования

В данной работе анализируются следующие модели машинного обучения: обучающего леса, обучающего дерева, линейной регрессии. Данные модели библиотеки `sklearn` [15] решают задачу классификации применительно к выбору скважин-кандидатов для проведения ОПЗ. Для оценки результатов обучения были использованы метрики F1-score и AUC-ROC из библиотеки `sklearn` [16].

На первоначальном этапе были выбраны данные для определения того, будет ли скважина являться правильным кандидатом. В соответствии с работой [14] рассматривались такие данные, как текущее пластовое давление, текущая обводненность скважины, дебит нефти, дебит жидкости, проницаемость, вязкость нефти, вязкость воды, вязкость жидкости, радиус контура питания скважины, расстояние между скважинами, диаметр эксплуатационной колонны, карбонатность коллектора, доломитизация коллектора, глинистость

коллектора, инклинометрия, расчлененность, изначальное пластовое давление, нефтенасыщенность, водонасыщенность, назначение скважины, плотность воды, плотность нефти, коэффициент продуктивности, пористость, нефтенасыщенная толщина, общая толщина коллектора, плотность добываемой смеси.

Выбранные данные выгружались из отчетов по исследуемому месторождению и включали в себя файлы MS Excel, а также различные документы в формате MS Word и PDF. Глинистость, карбонатность, доломитизация, начальное пластовое давление, пористость, нефтенасыщенная и общая толщины коллектора, водо- и нефтенасыщенность на момент начала разработки, расчлененность являлись постоянными для каждого из трех пластов месторождения. В связи с этим для увеличения скорости обучения и исключения мультиколлинеарности признаков параметры, постоянные для каждого из трех пластов, определялись одним, созданным искусственно, категориальным признаком – пласт, применение которого возможно лишь для рассматриваемого месторождения. В итоге модель машинного обучения обучалась на 18 признаках. В табл. 1 представлены признаки и их названия, которые использовались для обучения. Также был выделен целевой признак – является ли скважина правильным кандидатом для проведения ОПЗ или нет. Эти данные также были взяты из файлов формата MS Excel по исследуемому месторождению. Выборка данных была разделена на тренировочную и тестовую. При анализе моделей машинного обучения использовалась кросс-валидация на тренировочной выборке с подбором гиперпараметров [14]. Кросс-валидация позволяет более точно оценить сходимость моделей машинного обучения. Это осуществляется путем разделения тренировочной выборки на несколько частей (в соотношении, которое выбирает автор) и запуска модели машинного обучения несколько раз на различных подвыборках из тренировочной выборки, и оценки ее сходимости. В данной работе тренировочная выборка была разбита на 4 подвыборки, следовательно, 4 раза вычислялось значение метрики F1-score и по этим 4 значениям вычислялось среднее, которое и приводится в дальнейшем.

Следует отметить, что при обработке целевого признака был выявлен сильный дисбаланс классов, составляющий 0,05, то есть скважин-некандидатов больше, чем скважин-кандидатов, в 20 раз. Для борьбы с этой проблемой применялись методы, описанные далее в данной статье. Кроме этого, для борьбы с дисбалансом классов делалось следующее допущение: если скважина признавалась кандидатом для проведения ОПЗ, она являлась кандидатом в течение всего последующего месяца.

Таблица 1. Признаки для обучения

Table 1. Features for learning

Признак/Feature	Название в модели/Name in model
Текущее пластовое давление Current reservoir pressure	ТР Рпласт [атм]/TR Pplast [atm]
Текущая обводненность Current watercut	Обводненность V OIS протяжка [%] Watercut V OIS broach [%]
Дебит нефти Oil flow rate	Qн OIS протяжка [тн/сут] Qo OIS broach [t/d]
Дебит жидкости Liquid flow rate	Qж OIS протяжка [м³/сут] Ql OIS broach [m³/d]
Проницаемость Permeability	ТР Проницаемость [мД] TR Permeability [mD]
Вязкость нефти Oil viscosity	ТР Вязкость нефти в пл. усл. [спз] TR Oil viscosity in reservoir condition [spz]
Вязкость воды Water viscosity	ТР Вязкость воды в пл. усл. [спз] TR Water viscosity in reservoir condition [spz]
Вязкость жидкости Liquid viscosity	ТР Вязкость жидкости [спз] TR Liquid viscosity [spz]
Радиус контура питания скважины Well feed circuit radius	r_k_skv
Диаметр эксплуатационной колонны скважины Well production string diameter	ТР Двнутри ЭК [мм] TR Dinner PS [mm]
Инклинометрия Inclinometry	Смещение по линии устье–забой, м Displacement along the wellhead line, m
Назначение скважины Well purpose	Назначение_Нагнетательные, Назначение_Нефтяные, Назначение_Разведочные Appointment_Injection, Appointment_Oil, Appointment_Exploration
Плотность воды Water density	ТР Плотность воды [г/см³] TR Water density [g/cm³]
Плотность нефти Oil density	ТР Плотность нефти [г/см³] TR Oil density [g/cm³]
Коэффициент продуктивности Productivity factor	ТР К прод./TR Kprod
Пласт/Reservoir	Пласт_AC12, Пласт_AC9 Reservoir_AC12, Reservoir_AC9
Расстояние между скважинами Distance between wells	r_k_ryad
Плотность добываемой смеси Extracted mixture density	Плотность смеси расч [г/см³] Mixture density settlement [g/cm³]

Для обучения использовались следующие библиотеки:

- Модель леса деревьев. Этот метод относится к ансамблевым. Цель ансамблевых методов – объединить прогнозы нескольких базовых оценок, построенных с заданным алгоритмом обучения, чтобы улучшить надежность по сравнению с одной оценкой [17]. Суть данного метода заключается в том, что деревья обучаются не на всем наборе признаков, а на ограниченном. Да-

лее, исходя из всех полученных оценок по разным деревьям, оценка усредняется и выдается итоговый ответ. Благодаря этому данная модель выигрывает у модели обучающего дерева, так как отсутствует переобучение.

- Модель обучающего дерева. Суть данного метода заключается в том, что каждая скважина проходит определенную цепочку условий, которые основаны на признаках, на которых обучается модель. В итоге, исходя из уникального для каждой скважины набора параметров, по ней выдается ответ: является она кандидатом или нет [18].
- Модель линейной регрессии. Суть данной модели состоит в том, что модель линеаризует набор признаков [19]. В итоге работы модели получается вероятность, с которой скважина будет являться кандидатом для проведения ОПЗ. Так, если эта вероятность составляет больше 0,5 (значение по умолчанию), скважина будет являться кандидатом для проведения ОПЗ. При обучении модель может давать четыре типа ответов:

1. True Positive (TP). Это те ответы, на которые модель ответила положительно, и эти ответы действительно являются положительными.
2. True Negative (TN). Это те ответы, на которые модель ответила отрицательно, и эти ответы действительно являются отрицательными.
3. False Negative (FN). Это те ответы, на которые модель ответила отрицательно, но они на самом деле были положительными.
4. False Positive (FP). Это те ответы, на которые модель ответила положительно, но они на самом деле были отрицательными.

Исходя из этого для оценки схожимости результатов были разработаны две метрики. В соответствии с работой [16] первая из них, «precision», рассчитывалась по формуле (1):

$$precision = \frac{TP}{TP+FP}. \quad (1)$$

Данная метрика показывает долю объектов, названных алгоритмом положительными, и при этом действительно являющихся положительными.

В соответствии с работой [20] вторая метрика, «recall», рассчитывалась по формуле (2):

$$recall = \frac{TP}{TP+FN}. \quad (2)$$

Эта метрика показывает, какую долю объектов положительного класса из всех объектов положительного класса нашел алгоритм.

Однако по отдельности данные метрики неэффективны, поэтому чаще всего в машинном обучении при задаче классификации используется метрика F1-score. В соответствии с работой [21] она рассчитывается по формуле (3):

$$f1 - score = \frac{2 * precision * recall}{precision + recall}. \quad (3)$$

Чем ближе данная метрика к единице, тем точнее модель предсказывает ответ.

Также итоговая модель оценивалась при помощи метрики AUC-ROC. В соответствии с работой [21] площадь под ROC-кривой (обозначена синей заливкой) – это метрика оценки для задач бинарной классификации (рис. 1).

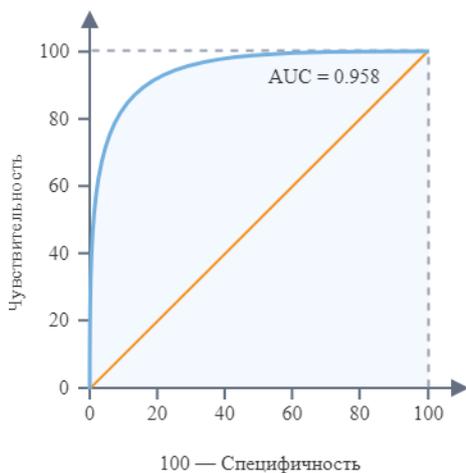


Рис. 1. Метрика AUC-ROC

Fig. 1. AUC-ROC Metric

На рис. 1 площадь под кривой (синяя линия) является мерой способности классификатора различать классы. Чем ближе значение площади к единице, тем лучше модель.

Для борьбы с дисбалансом использовались методы в соответствии с работой [17]:

1. *Threshold change*. Данный метод применялся для линейной регрессии. Модель линейной регрессии в итоге своей работы определяет вероятность, с которой скважина будет принадлежать тому или иному классу. Так, например, если вероятность равна 0,87, то скважина будет являться правильным кандидатом, так как это значение вероятности выше порогового, которое составляет 0,5 по умолчанию, если значение вероятности составляет, например, 0,3, то скважина не будет являться правильным кандидатом. В основе метода изменения порога лежит изменение значения по умолчанию.
2. *Upsampling*. Данный метод применялся для всех моделей. Его суть заключается в копировании строк того класса, который находится в меньшинстве. Данный метод не является предпочтительным, так как по своей сути он создает дубликаты, которые, как правило, мешают обучению модели.

3. *Downsampling*. Данный метод применялся для всех моделей. Его суть заключается в удалении строк того класса, который находится в большинстве. Данный метод является более предпочтительным, так как дубликаты не создаются. Однако могут быть упущены некоторые важные для обучения строки, поэтому применение данного метода также нежелательно.
4. *Balanced*. Данный метод применялся для всех моделей. Это встроенный в модель машинного обучения метод, который уменьшает влияние дисбаланса. Суть данного метода заключается в том, что смещаются веса классов данных в пропорции дисбаланса, за счет чего уменьшается важность превосходящего класса. Данный метод борьбы с дисбалансом классов совмещает в себе upsampling и downsampling. Он популярен в силу того, что нет необходимости вручную подбирать эти веса, в отличие от методов upsampling и downsampling.

Результаты

Осредненное значение метрики F1-score по кросс-валидации без использования методов борьбы с дисбалансом классов приведено в табл. 2.

Таблица 2. Значение метрики F1_score без борьбы с дисбалансом

Table 2. Value of the F1_score metric without combating imbalance

Модель Model	Значения метрики F1-score Value of the F1_score metric, %
Модель линейной регрессии LinearRegression	9,0
Модель леса деревьев RandomForestClassifier	96,5
Модель обучающего дерева RandomTreeClassifier	92,3

Из табл. 2 очевидно, что модель линейной регрессии не является корректной. При этом другие две модели показывают хорошую сходимость, несмотря на сильный дисбаланс классов.

Для лучшей сходимости и более корректной оценки работы моделей были применены следующие методы борьбы с дисбалансом классов: изменение порога значения определения скважин-кандидатов и скважин-некандидатов, метод upsampling, метод downsampling и метод balanced.

Результаты оценки сходимости моделей машинного обучения с реальными данными после применения различных способов борьбы с дисбалансом представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что лучше всего показала себя модель обучающего леса деревьев.

Таблица 3. Значение метрики $F1_score$

Table 3. $F1_score$ metric value

Модель Model	Метод борьбы с дисбалансом Method of dealing with imbalance			
	Popor Threshold	Upsampling	Downsampling	Balanced
Модель линейной регрессии LinearRegression	11,5	9,1	10,9	5,3
Модель обучающего дерева RandomTreeClassifier	-	97,4	67,5	53,2
Модель леса деревьев RandomForestClassifier	-	99,0	94,7	99,1

Также необходимо отметить, что качество предсказания некоторых моделей упало при борьбе с дисбалансом классов.

1. При использовании методов `upsampling` и `downsampling` качество упало, так как над данными были проведены различные операции, которые ухудшают данные (создаются дубликаты, или, наоборот, удаляются нужные данные).
2. При использовании метода `balanced` качество для моделей линейной регрессии и обучающего дерева также упало в силу того, что дисбаланс оказывает слабое влияние на эти модели машинного обучения [22]. Поэтому борьба с дисбалансом может только ухудшить качество этих моделей.

Значение метрики $F1_score$ является очень высоким, что говорит о корректности применения моделей машинного обучения для определения скважин-кандидатов для ОПЗ.

Далее для модели обучающего леса деревьев были подобраны наилучшие гиперпараметры методом `GridSearchCV` библиотеки `sklearn` в соответствии с работой [23].

На этих подобранных параметрах была обучена вся тренировочная выборка, и далее данная модель была проверена на тестовой выборке. Итоговая сходимость по метрике $F1_score$ оказалась равна 99,5 %. При кросс-валидации тренировочная выборка делилась на четыре части, и одна часть использовалась для оценки сходимости. Для оценки сходимости на тестовой выборке вся тренировочная выборка использовалась для обучения. Поэтому возросла сходимость результатов при оценке модели на тестовой выборке.

Также помимо высокой точности следует отметить и скорость работы программы, которая содержит в себе модели машинного обучения. В целом программа обрабатывает 199 скважин анализируемого месторождения в течение 15 минут.

Также была оценена метрика AUC-ROC для наилучшей модели. Ее значение составило 99,9 %. Высокое значение этой метрики подтверждает, что модель обучающего леса способна на высоком уровне различать скважины-кандидаты и скважины-некандидаты. Это значит, что модель не «наугад» определяет скважины-кандидаты, соответственно, она намного лучше константной модели или модели, которая «наугад» отвечает, является ли скважина кандидатом.

Также дополнительно была построена константная модель для проверки модели леса деревьев на адекватность. Были созданы объекты с ответами, состоящие из одних нулей (все скважины являются некандидатами) и одних единиц (все скважины являются кандидатами). Были оценены сходимость данных константных моделей по метрике $F1_score$. Они составили 0,1 и 1 % соответственно. Это подтверждает адекватность построенной модели.

Исходя из табл. 3 можно сделать вывод о том, что наилучшей моделью машинного обучения для решения задачи классификации скважин-кандидатов является модель леса деревьев.

Подобранные гиперпараметры модели составили следующие величины: `random_state=12345`, `n_estimators=30`, `max_depth=15`, метод борьбы с дисбалансом классов – `class_weight='balanced'`. Гиперпараметры подбирались при помощи метода `GridSearchCV`, который автоматически находит наилучшие гиперпараметры для исследуемой метрики из указанного автором диапазона.

Также дополнительно было проведено исследование на важность признаков после обучения моделей (SHAP-анализ). Данное исследование проводилось при помощи функции `feature_importances_` библиотеки `sklearn` в соответствии с работой [20, 24]. Гистограмма данного исследования представлена на рис. 2.

Анализируя рис. 2, можно сделать вывод о том, что наиболее важными признаками для обучения являются текущее забойное давление, текущее пластовое давление, дебит по жидкости, а также вязкость жидкости, остальные признаки имеют менее важную роль. Менее важными признаками являются: вязкость воды в пластовых условиях, расстояние между скважинами, а также внутренний диаметр эксплуатационной колонны. В будущем данные признаки будут удалены из модели машинного обучения для увеличения производительности модели.

Также следует отметить, что дебит газа был исключен из признаков для обучения, так как его значение сильно коррелирует со значением дебита жидкости, что может отрицательно повлиять на качество обучения модели.

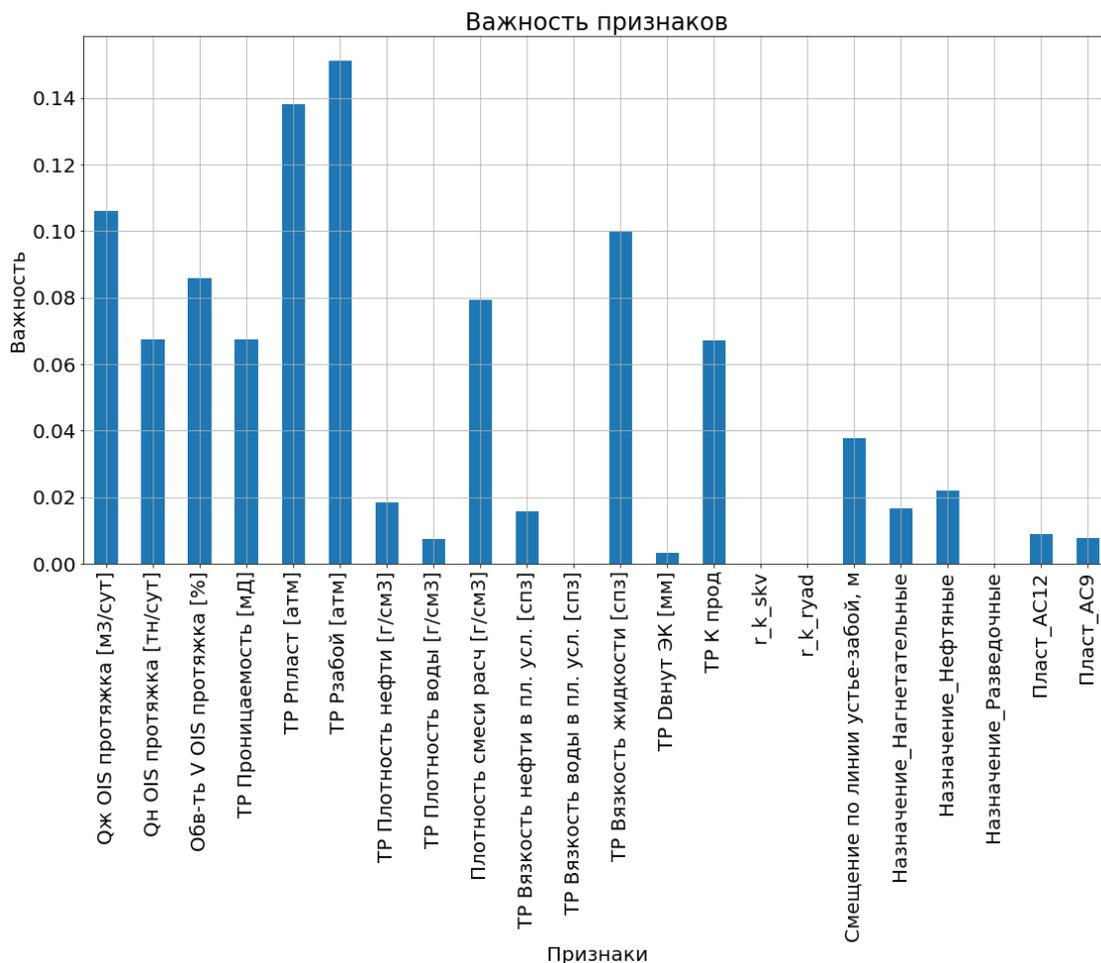


Рис. 2. Исследование важности признаков
Fig. 2. Research of the importance of features

Обсуждение

При исследовательском анализе данных, как было отмечено выше, было сделано допущение о том, что, если скважина объявляется кандидатом для проведения ОПЗ, она является кандидатом в течение всего месяца. Данное допущение было сделано в связи с дефицитом данных по скважинам-кандидатам из-за того, что месторождение было открыто недавно и находится только на второй стадии разработки. Также следует остановиться на допущении, связанном с тем, что ряд параметров, которые были перечислены выше, были заменены на один категориальный параметр: пласт. В связи с этим для применения этой модели на другом месторождении необходимо использовать другой набор признаков.

Также следует остановиться на основной выделенной в наборе данных проблеме: дисбаланс классов. Данная проблема была в итоге решена при помощи метода `class_weight='balanced'`. Следует отметить, что, в соответствии с работой [7], данный способ применяется довольно часто.

Проведенная работа показала, что использование моделей машинного обучения для предсказания ответа, будет ли скважина являться правильным кандидатом для проведения ОПЗ, является корректным, так как предсказания модели обладают высокой точностью. Модели также позволяют при помощи SHAP-анализа делать заключение о том, какие признаки были важны для обучения, а какие нет. Это позволяет впоследствии использовать лишь те признаки, которые улучшают качество модели для более корректной оценки.

Необходимо отметить, что данные, которые передаются модели для обучения, не всегда являются точными. Это происходит из-за того, что они получаются путем различных исследований, которые не всегда точны в силу различных технических причин. Поэтому точность предсказания модели и высокая сходимость все же не обеспечивает правильность выбора скважин-кандидатов. По этой причине необходимо повышать точность работы моделей. Для этого, а также для увеличения производительности модели планируется использование дру-

гих моделей машинного обучения, в том числе моделей градиентного бустинга и нейронных сетей. Также для повышения ценности моделей машинного обучения в производстве необходимо в том числе повышать точность и достоверность исходных измерений, которые подаются на вход алгоритму машинного обучения.

В ходе дальнейших исследований планируется улучшение качества и пользовательских характеристик программы путем создания удобного интерфейса и исключения из программы вышеперечисленных допущений.

Заключение

Проведенное исследование показало, что такая модель машинного обучения, как модель леса деревьев, позволяет предсказывать с точностью до 99,5 %, будет ли скважина являться правильным кандидатом для проведения ОПЗ. При этом указанная модель позволяет существенно сократить время обработки данных. Это говорит о перспективности применения указанной модели машинного обучения на реальных месторождениях для точного отбора скважин-кандидатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеинов С.Н., Кочнев А.А., Равелев К.А. Разработка алгоритма определения технологических параметров нагнетания кислотного состава при обработке призабойной зоны пласта с учетом экономической эффективности // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 587–595.
2. Особенности формирования призабойных зон продуктивных пластов на месторождениях с высокой газонасыщенностью пластовой нефти / В.И. Галкин, Д.А. Мартюшев, И.Н. Пономарева, И.А. Черных // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 386–392.
3. Хасанов М.М., Мальцев А.А. Моделирование кислотной обработки полимиктового коллектора // Записки Горного института. – 2021. – Т. 251. – С. 678–687.
4. Рогачев М.К., Мухаметшин В.В. Контроль и регулирование процесса солянокислотного воздействия на призабойную зону скважин по геолого-промысловым данным // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 274–278.
5. Интенсификация притока нефти из карбонатных коллекторов для условий месторождений Западной Сибири / А.Д. Румянцев, А.М. Машкова, Н.В. Соловьев, К.О. Щербакова, Б.А. Овезов // Молодые – наукам о земле: Материалы X Международной научной конференции молодых ученых. – М.: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2022. – Т. 4. – С. 279–282.
6. Pessach D., Shmueli E. A review on fairness in machine learning // ACM Computing Surveys. – 2022. – Vol. 22. – № 3. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3494672> (дата обращения 19.09.2023).
7. Звездов А.В., Ерофеев В.А., Шираков В.Ю. Совершенствование технологии обработки призабойной зоны пласта заглинизированного терригенного коллектора // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития территорий: Сборник трудов III Международной научно-практической конференции. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2022. – С. 251–258.
8. Гунькина Т.А. Методы повышения продуктивности нефтяных скважин. – Ставрополь: Северо-Кавказский Федеральный университет, 2017. – 57 с.
9. Применение машинного обучения для прогнозирования пластового давления при разработке нефтяных месторождений / Д.А. Мартюшев, И.Н. Пономарева, Л.А. Захаров, Т.А. Шадров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 140–149.
10. Разработка комплексной методики прогноза эффективности геолого-технических мероприятий на основе алгоритмов машинного обучения / А.А. Кочнев, Н.Д. Козырев, О.Е. Кочнева, С.В. Галкин // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 79–86.
11. Подбор скважин-кандидатов для гидравлического разрыва пласта на основе математического моделирования с использованием методов машинного обучения / А.Ф. Азбуханов, И.В. Костригин, К.А. Бондаренко, М.Н. Семенова, И.А. Середа, Д.Р. Юлмухаметов // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 11. – С. 38–42.
12. Курганов Д.В. Оценка эффективности обработок призабойных зон нефтяных скважин с применением методов машинного обучения // Автоматизация процессов управления. – 2020. – № 1 (59). – С. 47–54.
13. Федотова Л.Е. Предикативная аналитика результатов обработки призабойных зон пласта // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Томск: ТПУ, 2020. – Т. 2. – С. 155–156.
14. Machine learning with PyTorch and Scikit-learn: develop machine learning and deep learning models with Python / S. Raschka, Y. Liu, V. Mirjalili, D. Dhulgakov. – Birmingham: Kindle Edition Publ., 2022. – 770 p.
15. Miranda F.M., Kohnecke N., Renard B.Y. Hiclass: a python library for local hierarchical classification compatible with scikit-learn // Journal of Machine Learning Research. – 2023. – № 24 (29). URL: <https://www.jmlr.org/> (дата обращения 19.09.2023).
16. Yanli Liu, Yourong Wang, Jian Zhang. New Machine Learning Algorithm: Random Forest // Information Computing and Applications: Materials International Conference on Information Computing and Applications. – China: Springer Publ., 2012. – Vol. 7473. – P. 246–252.
17. An introduction to decision tree modeling / A.J. Myles, R.N. Feudale, Y. Liu, N.A. Woody, S.D. Brown // Journal of Chemometrics. – 2004. – Vol. 18. – P. 275–285. URL: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cem.873> (дата обращения 19.09.2023).
18. Hartmann F.G., Kopp J., Lois D. Social science data analysis. – Wiesbaden: Springer Publ., 2023. – 191 p.
19. Machine-learning classification of astronomical data sources: estimating F1-score in the absence of ground truth / A. Humphrey, W. Kuberski, J. Bialek, N. Perrakis, W. Cools, N. Nuyttens, H. Elakhrass, P.A.C. Cunha // Monthly Notes. – 2022. – Vol. 517. – P. 116–120. URL: <https://academic.oup.com/mnrasl/article-abstract/517/1/L116/6761704> (дата обращения 19.09.2023).

20. Deep ROC analysis and AUC as balanced average accuracy, for improved classifier selection, audit and explanation / A.M. Carrington, D.G. Manuel, P.W. Fieguth, T. Ramsay, V. Osmani, B. Wernly, C. Bennett, S. Hawken, O. Magwood, Y. Sheikh, M. McInnes, A. Holzinger // National Library of Medicine. – 2023. – № 45 (1). – P. 329–341. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35077357/> (дата обращения 19.09.2023).
21. Stop oversampling for class imbalance learning: a review / A.S. Tarawneh, A.B. Hassanat, G.A. Altarawhen, A. Almuhaimeed // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 47643–47659.
22. Дале Д. Нужно ли бояться несбалансированности классов // Хабр. – 2018. URL: <https://habr.com/ru/articles/349078/> (дата обращения 01.10.2023).
23. Prediction of ecofriendly concrete compressive strength using gradient boosting regression tree combined with GridSearchCV hyperparameter-optimization techniques / Z.M. Alhakeem, Y.M. Jebur, S.N. Henedy, H. Imran, L.F.A. Bernardo, H.M. Hussein // Materials. – 2022. – Vol. 2. – № 15 (21). URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/21/7432> (дата обращения 19.09.2023).
24. On the role and the importance of features for background modeling and foreground detection / Th. Bouwmans, C. Silva, C. Marghes, M.S. Zitouni, H. Bhaskar, C. Frelicot // Computer Science Review. – 2018. – Vol. 28. – P. 26–91.

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 Улубеквна 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 трансгаз Томск», Россия, 634029, г. Томск, пр. Фрунзе, 9. A.Yamkin@gtt.gazprom.ru

Поступила в редакцию: 11.10.2023

Поступила после рецензирования: 01.11.2023

Принята к публикации: 14.02.2024

REFERENCES

1. Krivoschenkov S.N., Kochnev A.A., Ravelev K.A. Development of an algorithm for determining the technological parameters of injection of an acid composition when treating the bottomhole formation zone, taking into account economic efficiency. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 587–595. (In Russ.)
2. Galkin V.I., Martyshev D.A., Ponomareva I.N., Chernykh I.A. Features of the formation of bottomhole zones of productive formations in fields with high gas saturation of reservoir oil. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 249, pp. 386–392. (In Russ.)
3. Khasanov M.M., Maltsev A.A. Simulation of acid treatment of a polymict reservoir. *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 251, pp. 678–687. (In Russ.)
4. Rogachev M.K., Mukhametshin V.V. Control and regulation of the process of hydrochloric acid impact on the bottomhole zone of wells according to geological and field data *Notes of the Mining Institute*, 2021, vol. 231, pp. 274–278. (In Russ.)
5. Rumyantsev A.D., Mashkova A.M., Solovyev N.V., Shcherbakova K.O., Ovezov B.A. Intensification of oil inflow from carbonate reservoirs for the conditions of fields in Western Siberia. *Young people – to geosciences. Proc. of the X International Scientific Conference of Young Scientists*. Moscow, Russian State Geological Prospecting University named after S. Ordzhonikidze Publ., 2022. Vol. 4, pp. 279–282. (In Russ.)
6. Pessach D., Shmueli E. A review on fairness in machine learning. *ACM Computing Surveys*, 2022, vol. 22, no. 3. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3494672> (accessed 19 September 2023).
7. Zvezdov A.V., Erofeev V.A., Shirakov V.Yu. Improving the technology for processing the bottomhole zone of a clayey terrigenous reservoir. *Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of sustainable development of territories. Proc. of the III International Scientific and Practical Conference*. Stavropol, North Caucasus Federal University Publ., 2022. pp. 251–258. (In Russ.)
8. Gunkina T.A. *Methods for increasing oil well productivity*. Stavropol, North Caucasus Federal University Publ., 2017. 57 p. (In Russ.)
9. Martyshev D.A., Ponomareva I.N., Zakharov L.A., Shadrov T.A. Application of machine learning to predict reservoir pressure in oil field development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 140–149. (In Russ.)
10. Kochnev A.A., Kozyrev N.D., Kochneva O.E., Galkin S.V. Development of a comprehensive methodology for predicting the effectiveness of geological and technical activities based on machine learning algorithms. *Georesources*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 79–86. (In Russ.)
11. Azbukhanov A.F., Kostrigin I.V., Bondarenko K.A., Semenova M.N., Sereda I.A., Yulmukhametov D.R. Selection of candidate wells for hydraulic fracturing based on mathematical modeling using machine learning methods. *Oil industry*, 2020, no. 11, pp. 38–42. (In Russ.)
12. Kurganov D.V. Assessing the effectiveness of treatments for bottom-hole zones of oil wells using machine learning methods. *Automation of management processes*, 2020, no. 1 (59), pp. 47–54. (In Russ.)
13. Fedotova L.E. Predictive analytics of the results of processing near-wellbore formation zones. *Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXIV International Symposium named after Academician M.A. Usov of students and young scientists*,

dedicated to the 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War. Tomsk, TPU Publ., 2020. Vol. 2, pp. 155–156. (In Russ.)

14. Raschka S., Liu Y., Mirjalili V., Dzhulgakov D. *Machine Learning with PyTorch and Scikit-learn: develop machine learning and deep learning models with Python.* Birmingham, Kindle Edition Publ., 2022. 770 p.
15. Miranda F.M., Kohnecke N., Renard B.Y. Hiclass: a python library for local hierarchical classification compatible with scikit-learn. *Journal of Machine Learning Research*, 2023, no. 24 (29). Available at: <https://www.jmlr.org/> (accessed 19 September 2023).
16. Yanli Liu, Yourong Wang, Jian Zhang. New Machine Learning Algorithm: Random Forest. *Information Computing and Applications. Materials International Conference on Information Computing and Applications.* China, Springer Publ., 2012. Vol. 7473, pp. 246–252.
17. Myles A.J., Feudale R.N., Liu Y., Woody N.A., Brown S.D. An introduction to decision tree modeling. *Journal of Chemometrics*, 2004, vol. 18, pp. 275–285. Available at: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cem.873> (accessed 19 September 2023).
18. Hartmann F.G., Kopp J., Lois D. *Social Science Data Analysis.* Wiesbaden, Springer Publ., 2023. 191 p.
19. Humphrey A., Kuberski W., Bialek J., Perrakis N., Cools W., Nuytens N., Elakhrass H., Cunha P.A.C. Machine-learning classification of astronomical sources: estimating F1-score in the absence of ground truth. *Monthly Notes*, 2022, vol. 517, pp. 116–120. Available at: <https://academic.oup.com/mnrasl/article-abstract/517/1/L116/6761704> (accessed 19 September 2023).
20. Carrington A.M., Manuel D.G., Fieguth P.W., Ramsay T., Osmani V., Wernly B., Bennett C., Hawken S., Magwood O., Sheikh Y., McInnes M., Holzinger A. Deep ROC analysis and AUC as balanced average accuracy, for improved classifier selection, audit and explanation. *National Library of Medicine*, 2023, no. 45 (1), pp. 329–341. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35077357/> (accessed 19 September 2023).
21. Tarawneh A.S., Hassanat A.B., Altarawhen G.A. Stop oversampling for class imbalance learning: a review. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 47643–47659.
22. Dale D. Should we be afraid of class imbalance. *Habr*, 2018. Available at: <https://habr.com/ru/articles/349078/> (accessed 1 October 2023).
23. Alhakeem Z.M., Jebur Y.M., Henedy S.N., Imran H., Bernardo L.F.A., Hussein H.M. Prediction of ecofriendly concrete compressive strength using gradient boosting regression tree combined with GridSearchCV hyperparameter-optimization techniques. *Materials*, 2022, vol. 2, no. 15 (21). Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/21/7432> (accessed 19 September 2023).
24. Bouwmans Th., Silva C., Marghes C., Zitouni M.S., Bhaskar H., Frelicot C. On the role and the importance of features for background modeling and foreground detection. *Computer Science Review*, 2018, vol. 28, pp. 26–91.

Information about the authors

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

Elena U. Safiullina, Cand. Sc., Associate Professor, St. Petersburg Mining University, 2, 21st line V.O., 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: 11.10.2023

Revised: 01.11.2023

Accepted: 14.02.2024

УДК 621.311.016:004.896.013.43
DOI: DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4595
Шифр специальности ВАК: 2.4.3.; 2.4.5

Синтезированный метод оценивания состояния режимных параметров энергосистем для программных комплексов реального времени

Н.Л. Бацева^{1✉}, Ю.А. Фоос¹, В.И. Сеницын², В.В. Белоусов²

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

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» Российской Академии Наук, Россия, г. Москва

✉ batsevan@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В диспетчерских управлениях энергосистемами используются программные комплексы реального времени, где модуль оценивания состояния является ключевым, так как на основании результатов оценённых режимных параметров, полученных из этого модуля, определяются более ёмкие режимные параметры, отвечающие за устойчивость и надёжность работы энергосистем. В настоящее время для оценивания параметров применяются телеизмерения и синхронизированные векторные измерения, поэтому развитие методов оценивания состояния является актуальной задачей. **Цель.** Разработка и апробация синтезированного метода оценивания режимных параметров, позволяющего повысить точность оценивания параметров и качество решения задач, связанных с повышением устойчивости и надёжности работы энергорайонов энергосистем, для использования в программных комплексах реального времени. **Методы.** Предлагаемый метод базируется на математическом аппарате метода Гаусса–Ньютона и расширенном фильтре Калмана при совместном использовании массивов телеизмерений оперативно-информационного комплекса и синхронизированных векторных измерений системы мониторинга переходных режимов. **Результаты.** Разработан и апробирован синтезированный метод оценивания режимных параметров энергосистем в нормальном и послеаварийном режимах. **Выводы.** На основании анализа результатов экспериментов подтверждено, что по сравнению со стандартным методом оценивания состояния, предложенный синтезированный метод повышает точность оценивания таких режимных параметров, как напряжение и переток активной мощности в нормальном и послеаварийном режимах, обеспечивая повышенную точность при определении максимально-допустимого перетока активной мощности и объёмов управляющих воздействий. Разработанное программное обеспечение позволяет внедрить метод в модуль оценивания состояния программных комплексов реального времени. Определены перспективные направления развития методов оценивания состояния при возникновении динамических процессов в энергорайонах энергосистем.

Ключевые слова: синтезированный метод оценивания состояния, метод Гаусса–Ньютона, расширенный фильтр Калмана, массивы телеизмерений, синхронизированные векторные измерения

Для цитирования: Синтезированный метод оценивания состояния режимных параметров энергосистем для программных комплексов реального времени / Н.Л. Бацева, Ю.А. Фоос, В.И. Сеницын, В.В. Белоусов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 17–29. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4595

UDC 621.311.016:004.896.013.43
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4595

Synthesized method for estimating a power system regime parameters state for real time hardware and software packages

N.L. Batseva^{1✉}, Yu.A. Foos¹, V.I. Sinitsin², V.V. Belousov²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ batsevan@tpu.ru

Abstract: Relevance. Real time hardware and software systems are operated in power system operation centers. In these systems the state estimation block is one of the key one, since in accordance with the regime parameters results, derived from this block, the more comprehensive parameters can be calculated. These parameters are reckoned for system stability and reliability. Today telemetry and synchronized phasor measurements are used for parameters estimation. Therefore, the state estimation methods development is a relevant task. **Aim.** Development and practical evaluation of the regime parameters estimation synthesized method for using in real time hardware and software systems. The synthesized method permits to improve estimation accuracy and decision quality of focal points coming from system stability and reliability stabilization. **Methods.** Proposed method is based on mathematical frameworks of Gauss–Newton method and extended Kalman filter when telemetry and synchronized phasor measurements arrays are simultaneously utilized. **Results.** The synthesized method of power systems regime parameters estimation at steady-state and post accident conditions is developed and evaluated. **Conclusions.** It is confirmed, that presented synthesized method increases accuracy of the voltage and active power flow estimation at steady-state and post accident regimes, thereby enabling the improved accuracy of maximum allowed active power flows and control action volumes in contrast to the standard state estimation method. Developed software provides an opportunity to implement this method into the state estimation block of real time hardware and software systems. The upcoming trends for state estimation methods development in the event of dynamic processes in power system areas are also formed.

Keywords: state estimation synthesized method, Gauss–Newton method, extended Kalman filter, telemetry arrays, synchronized phasor measurements

For citation: Batseva N.L., Foos J.A., Sinitsin V.I., Belousov V.V. Synthesized method for estimating a power system regime parameters state for real time hardware and software packages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 17–29. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4595

Введение

Для управления режимом работы электроэнергетических систем (ЭЭС) в режиме реального времени используются специализированные комплексы реального времени: программно-аппаратный комплекс «Система мониторинга запасов устойчивости» (ПАК СМЗУ) и программно-технический комплекс «Централизованная система противоаварийной автоматики» (ПТК ЦСПА), в архитектуре которых модуль оценивания состояния (ОС) режимных параметров является ключевым [1–4]. По результатам работы модуля ОС с помощью ПАК СМЗУ решают задачу определения максимально-допустимых перетоков активной мощности (МДПАМ) в сечениях, а с помощью ПТК ЦСПА – задачу расчёта объёмов управляющих воздействий (УВ) для обеспечения устойчивости энергорайонов ЭЭС.

Исходными данными для работы модуля ОС являются массивы телеметрии (ТМ), поступающие из базы данных реального времени (БДРВ) оперативно-информационного комплекса (ОИК) [5–8].

В режиме реального времени ОС выполняется циклично на основе массивов ТМ, соответствующих последнему временному срезу. Такой метод ОС называют статическим, так как в нем не учитывается изменение параметров режима во времени [9–12]. Для применения статического метода существуют ограничения: в массивах ТМ должны отсутствовать грубые ошибки; значение параметров режима во времени должно быть неизменным. Нарушение ограничений приводит либо к некорректным результатам ОС, либо к расхождению итерационного процесса и, как следствие, к нарушению логики работы ПАК СМЗУ и ПТК ЦСПА.

Режимные параметры подвержены динамике, поскольку наряду со случайными и естественными колебаниями потребления и генерации мощности, внедрением возобновляемых источников энергии, распределенной генерации, накопителей энергии и чувствительных нагрузок, существуют переходные режимы с резким изменением схемы ЭЭС и параметров режима. Учет динамики системы может быть вы-

полнен с помощью динамического метода ОС, который базируется на уравнении динамики, связывающем режимные параметры, замеренные в разные моменты времени [9, 13–15]. Считается, что он, по сравнению со статическим методом, обладает большей устойчивостью к сбоям и помехам, надежностью работы в условиях недостаточности ТМ, облегчает поиск грубых ошибок в ТМ. Однако в [14–16] отмечено, что при возникновении внезапных изменений схемы и режима полученные результаты могут искажаться, так как для составления уравнения динамики требуется время, чтобы адаптироваться к новой схемно-режимной ситуации. Динамический метод не находил практического применения из-за низкой скорости обновления ТМ ОИК, что не позволяло составить корректные уравнения динамики.

С внедрением системы мониторинга переходных режимов (СМНР) стали доступны синхронизированные векторные измерения (СВИ), которые лишены недостатков, присущих ТМ ОИК, так как являются согласованными массивами параметров режима: в СВИ входят прямые измерения независимых переменных – модули и фазы напряжений и токов; высокая скорость их обновления обеспечивает мониторинг внезапных изменений схемы и режима; учет векторов напряжений и токов повышает устойчивость вычислительного процесса за счет улучшения обусловленности матрицы Якоби; высокая точность измерений способствует повышению точности ОС [6, 8, 12, 14, 17].

Стоит отметить, что количество комплексов СМНР в ЭЭС недостаточно для обеспечения наблюдаемости ЭЭС, поэтому для повышения точности ОС, ТМ и СВИ можно использовать совместно, учитывая разнородность измерений по частоте обновления и точности регистрации.

Таким образом, появилась возможность создания синтезированного метода ОС с усовершенствованным математическим аппаратом, который повысит точность ОС и качество решения задач по определению МДП АМ в сечениях ЭЭС и расчёта объёма УВ в программно-вычислительных комплексах (ПВК) реального времени.

Синтезированный метод ОС разработан на основе следующих позиций:

1. ОС выполняется в полярных координатах для возможности учёта углов при напряжениях и токах.
2. Для корректного учёта СВИ предлагается формула для определения весовых коэффициентов, которая даёт надёжную сходимость итерационного процесса.
3. Для внедрения в ПАК СМЗУ и ПТК ЦСПА разработано программное обеспечение (ПО), в котором предусмотрено подключение к БДРВ ОИК и автоматизированной системе сбора информации (АС СИ) СМНР, а также интеграция с комплексами реального времени.

Материалы и методы

Синтезированный метод ОС

На практике в ПАК СМЗУ и ПТК ЦСПА используются статические методы ОС, основанные на математических методах Ньютона и Гаусса–Ньютона [2, 18, 19]. Метод Гаусса–Ньютона используется для решения нелинейных систем уравнений и отличается от метода Ньютона тем, что для аппроксимации вместо матрицы Гессе используется матрица Якоби, что позволяет сократить время итерационного процесса, особенно при работе с большими системами уравнений, к которым относятся уравнения режима ЭЭС. Поэтому именно метод Гаусса–Ньютона является наиболее подходящим. Учёт уравнений динамики системы можно осуществить с помощью фильтров Калмана: расширенного (*Extended Kalman Filter – EKF*), сигматочечного (*Unscented Kalman Filter – UKF*) и других модификаций [20–22]. *UKF* по сравнению с *EKF* обладает большей точностью в случае нелинейности математической модели. Это связано с тем, что в *UKF* по сигма-точкам строятся нелинейные функции прогноза, а в *EKF* происходит линеаризация модели путем вычисления Якобиана на каждой итерации, но для реализации *UKF* требуется определение дополнительных параметров модели, выбор которых определяет конкурентную *UKF*-реализацию. Для ОС заранее предопределить дополнительные параметры для всех возможных схемно-режимных ситуаций невозможно. Поэтому предпочтительным является *EKF*, который не требует большого количества предопределённых настроечных параметров системы.

Предлагаемый метод ОС представляет собой синтез усовершенствованных статического и динамического методов на основе математического аппарата Гаусса–Ньютона и *EKF*. При резком изменении схемно-режимной ситуации ОС выполняется статическим методом на заданном интервале времени Δt для формирования матрицы перехода, которая далее используется в качестве исходных данных для выполнения ОС динамическим методом.

Переход к полярной системе координат и совершенствование математического аппарата для учёта СВИ

Математическая постановка задачи ОС сводится к определению вектора состояния u , размерностью $2N-1$, где N – количество узлов. В существующих реализациях модуля ОС элементы вектора состояния – это продольные и поперечные составляющие узловых напряжений: $E_1, V_1; E_2, V_2; \dots, E_{N-1}, V_{N-1}; E_N, V_N$.

Любой измеренный параметр режима $r_i=1..M$, где M – количество измерений, является явной функцией от напряжения $r_i(U)$, а аналитическое выражение этой функции отвечает законам Ома и Кирхгофа. Результаты расчета $r_i(U)$ и измерения r_i

параметров режима не совпадают, поскольку измерения имеют погрешность, обусловленную несовершенством измерительной аппаратуры и несинхронностью измерений параметров режима.

Меру близости рассчитанных и измеренных значений определяют по выражению (1):

$$r = r(U) \pm f(U), \quad (1)$$

где $r = \{U_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}\}$ – вектор измерений параметров режима; $r^T(U) = \{U_i, P_i(U), Q_i(U), P_{ij}(U), Q_{ij}(U)\}$ – вектор-функция, определяющая режимные параметры через узловые напряжения; $f^T(U) = \{r_1(U) - r_1; r_2(U) - r_2; \dots; r_m(U) - r_m\}$ – вектор погрешности измерений; P_{ij}, Q_{ij} – перетоки активной и реактивной мощности из узла i в узел j ; T – символ транспонирования.

Для учета СВИ в вектор состояния u вводят модули и фазы узловых напряжений $U_1, \delta_1; U_2, \delta_2; \dots, U_{N-1}, \delta_{N-1}; U_N, \delta_N$, что позволяет существенно улучшить обусловленность матрицы Якоби, ускорить сходимость вычислительного процесса и сократить время выполнения ОС [23]. В узлах, где установлены устройства СМПП, измерение напряжения и угла при напряжении: $U_i = U_i^{\text{СВИ}}$ и $\delta_i = \delta_i^{\text{СВИ}}$, а в узлах, где измеряется массив ТМ: $U_i = U_i^{\text{ТМ}}$ и $\delta_i = 0$. Если измерение напряжения в узле отсутствует, то принимают номинальное напряжение $U_i^k = U_i^{\text{ном}}$ и $\delta_i = 0$.

Для учёта СВИ напряжений и токов вектор измерений и вектор-функция (1) расширяются (2), (3):

$$r = \{U_i, \delta_i, P_i, Q_i, I_{ij}, \sigma_{ij}, P_{ij}, Q_{ij}\}, \quad (2)$$

$$r(U) = \{U_i, \delta_i, P_i(U), Q_i(U), P_{ij}(U), Q_{ij}(U), I_{ij}(U), \sigma_{ij}(U)\}, \quad (3)$$

где U_i, δ_i – модуль и угол напряжения в узле i ;

$I_{ij} = \sqrt{(C_{ij}^2 + D_{ij}^2)}$ и $\sigma_{ij} = \arctg(D_{ij} \div C_{ij})$ – модуль и

угол тока в связи ij ; $P_{ij} = C_{ij} \cdot \sqrt{3} \cdot U_i$ и

$Q_{ij} = D_{ij} \cdot \sqrt{3} \cdot U_i$ – перетоки активной и реактивной

мощностей в связи ij ; $P_i = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot \sum_{j \in N} C_{ij}$ и

$Q_i = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot \sum_{j \in N} D_{ij}$ – инъекции активной и реак-

тивной мощностей в узле i при

$$C_{ij} = U_i \cdot (g_{ii} + g_{ij}) - U_j (g_{ij} \cdot \cos \delta_{ij} - b_{ij} \cdot \sin \delta_{ij});$$

$$D_{ij} = U_i \cdot (b_{ii} + b_{ij}) - U_j (g_{ij} \cdot \sin \delta_{ij} + b_{ij} \cdot \cos \delta_{ij}),$$

где g_{ii}, b_{ii} – собственные активная и реактивная проводимости узла i ; g_{ij}, b_{ij} – активная и реактивная проводимости связи ij ; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ – взаимный угол напряжения между узлами i и j ; δ_i, δ_j – угол при напряжении в узлах i и j .

При расширении вектора измерений r матрица Якоби также расширяется:

- для измерения модуля и угла тока (4):

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial U_i}, \frac{\partial I_{ij}}{\partial U_j}, \frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i}, \frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_j}, \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial U_i}, \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial U_j}, \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \delta_i}, \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \delta_j}; \quad (4)$$

- для измерения перетоков активной и реактивной мощностей (5):

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial U_i}, \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_j}, \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i}, \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j}, \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_i}, \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_j}, \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i}, \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j}; \quad (5)$$

- для измерения инъекций активной и реактивной мощностей в узле (6):

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i}, \frac{\partial P_i}{\partial U_j}, \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}, \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}, \frac{\partial Q_i}{\partial U_i}, \frac{\partial Q_i}{\partial U_j}, \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i}, \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}. \quad (6)$$

Таким образом обеспечивается переход от прямоугольной системы координат к полярной системе вместе с учётом СВИ.

Расчет весовых коэффициентов

В модуле ОС ПТК ЦСПА и ПАК СМЗУ матрица весовых коэффициентов учитывает значимость и качество измеренного параметра относительно других параметров и составляется по настройкам пользователя. Использование весовых коэффициентов для СВИ по настройкам пользователя приводит к частому расхождению итерационного процесса, поэтому расчёт весовых коэффициентов следует осуществлять по формуле (7):

$$c_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^M J_{ij}^2}, \quad (7)$$

где J_{ij} – элемент матрицы Якоби.

Такой подход обеспечивает монотонное уменьшение взвешенной суммы квадратов небалансов напряжений.

Алгоритм работы синтезированного метода ОС

Блок-схема алгоритма ОС синтезированным методом приведена на рис. 1, где k_{max} – предельное число итераций; ε – допустимая погрешность оценки величин векторов напряжений, найденная как разность оцененных значений напряжений в узлах ЭЭС на итерациях k и $k+1$, характеризующая сходимость итерационного процесса; t – интервал времени, за которое формировался массив измерений; t_1 – текущее время расчета; t_0 – время фиксации последнего резкого изменения схемно-режимной ситуации, например, изменения топологии сети; диагональные элементы матрицы ковариации шума процесса Q равны дисперсии измерений σ^2 : для ТИ $\sigma = 0,02$, для СВИ – $\sigma = 0,005$ [15].

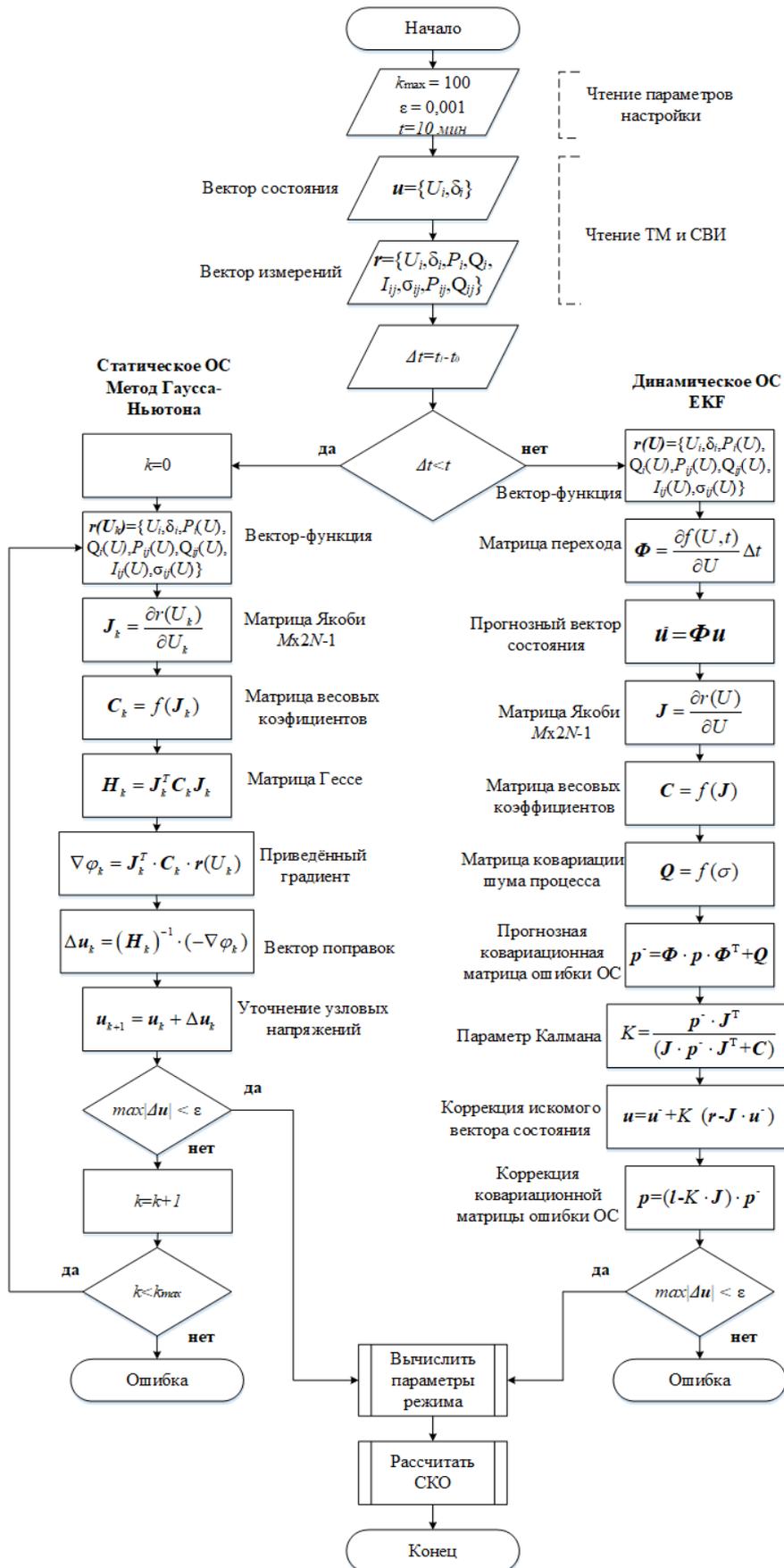


Рис. 1. Алгоритм работы синтезированного метода ОС
 Fig. 1. Algorithm of the state estimation synthesized method

Программное обеспечение

Программное обеспечение «Оценивание состояния энергорайонов ЭЭС в нормальном и послеаварийном режимах» выполнено на языке программирования C# с применением технологии *Windows Presentation Foundation (WPF)* и паттерна *Model-View-View Model (MVVM)* [24]. Для реализа-

ции математических методов используется библиотека стандартных операций с матрицами *Matrix.dll*, а для реализации математического аппарата разработана собственная библиотека *Estimation.dll*.

Загрузка ТМ осуществляется из БДРВ ОИК посредством *API*-запросов к серверу:

```
private static IEnumerable<MeasurementValueTableRow> GetValuesWithClientInterval (TokenResponse tokenResponse, Guid rqParam, DateTime dateFrom, DateTime dateTo, MeasurementValueTypeAPI type)
{
    var httpHandler = new HttpClientHandler()
    {
        UseDefaultCredentials = true,
    };
    var httpClient = new HttpClient(httpHandler);
    httpClient.DefaultRequestHeaders.Authorization = new AuthenticationHeaderValue ("bearer", tokenResponse.AccessToken);
    Client ck11Cli = new Client(httpClient) { ReadResponseAsString = true, BaseUrl = $"https://{ServerName}/api/public/" };
    var dtFromOff = new DateTimeOffset(dateFrom);
    var dtToOff = new DateTimeOffset(dateTo);
    var rgetResult = ck11Cli.IntervalAsync(type, rqParam, dtFromOff, dtToOff).Result;
    var result = rgetResult.ToMVMT();
    return result;
}
```

Сервер СМПП не предоставляет доступ по *API*, поэтому загрузка осуществляется напрямую из базы данных *SQL Server*:

```
public ObservableCollection<PMU> GetAll()
{
    var strBuilder = new SqlConnectionStringBuilder()
    {
        DataSource = serverName,
        IntegratedSecurity = true,
        InitialCatalog = dbName
    };
    var connString = strBuilder.ConnectionString;
    ObservableCollection<PMU> PMUList = new ObservableCollection<PMU>();
    using (var connection = new SqlConnection(connString))
    {
        connection.Open();
        using (SqlCommand com = new SqlCommand(query, connection))
        {
            var reader = com.ExecuteReader();
            while (reader.Read())
            {
                PMUList.Add(new PMU()
                {
                    Id = (int)reader[0],
                    Name = (string)reader[2],
                    Value = (decimal)reader[3],
                    Time = (DateTime)reader[4],
                    Flag = (bool)reader[5]
                });
            }
        }
    }
    return PMUList;
}
```

Цифровая модель ЭЭС состоит из узлов, связей и их параметров и создаётся в пользовательском интерфейсе или загружается из файла *.rg2, кото-

рый используется в ПВК для расчётов электрических режимов. Загрузка осуществляется с помощью специализированной библиотеки *ASTRALib*.

```
public static ObservableCollection<Node> ReadRastrWinNode(IRastr rastr)
{
    ObservableCollection<Node> nodeList = new ObservableCollection<Node>();
    ASTRALib.ITable NodeRastr = rastr.Tables.Item("node");
    ASTRALib.ICol staBus = NodeRastr.Cols.Item("sta");
    ASTRALib.ICol numberBus = NodeRastr.Cols.Item("ny");
    ASTRALib.ICol typeBus = NodeRastr.Cols.Item("tip");
    ASTRALib.ICol nameBus = NodeRastr.Cols.Item("name");
    ASTRALib.ICol Unom = NodeRastr.Cols.Item("uhom");
    ASTRALib.ICol Bsh = NodeRastr.Cols.Item("bsh");
    ASTRALib.ICol powerActiveLoad = NodeRastr.Cols.Item("pn");
    ASTRALib.ICol powerReactiveLoad = NodeRastr.Cols.Item("qn");
    ASTRALib.ICol powerActiveGen = NodeRastr.Cols.Item("pg");
    ASTRALib.ICol powerReactiveGen = NodeRastr.Cols.Item("qg");
    for (int NumbBus = 0; NumbBus < NodeRastr.Count; NumbBus++)
    {
        Node node = new Node
        {
            State = staBus.get_ZN(NumbBus),
            Numb = numberBus.get_ZN(NumbBus),
            Type = (TypeNode)typeBus.get_ZN(NumbBus),
            Name = nameBus.get_ZN(NumbBus),
            Unom = Unom.get_ZN(NumbBus),
            B = Bsh.get_ZN(NumbBus)
        };
        nodeList.Add(node);
    }
    return nodeList;
}
```

Практический пример и результаты исследования

Покажем пример работы метода на расчётной модели схемы электрической сети 500–220 кВ объединённой энергосистемы (ОЭС). Топологическая схема приведена на рис. 2.

Рассмотрены нормальный режим работы ЭЭС и послеаварийный режим – отключение ВЛ 500 кВ АЭС-2–ПС-19 действием релейной защиты. ОС выполнено методами стандартного статического ОС по ТМ и синтезированного ОС по ТМ и СВИ.

На рис. 3, 4 представлены результаты расчета СКО напряжения для граничных узлов сечения I в нормальном и послеаварийном режимах.

Среднее значение СКО напряжения в нормальном режиме при использовании статического метода ОС по ТМ составляет 1,29 кВ, а при применении синтезированного метода ОС по ТМ и СВИ – 0,84 кВ. В послеаварийном режиме среднее значение СКО для статического метода ОС по ТМ – 2,46 кВ, а для синтезированного метода по ТМ и СВИ – 0,68 кВ.

На рис. 5, 6 представлены результаты расчета СКО перетоков активной мощности по связям, входящим в состав сечения I.

При оценивании перетоков активной мощности среднее значение СКО в нормальном режиме при

использовании статического метода ОС по ТМ составляет 7,78 МВт, а при применении синтезированного метода ОС по ТМ и СВИ – 4,80 МВт. В послеаварийном режиме среднее значение СКО для статического метода ОС по ТМ – 7,25 МВт, для синтезированного метода по ТМ и СВИ – 4,87 МВт.

Результаты расчетов МДП АМ в сечении I в ПАК СМЗУ и требуемые объёмы УВ в ПТК ЦСПА представлены в таблице.

Стандартный статический метод показывает заниженное значение МДП АМ по сечению I относительно синтезированного метода: для нормального режима – на 12 МВт, для послеаварийного режима – на 40 МВт, поэтому его применение не позволит использовать всю пропускную способность связей сечения I.

Требуемый объём УВ был рассчитан для отключения связи ГЭС-4–ПС-20. Стандартный статический метод показывает заниженное значение требуемого объёма УВ на 2 МВт в нормальном режиме и на 13 МВт – в послеаварийном. Использование заниженных объёмов УВ может не обеспечить устойчивость и надёжность работы ЭЭС.

Таким образом, точность ОС, а также точность определения МДП АМ и объёмов УВ синтезированным методом выше как для нормальных, так и для послеаварийных режимов.

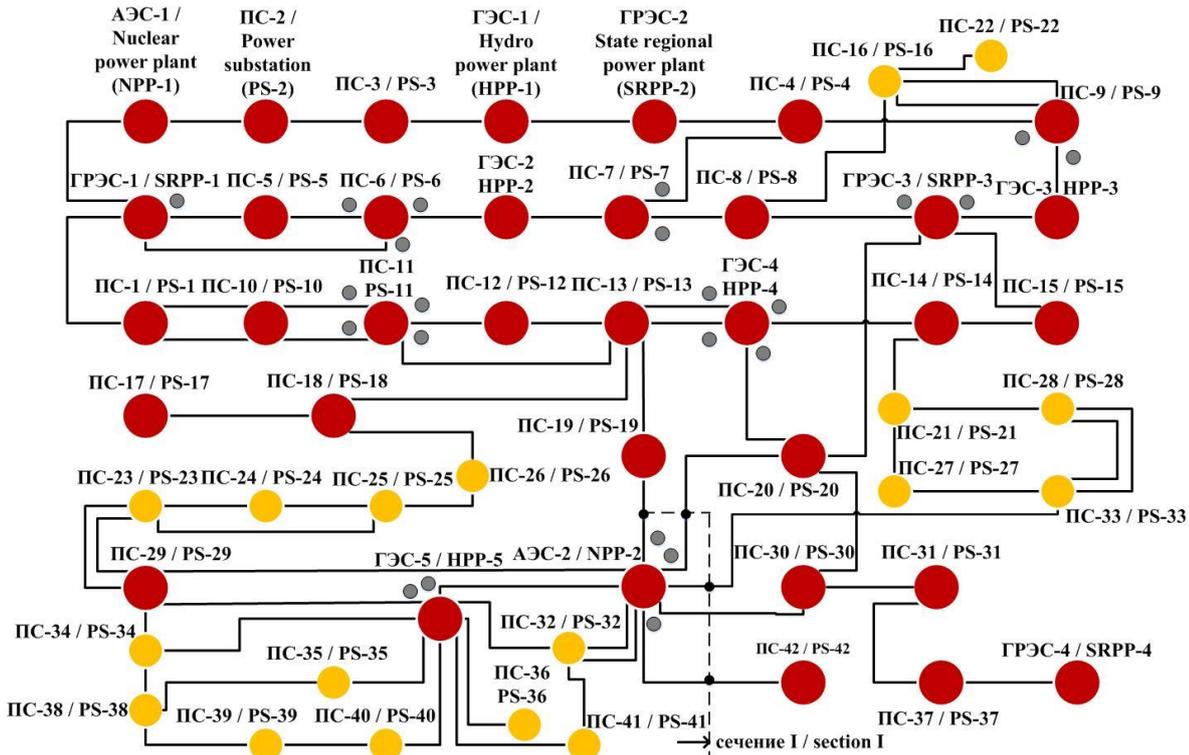


Рис. 2. Топологическая схема электрической сети 500–220 кВ ОЭС: схема содержит 55 узлов и 76 связей. Устройства СМПУ отмечены серым кругом. Красными кругами отмечены энергообъекты 500 кВ, желтыми – 220 кВ. В ПАК СМЗУ контролируется сечение I, в состав которого входят воздушные линии (ВЛ) 500 кВ: АЭС-2–ПС-42, АЭС-2–ПС-19, АЭС-2–ПС-20, АЭС-2–ПС-30; 220 кВ: АЭС-2–ПС-33, АЭС-2–ПС-36. Локальное устройство ПТК ЦСПА установлено на АЭС-2 и предназначено для предотвращения нарушения устойчивости энергоблоков АЭС.

Fig. 2. Topological scheme of 500–220 kV United Power System electrical grid: the scheme contains 55 nodes and 76 ties; wide-area measurements systems are marked with a grey circle; 500 kV power facilities are pointed by a red circle, and a yellow circle colors 220 kV power facilities. 500 kV overhead power lines NPP-2–PS-42, NPP-2–PS-19, NPP-2–PS-20, NPP-2–PS-30 and 220 kV overhead power lines NPP-2–PS-33, NPP-2–PS-36 forms the section I, controlled by the stability margin monitoring system hardware and software package. The local facility of the information and computation complex is installed on NPP-2. This local facility is aimed for preventing instability of NPP generating units

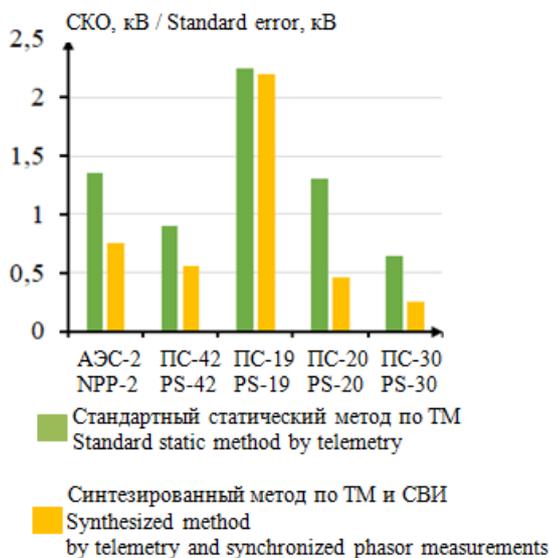


Рис. 3. Распределение среднеквадратичного отклонения напряжения в нормальном режиме
Fig. 3. Sharing standard voltage deviation in the steady state

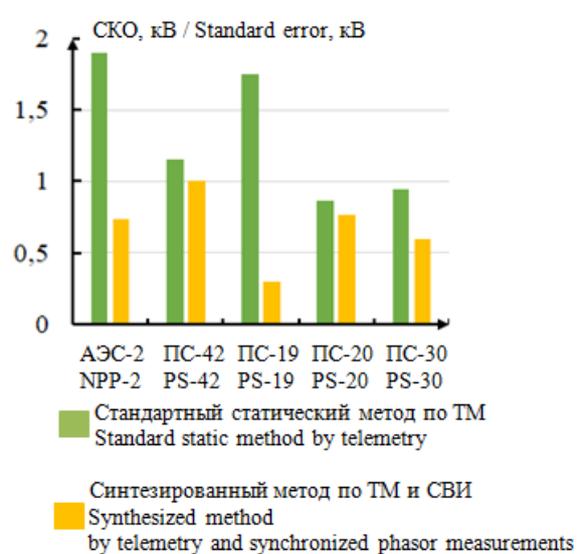


Рис. 4. Распределение среднеквадратичного отклонения напряжения в послеварийном режиме
Fig. 4. Sharing standard voltage deviation in the post emergency state

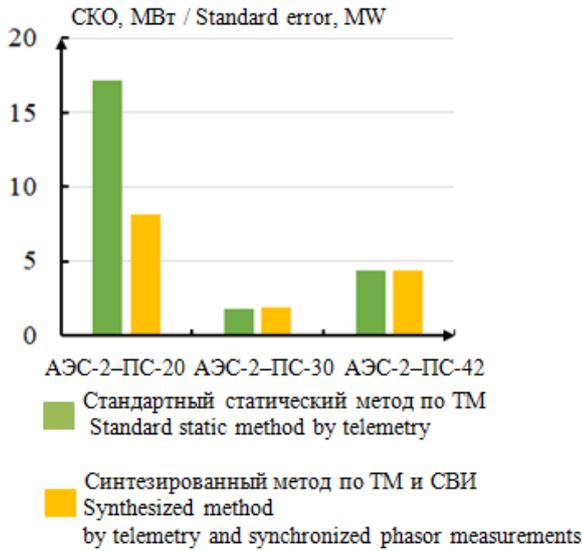


Рис. 5. Распределение среднеквадратичного отклонения перетоков активной мощности в нормальном режиме

Fig. 5. Sharing standard deviation of active power flows in the steady state

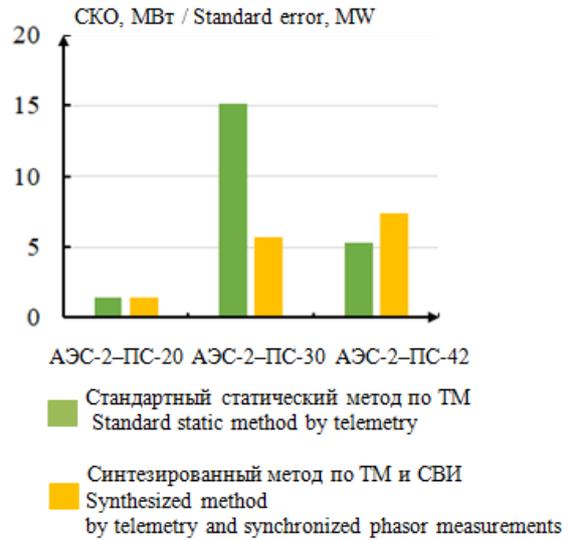


Рис. 6. Распределение среднеквадратичного отклонения перетоков активной мощности в послеаварийном режиме

Fig. 6. Sharing standard deviation of active power flows in the post emergency state

Таблица. Результаты расчёта МДП АМ и объёмов УВ в сечении I

Таблица. Results of calculating maximum allowed power flows and control action volumes for section I

Метод Method	Режим Regime	Максимально допустимый переток активной мощности, МВт Maximum allowed active power flow, MWt	Объём управляющих воздействий, МВт Control action volume, MWt
Стандартный статический метод по ТМ Standard static method by telemetry	Нормальный Steady state	3890	10
Синтезированный метод по ТМ и СВИ Synthesized method by telemetry and synchronized phasor measurements		3902	12
Стандартный статический метод по ТМ Standard static method by telemetry	Послеаварийный Post accident	3810	5
Синтезированный метод по ТМ и СВИ Synthesized method by telemetry and synchronized phasor measurements		3850	18

Обсуждение направлений дальнейших исследований

Имея определённый базис для создания методов и алгоритмов для исследования стохастических систем, авторы считают важным систематизацию теории непрерывных и дискретных линейных фильтров Калмана, квазилинейных фильтров, обобщенных нелинейных фильтров Калмана, а также непрерывных и дискретных условно оптимальных нелинейных фильтров Пугачева [25, 26].

На основе теории субоптимальных методов ОС и параметров в нелинейных стохастических системах, основанных на нормальной и эллипсоидальной аппроксимации, эквивалентной линеаризации, методах параметризации распределений, моментов и квазимоментов, семиинвариантов и ортогональных разложений были разработаны новые подходы

для класса сингулярных стохастических систем, содержащих малые параметры при производных, для анализа стохастических систем с помощью канонических разложений случайных функций, для моделей со сложными нелинейностями. Обобщён опыт развития условно оптимальных методов на базе эллипсоидальной аппроксимации процессов стохастических систем, позволяющих достигать высокие показатели точности аппроксимации.

Согласно этому, следует выделить четыре наиболее перспективных направления:

1. Создание условно-оптимальных методов на базе фильтров Пугачева для моделирования и исследования динамики процессов в ЭЭС в установившихся, аварийных и послеаварийных режимах, так как важным преимуществом фильтров Пугачева является способность эффективно ра-

ботать в режиме реального времени. При использовании условно-оптимальных методов могут быть разработаны алгоритмы фильтрации для слабо-нелинейных дискретных и непрерывно-дискретных моделей со сравнением результатов работы с алгоритмами, основанными на фильтрах Калмана, по уровням ошибок фильтрации и производительности.

2. Развитие методического и алгоритмического обеспечения для исследования переходных процессов в ЭЭС. Подобные процессы сильно влияют на работоспособность и живучесть ЭЭС, так как характеризуются значительными и быстротечными изменениями параметров режима. Таким образом, модель ЭЭС является многопараметрической, жесткой и динамической нелинейной системой. Функции соответствующих математических моделей являются разрывными, в том числе и по производным. Для исследования предполагается создание набора условно оптимальных стохастических моделей и фильтров на базе подходов электродинамики и электромеханики, например, уравнений Максвелла, Парка–Горева. Подобный набор моделей позволит учитывать разрывную природу процессов, эффекты насыщения в элементах ЭЭС, рассинхронизацию, нелинейную природу нагрузок. В этом случае использование фильтров Калмана ограничится нелинейностью разрывных процессов в ЭЭС.
3. Поиск решений для уравнений Риккати, коэффициенты которых являются зависящими от состояния моделируемой системы при наблюдении и фильтрации параметров ЭЭС в установившихся и переходных режимах. Эта операция является наиболее затратной. В случае многомерных систем это усложняет разработку алгоритмов, поэтому необходимо осуществить поиск соответствующих оптимальных решений для детерминированных и стохастических случаев на базе подходов *State-Dependent Riccati Equation*. Перспективным подходом является использование различных асимптотических методов для нелинейных систем с параметрами. Во многих случаях они позволяют снизить вычислительную сложность нахождения решения матричного уравнения Риккати с зависящими от состояния коэффициентами.
4. Создание комбинированных моделей с использованием подходов машинного обучения и искусственного интеллекта. Важным результатом является совмещение достоинств точности искусственных нейронных сетей для многопараметрических моделей с эффективными вычис-

лительными алгоритмами на базе аналитических моделей, позволяющими работать на распределённых вычислительных архитектурах.

Выводы

1. Разработан и апробирован на схеме высоковольтной электрической сети энергорайона объединённой энергосистемы синтезированный метод ОС, базирующийся на усовершенствованном математическом методе Гаусса–Ньютона и расширенном фильтре Калмана при совместном использовании массивов ТМ и СВИ. Метод даёт возможность оценивать режимные параметры, определять МДП АМ и объёмы УВ в программных комплексах реального времени с повышенной точностью относительно стандартного статического метода ОС.

Следует отметить, что:

- процедура ОС выполняется в полярных координатах с одновременным учётом углов при напряжениях и токах (формулы (2)–(6)), что улучшает обусловленность матрицы Якоби и сходимость вычислительного процесса;
 - хотя сигма-точечный фильтр Калмана и обладает хорошей точностью, но требует определения дополнительных параметров расчётной модели, которые изначально неопределимы для всей совокупности оцениваемых схемно-режимных ситуаций, поэтому для оценивания параметров в динамике выбран расширенный фильтр Калмана;
 - предложена формула (7) для расчёта весовых коэффициентов измеренного параметра относительно других параметров, обеспечивающая сходимость итерационного процесса.
2. По результатам проведенных исследований выявлено, что по сравнению со статическим методом ОС по ТМ точность оценивания напряжения в нормальном режиме и перетоков активной мощности в нормальном и послеаварийном режимах синтезированным методом ОС по ТМ и СВИ повышается в 1,5 раза, а точность оценивания напряжения в послеаварийном режиме – в 3,6 раза.
 3. Для внедрения предлагаемого метода в программные комплексы реального времени разработано ПО, в котором реализована возможность подключения к базам данных реального времени ОИК и СМНР, а также предусмотрена интеграция с ПВК для расчётов электрических режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неуймин В.Г., Александров А.С., Сацук Е.И. Система мониторинга запасов устойчивости при планировании и управлении электроэнергетическим режимом ЕЭС России // *Электроэнергетика глазами молодежи: Труды Международн. научно-техн. конф.* – Ставрополь, 15–17 сентября 2020. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный ун-т, 2020. – С. 42–45.
2. Николаев А.В., Прихно В.Л. Задача оценивания состояния в комплексе централизованного противоаварийного управления ОЭС Востока // *Известия НТЦ Единой энергетической системы.* – 2013. – № 1 (68). – С. 25–40.
3. Wide area measurement systems based Power System State Estimation using a Robust Linear-Weighted Least Square method / S.K. Kotha, B. Rajpathak, M. Mallareddy, R. Bhuvanagiri // *2022 The 3rd International Conference on Power and Electrical Engineering (ICPEE 2022).* – Singapore, 29–31 December 2022. – Singapore: Elsevier Ltd., 2022. – P. 23–32. DOI: 10.1016/j.egy.2023.05.046.
4. Wide area monitoring system operations in modern power grids: a median regression function-based state estimation approach towards cyber attacks / H.M. Khalid, F. Flitti, M.S. Mahmoud, M.M. Hamdan, S.M. Muyeen, Z.Y. Dong // *Sustainable Energy, Grids and Networks.* – Vol. 34. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.segan.2023.101009.
5. Павлов Н.В., Лыков А.Н. SCADA/EMS/DMS-системы в Smart Grid // *Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике.* – 2016. – Т. 1. – С. 20–25.
6. Karvelis G.I., Korres G.N., Darmis O.A. State estimation using SCADA and PMU measurements for networks containing classic HVDC links // *Electric Power Systems Research.* – 2022. – Vol. 212. – P. 2–7. DOI: 10.1016/j.eper.2022.108544.
7. Review on cyber-physical and cyber-security system in smart grid: Standards, protocols, constraints, and recommendations / M.K. Hasan, A. Habib, Z. Shukur, F. Ibrahim, S. Islam, Md.A. Razzaque // *Journal of Network and Computer Applications.* – 2023. – Vol. 209. – P. 2–23. DOI: 10.1016/j.eper.2022.108544.
8. State estimation of distribution network based on hybrid measurement combined with multi-source asynchronous data / W. Zhenjie, Y. Lin, L. Pei, L. Chengda, Z. Zhengyang, L. Suirong, J.F. Sun // *2021 International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE 2021).* – Sanya, China, 19–21 November, 2021. – China: Elsevier Ltd., 2021. – P. 1778–1783. DOI: 10.1016/j.egy.2022.03.195.
9. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. – М.: Наука, 1976. – 220 с.
10. Cyber-physical power systems state estimation / A.S. Bretas, N.G. Bretas, J.B.A. London Jr., B.E.B. Carvalho. – Elsevier Inc., 2021. – 284 p. DOI: 10.1016/B978-0-323-90033-1.00007-X.
11. Static state estimation with inequality constraints in a complementarily framework for detecting infeasible operation states / R. Martínez-Parrales, O. Romay, C.R. Fuerte-Esquivel, B.A. Alcaide-Moreno // *Electric Power Systems Research.* – 2021. – Vol. 195. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.epr.2021.107129.
12. Liu Y., Lin Y., Yue K. Modern power system state estimation methods / Ed. by J. Garsia. – Gijon, Spain: Elsevier Inc., 2021. – P. 259–277. DOI: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00144-6.
13. Performance comparison of static and dynamic state estimators for electric distribution systems / F. Ahmad, M.A.K. Rashid, A. Rasool, E.E. Özsoy, A. Sabanovic, M. Elitaş // *International Journal of Emerging Electric Power Systems.* – 2017. – Vol. 18 (3). – P. 1–14. DOI: 10.1515/ijeeps-2016-0299.
14. Power system dynamic state estimation: motivations, definitions, methodologies, and future work / J. Zhao, A. Gomez-Exposito, M. Netto, L. Mili, A. Abur, V. Terzija, I. Kamwa, B. Pal, A.K. Singh, J. Qi, Z. Huang, A.P.S. Meliopoulos // *IEEE Transactions on Power Systems.* – 2019. – Vol. 34. – № 4. – P. 3188–3198. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2894769.
15. Бацева Н.Л., Фоос Ю.А. Эффективность применения динамического метода оценивания состояния параметров режима электроэнергетической системы // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* – 2023. – № 3. – С. 5–15. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.005-015.
16. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / под ред. Н.И. Воропая. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
17. Lorenz-Meyer N., Suchantke R., Schiffer J. Dynamic state and parameter estimation in multi-machine power systems – Experimental demonstration using real-world PMU-measurements // *Control Engineering Practice.* – 2023. – Vol. 135. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.conengprac.2023.105491.
18. Алгоритмическое обеспечение ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири и перспективы его развития / С.Г. Аржанников, А.С. Вторушин, О.В. Захаркин, А.К. Ландман, А.Э. Петров, Е.Ю. Попова // *Известия НТЦ Единой энергетической системы.* – 2013. – № 1 (68). – С. 91–98.
19. Li K., Han X. A distributed Gauss–Newton method for distribution system state estimation // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems.* – 2022. – Vol. 136. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107694.
20. Improved dynamic state estimation of power system using unscented Kalman filter with more accurate prediction model / Y. Yu, Q. Li, C. Chen, X. Zheng, Y. Tan // *2022 The 5th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2022).* – Brest, France, 24–26 August 2022. – P. 364–376. DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.112.
21. Mokhtari S., Yen K.K. Dynamic state estimation with additive noise for load frequency control using bilateral fuzzy adaptive unscented Kalman filter // *Electric Power Systems Research.* – 2023. – Vol. 220. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.epr.2023.109363.
22. Performance comparison of EKF/UKF/CKF for the tracking of ballistic target / D. Hong-de, D. Shao-wu, C. Yuan-cai, W. Guang-bin // *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering.* – 2012. – Vol. 10 (7). – P. 1692–1699. DOI: 10.11591/telkomnika.v10i7.1564.
23. Система мониторинга запасов устойчивости энергосистемы по данным СМПП / А.В. Данилин, В.Л. Прихно, А.В. Жуков, А.Т. Демчук // *Мониторинг параметров режима: Труды Международн. научно-практ. конф.* – М., 28–30 апреля 2008. – Москва: ОАО «СО ЕЭС», 2008. – С. 34–41.
24. A scalable graphics user interface architecture for CNC application based-On WPF and MVVM / H.H. Pan, J.J. Jiang, L.C. Hong, T.S. Hua, Q. Tan // *Advanced Materials Research.* – 2011. – Vol. 317. – P. 1931–1935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.1931.

25. Пугачев В.С., Сеницын И.Н. Теория стохастических систем. – М.: Изд-во «Логос», 2004. – 999 с.
26. Белоусов В.В. Информационная технология синтеза фильтров Пугачева для быстрой обработки информации в сингулярных стохастических системах: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004. – 245 с.

Информация об авторах

Наталья Ленмировна Бацева, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. batsevan@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1808-4700>

Юлия Алексеевна Фоос, аспирант Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. yae3@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1216-0653>

Владимир Игоревич Сеницын, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель отделения стохастических и интеллектуальных методов и средств моделирования и построения систем с интенсивным использованием данных, Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» Российской Академии Наук, Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, кор. 2. VSinitsin@ipiran.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1456-9719>

Василий Владимирович Белоусов, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» Российской Академии Наук, Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, кор. 2. vasilb@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3275-7518>

Поступила в редакцию: 27.02.2024

Поступила после рецензирования: 21.03.2024

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Neujmin V.G., Aleksandrov A.S., Satsuk E.I. The system of monitoring the reserves of stability in the planning and management of the electric power regime of the power system of Russia. *Electric power industry through the eyes of youth. Proceedings of the International scientific and technical conference*. Stavropol, September 15–17, 2020. Stavropol, North-Caucasus Federal University Publ., 2020. pp. 42–45. (In Russ.)
2. Nikolaev A.V., Prikhsno V.L. State estimation in the complex of centralized emergency management of the ECO of the East. *News of the STC of the Unified Energy System*, 2013, vol. 1, no. 68, pp. 25–40. (In Russ.)
3. Kotha S.K., Rajpathak B., Mallareddy M., Bhuvanagiri R. Wide area measurement systems based power system state estimation using a robust linear-weighted least square method. *2022 The 3rd International Conference on Power and Electrical Engineering (ICPEE 2022)*. Singapore, December 29–31, 2022. Singapore, Elsevier Ltd., 2022. pp. 23–32. DOI: 10.1016/j.egy.2023.05.046.
4. Khalid H.M., Flitti F., Mahmoud M.S., Hamdan M.M., Muyeen S.M., Dong Z.Y. Wide area monitoring system operations in modern power grids: a median regression function-based state estimation approach towards cyber attacks. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2023, vol. 34, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.segan.2023.101009.
5. Pavlov N.V., Lykov A.N. SCADA/EMS/DMS systems in Smart Grid. *Energy. Innovative directions in the energy sector. CALS-technologies in the energy sector*, 2016, vol. 1, pp. 20–25. (In Russ.)
6. Karvelis G.I., Korres G.N., Darmis O.A. State estimation using SCADA and PMU measurements for networks containing classic HVDC links. *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 212, pp. 2–7. DOI: 10.1016/j.eper.2022.108544.
7. Hasan M.K., Habib A., Shukur Z., Ibrahim F., Islam S., Razzaque Md.A. Review on cyber-physical and cyber-security system in smart grid: standards, protocols, constraints, and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*, 2023, vol. 209, pp. 2–23. DOI: 10.1016/j.eper.2022.108544.
8. Zhenjie W., Lin Y., Pei L., Chengda L., Zhengyang Z., Suirong L., Sun J.F. State estimation of distribution network based on hybrid measurement combined with multi-source asynchronous data. *2021 International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE 2021)*. China, November 19–21, 2021. China, Elsevier Ltd., 2021. pp. 1778–1783. DOI: 10.1016/j.egy.2022.03.195.
9. Gamm A.Z. *Statistical methods for state estimation of electric power systems*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 220 p. (In Russ.)
10. Bretas A.S., Bretas N.G., London Jr J.B.A., Carvalho B.E.B. *Cyber-physical power systems state estimation*. Elsevier Inc., 2021. 284 p. DOI: 10.1016/B978-0-323-90033-1.00007-X.
11. Martínez-Parralles R., Romay O., Fuerte-Esquivel C.R., Alcaide-Moreno B.A. Static state estimation with inequality constraints in a complementarily framework for detecting infeasible operation states. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 195, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.epr.2021.107129.
12. Liu Y., Lin Y., Yue K. *Modern power system state estimation methods*. Ed. by J. Garsia. Gijon, Elsevier Inc., 2021. pp. 259–277. DOI: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00144-6.
13. Ahmad F., Rashid M.A.K., Rasool A., Özsoy E.E., Sabanovic A., Elitaş M. Performance comparison of static and dynamic state estimators for electric distribution systems. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2017, vol. 18 (3), pp. 1–14. DOI: 10.1515/ijeeps-2016-0299.
14. Zhao J., Gomez-Exposito A., Netto M., Mili L., Abur A., Terzija V., Kamwa I., Pal B., Singh A.K., Qi J., Huang Z., Meliopoulos A.P.S. Power system dynamic state estimation: motivations, definitions, methodologies, and future work. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, vol. 34, pp. 3188–3198. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2894769.

15. Batseva N.L., Foos J.A. The effectiveness of the dynamic state estimation of the parameters electric power system. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, 2023, no. 3, pp. 5–15. (In Russ.) DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.005-015.
16. *System research in the energy sector: a retrospective of the scientific directions of SEI–ISEM*. Ed. by N.I. Voropay. Novosibirsk, Nauka Publ., 2010. 686 p. (In Russ.)
17. Lorenz-Meyer N., Suchantke R., Schiffer J. Dynamic state and parameter estimation in multi-machine power systems – experimental demonstration using real-world PMU-measurements. *Control Engineering Practice*, 2023, vol. 135, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.conengprac.2023.105491.
18. Arzhannikov S.G., Vtorushin A.S., Zakharkin O.V., Landman A.K., Petrov A.E., Popova E.Y. Algorithmic support of the top-level software and hardware complex of the Central Control System of the UPS of Siberia and the prospects for its development. *News of the STC of the Unified Energy System*, 2013, vol. 1, no. 68, pp. 91–98. (In Russ.)
19. Li K., Han X. A distributed Gauss–Newton method for distribution system state estimation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, vol. 136, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107694.
20. Yu Y., Li Q., Chen C., Zheng X., Tan Y. Improved dynamic state estimation of power system using unscented Kalman filter with more accurate prediction model. *2022 The 5th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2022)*. Brest, France, August 24–26, 2022. pp. 364–376. DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.112.
21. Mokhtari S., Yen K.K. Dynamic state estimation with additive noise for load frequency control using bilateral fuzzy adaptive unscented Kalman filter. *Electric Power Systems Research*, 2023, vol. 220, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.epr.2023.109363.
22. Hong-de D., Shao-wu D., Yuan-cai C., Guang-bin W. Performance comparison of EKF/UKF/CKF for the tracking of ballistic target. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2012, vol. 10 (7), pp. 1692–1699. DOI: 10.11591/telkomnika.v10i7.1564.
23. Danilin A.V., Prikhno V.L., Zhukov A.V., Demchuk A.T. The system of monitoring the reserves of the stability of the power system according to the WAMS. *Monitoring of Power System Dynamic Performance. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Moscow, April 28–30, 2008. Moscow, Russian Power System Operator Publ., 2008. pp. 34–41. (In Russ.)
24. Pan H.H., Jiang J.J., Hong L.C., Hua T.S., Tan Q. A scalable graphics user interface architecture for CNC application based-On WPF and MVVM. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 317, pp. 1931–1935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.1931.
25. Pugachev V.S., Sinitsin I.N. *A theory of stochastic systems*. Moscow, Logos Publ., 2004. 999 p. (In Russ.)
26. Belousov V.V. *Information technology of Pugachev filters synthesis for the rapid processing in singular stochastic systems*. Cand. Dis. Moscow, 2004. 245 p. (In Russ.)

Information about the authors

Natalia L. Batseva, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; batsevan@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1808-4700>

Yulia A. Foos, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; yae3@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1216-0653>

Vladimir I. Sinitsin, Dr. Sc., Professor, Federal Research Center “Computer and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44, bld. 1, Vavilov street, Moscow, 119333, Russian Federation; VSinitsin@ipiran.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1456-9719>

Vasili V. Belousov, Cand. Sc., Associate Professor, Federal Research Center “Computer and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44, bld. 1, Vavilov street, Moscow, 119333, Russian Federation; vasillb@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3275-7518>

Received: 27.02.2024

Revised: 21.03.2024

Accepted: 10.04.2024

УДК 550.36:620.91
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531
Шифр специальности: 2.4.6

Растепление многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири

В.Ю. Половников[✉], Е.Е. Бульба, С.Д. Шелемехова, Е.В. Любивый

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]polovnikov@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обеспечивается широко известными тезисами об энергетической безопасности и переходе на альтернативные источники энергии, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях за счет использования геотермальной энергии. Отдельный интерес представляет исследование тепловых режимов месторождений геотермальных источников энергии, расположенных в зонах распространения многолетнемерзлых пород. Работа геотермальных скважин в многолетнемерзлых породах связана не только с опасностью обвалов приустьевой зоны, но и с разрушением конструкций скважин с выводом их из эксплуатации на длительные промежутки времени. **Цель:** численный анализ процессов теплопереноса в зоне размещения геотермальных скважин с учетом реальных характеристик типичного геологического разреза для прогнозирования растепления многолетнемерзлых пород в Восточной Сибири. **Объект:** типичная конструкция геотермальной скважины, основные элементы которой (колонны, кондуктор и направления) выполнены из цемента. **Методы:** простой итерационный цикл совместно с методами двух «дробных шагов» по схеме расщепления и метода прогонки для решения задачи методом конечных разностей. В узловых точках, принадлежащих к нескольким областям, теплофизические характеристики рассчитывались как среднеарифметические. Адекватность результатов численного анализа подтверждается варьированием сеточных параметров, балансом энергии на границах области расчета и сопоставлением результатов исследований с литературными данными. **Результаты.** Выполнен анализ процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири с учетом изменяющихся по глубине реальных характеристик многолетнемерзлых пород. Выявлено, что радиусы растепления многолетнемерзлых пород для условий Восточной Сибири составляют 12–17 м. Показана целесообразность учета зависимости теплофизических характеристик пород/грунтов в соответствии с параметрами геологического разреза при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов, использующих геотермальную энергию.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальная скважина, растепление многолетнемерзлых пород, теплоперенос, математическое моделирование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-29-00464).

Для цитирования: Растепление многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири / В.Ю. Половников, Е.Е. Бульба, С.Д. Шелемехова, Е.В. Любивый // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 30–38. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531

UDC 550.36:620.91
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531

Thawing of permafrost rocks when exploiting geothermal wells in Eastern Siberia

V.Yu. Polovnikov[✉], E.E. Bulba, S.D. Shelemekhova, E.V. Lyubiviy

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]polovnikov@tpu.ru

Abstract. Relevance. Ensured by well-known theses about energy security and transition to alternative energy sources, reducing environmental emissions and energy saving in various industries through the use of geothermal energy. The study of the thermal regimes of deposits of geothermal energy sources located in zones of permafrost is of particular interest. The operation of geothermal wells in permafrost is associated not only with the danger of collapses in the wellhead zone, but also with the destruction of well structures with the withdrawal of their operation for long periods of time. **Aim.** Numerical analysis of heat transfer in the area where geothermal wells are located, taking into account the real characteristics of a typical geological section to predict the thawing of permafrost in Eastern Siberia. **Object.** Typical geothermal well design, the main elements of which (columns, conductor and directions) are made of cement. **Methods.** The simple iteration cycle was used in conjunction with the methods of two fractional steps according to the splitting scheme and the sweep method to solve the problem by the finite difference method. At nodal points belonging to several areas, the thermophysical characteristics were calculated as arithmetic averages. The adequacy of the results of the numerical analysis is confirmed by varying the grid parameters, the energy balance at the boundaries of the calculation area, and comparing the research results with literature data. **Results.** The authors have carried out the analysis of heat transfer during the operation of geothermal wells in Eastern Siberia, taking into account the actual characteristics of permafrost rocks that vary with depth. It was revealed that the radii of thawing of permafrost for the conditions of Eastern Siberia are 12–17 meters. The feasibility of taking into account the dependence of the thermophysical characteristics of rocks/soils in accordance with the parameters of the geological section during the design, construction and operation of objects using geothermal energy is shown.

Keywords: geothermal energy, geothermal well, permafrost thawing, heat transfer, mathematical modeling

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-29-00464.

For citation: Polovnikov V.Yu., Bulba E.E., Shelemehova S.D., Lyubivy E.V. Thawing of permafrost rocks when exploiting geothermal wells in Eastern Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 30–38. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531

Введение

Проведенный в [1] анализ показывает, что проблема загрязнения окружающей среды объективно существует, и мировое сообщество должно осуществлять какие-то действия с целью снижения антропогенной нагрузки. При этом в [1] отмечается, что ни ветрогенераторы, ни солнечные панели в обозримом будущем не смогут внести сколь-нибудь значимый вклад в энергоснабжение. Этот пессимистический прогноз согласуется с [2–4], где для условий различных стран указывается на необходимость масштабного использования альтернативной энергетики с целями, не ограниченными заботой об окружающей среде.

Одним из путей решения этой задачи является устойчиво растущее во всем мире [5–7] использование геотермальных источников тепла. Актуальность использования указанного вида природных ресурсов обеспечивается широко известными тезисами об энергетической безопасности и переходе на альтернативные источники энергии, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях за счет использования геотермальной энергии [8–10]. Ярчайшим успешным примером повсеместного использования геотермальной энергии является Исландия [11, 12], где, например, отопление домохозяйств за счет геотермальных ресурсов приближается к 100 %.

По прогнозу [13] к 2025 г. в мире будет производиться около 20 ГВт геотермальной энергии (при этом доля РФ всего 96 МВт). При этом оценки, приведенные в [13], говорят о том, что потенциал геотермального тепла в РФ в 8–12 раз превышает

потенциал всех углеводородов, а сбалансированное развитие рассматриваемого вида природных ресурсов может коренным образом преобразить энергетику страны.

В настоящее время основные тренды в рассматриваемой области сводятся к развитию технологий геотермальных тепловых насосов [14–16], геотермальных электрических станций (традиционных и с использованием бинарных циклов) [17–19] и использованию глубинной энергии недр [20–22].

Отдельный интерес представляет исследование тепловых режимов месторождений геотермальных источников энергии, расположенных в зонах распространения многолетнемерзлых пород. На территории России такими зонами, как правило, являются территории, удаленные от крупных промышленных источников энергоснабжения. Работа геотермальных скважин в многолетнемерзлых породах связана не только с опасностью обвалов приустьевой зоны, но и с разрушением конструкций скважин с выводом их из эксплуатации на длительные промежутки времени.

Цель работы – численный анализ процессов теплопереноса в зоне размещения геотермальных скважин с учетом реальных характеристик типичного геологического разреза для прогнозирования растепления многолетнемерзлых пород в Восточной Сибири.

Постановка задачи

При проведении численного анализа процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири моделировалось теп-

ловое состояние наиболее распространенного в РФ вида нефтяных скважин, основные элементы которого (колонны, кондуктор и направления) выполнены из цемента (рис. 1).

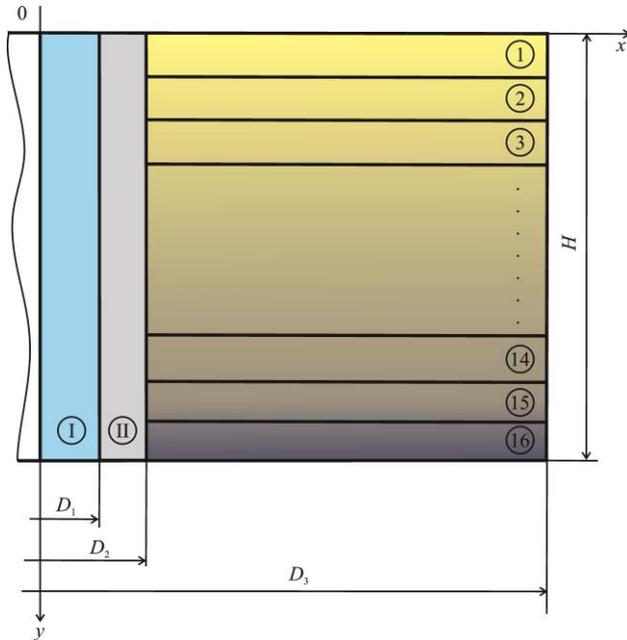


Рис. 1. Схема области решения: I – трубопровод; II – цементные колонны, кондуктор и направления; 1–16 – слои породы/грунта (табл. 1)

Fig. 1. Scheme of the solution area: I – pipeline; II – cement columns, conductor and directions; 1–16 – rock/soil layers (Table 1)

Начальным условием при постановке задачи являлось условие постоянной температуры в рассматриваемой области решения. Такое состояние соответствует отсутствию прокачки энергоносителя по трубопроводу I (рис. 1). Далее по трубопроводу I начинает выходить энергоноситель. Причем температура энергоносителя выше начальной температуры в рассматриваемой области. В этих условиях предполагается, что выход энергоносителя является достаточно интенсивным для установления на внутренней поверхности трубы постоянной температуры, которая равна температуре энергоносителя.

Допущения, при которых решалась рассматриваемая задача, являются широко распространенными [23–30], не требующими специальных пояснений, и сводятся к следующим положениям.

- не учитывается зависимость теплофизических свойств от температуры;
- учитывается только кондуктивный перенос тепла;
- выполняются условия симметрии, идеальной тепловой изоляции и теплового контакта;
- не учитывается термическое сопротивление стенки трубопровода и возможные фазовые переходы.

Математическая модель

Процессы переноса тепла описывались уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат. Ось симметрии трубопровода I являлась началом координатной системы.

На поверхности D_1 , в соответствии с постановкой задачи, вводилось условие постоянства температуры, а на поверхности D_3 предполагалось, что градиент температур равен нулю. В местах соприкосновения слоев выполнялись условия идеального теплового контакта. На верхней границе рассматриваемой системы (рис. 1) при $y=0$ теплоотвод осуществляется в условиях свободной конвекции, а на нижней границе ($y=H$) тепловой поток равен нулю.

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right); i = \text{II}, 1-16. \quad (1)$$

$$T_i = T_0 = \text{const}; i = \text{II}, 1-16. \quad (2)$$

$$T = T_1. \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T - T_{ex}). \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x}; T_i = T_j; i, j = \text{II}, 1-16; i \neq j. \quad (7)$$

Обозначения: c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); x, y – координаты, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ex – наружный; 0 – начальный момент времени; II, 1–16 – номера областей расчета (рис. 1).

Следует отметить, что задача (1)–(7) описывает достаточно реальные условия эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири при отсутствии в описанных выше допущениях принципиальных ограничений.

Метод решения и исходные данные

Традиционно для решения задач, подобных рассматриваемой в настоящей работе, используется обратный анализ [23, 24] или решение задачи Стефана [25, 26]. Однако достаточно большое количество узлов пространственно-временной сетки, связанное с геометрическими параметрами (размер расчетной области около 50×50 м), и существенная длительность расчета (30 лет) потребо-

вали отказаться от широко распространенных подходов к решению рассматриваемой задачи. Был использован простой итерационный цикл совместно с методами двух «дробных шагов» по схеме расщепления и прогонки для решения задачи методом конечных разностей. В узловых точках, принадлежащих к нескольким областям, теплофизические характеристики рассчитывались как среднеарифметические.

Исследования проводились для типичной скважины, основные элементы которой (колонны, кондуктор и направления) выполнены из цемента. Теплофизические свойства цемента принимались равными следующим значениям: $\lambda=0,99$ Вт/(м·К); $\rho=1830$ кг/м³; $c=1900$ Дж/(кг·К). Геометрические

параметры были равны: $D_1=0,073$ м; $D_2=0,53$ м; $D_3=50$ м, $H=50$ м (рис. 1).

Последовательность залегания пород/грунтов в рассматриваемой области решения (рис. 1) и их теплофизические свойства приняты в соответствии с типичным геологическим разрезом в Восточной Сибири [27] и приведены в табл. 1.

Температура в начальный момент времени принималась равной $T_0=272,7$ К, а на верхней границе области расчета (при $y=0$) – $T_{ex}=273,15$ К. Такие значения T_0 и T_{ex} являются типичными для условий Восточной Сибири [27]. Значение коэффициента теплоотдачи в граничном условии (5) являлось постоянным и было равно $\alpha=20$ Вт/(м²·К), а величина T_1 в условии (3) изменялась от 298,15 до 373,15 К.

Таблица 1. Теплофизические характеристики пород/грунтов по усредненному геологическому разрезу [27]

Table 1. Thermophysical characteristics of rocks/soils according to the averaged geological section [27]

Номер слоя Layer number	Порода/грунт Rock/soil	Глубина залегания, м Depth, m		λ , Вт/(м·К)/W/(m·K)	c , Дж/(кг·К)/J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ /kg/m ³
		0	2,6			
1	Суглинки, техногенный грунт Loams, technogenic soil	0	2,6	1,74	870	2000
2	Суглинок щебенистый, пластично-мерзлый, слабольдистый массивной криотекстуры Crushed loam, plastically frozen, slightly icy, massive cryotexture	2,6	5,0	1,57	1142	2110
3	Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, пластично-мерзлый, слабольдистый, корковой криотекстуры Crushed stone soil with loamy filler, plastically frozen, slightly icy, crusty cryotexture	5,0	15,0	2,33	972	2180
4	Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, пластично-мерзлый, слабольдистый, корковой криогенной текстуры Crushed stone soil with loamy filler, plastically frozen, slightly icy, crusty cryogenic texture	15,0	20,0	1,8	851	2220
5	Щебенистый грунт с включением глыб, твердомерзлый слабольдистый корковой криотекстуры Crushed soil with inclusions of blocks, hard-frozen, slightly icy, crusty cryotexture	20,0	25,0	3,12	995	2270
6	Алеврит низкой прочности, выветрелый, трещиноватый, морозный Siltstone of low strength, weathered, fractured, frosty	25,0	30,0	3,0	892	2130
7	Доломит пониженной прочности, трещиноватый, кавернозный, выветрелый, морозный Dolomite of reduced strength, fractured, cavernous, weathered, frosty	30,0	32,0	1,94	1009	2130
8	Алеврит пониженной прочности, трещиноватый, выветрелый, морозный Siltstone of reduced strength, fractured, weathered, frosty	32,0	35,0	2,35	952	2100
9	Песчаник пониженной прочности, трещиноватый, выветрелый Sandstone of reduced strength, fractured, weathered	35,0	37,0	1,9	915	2130
10	Доломит малопрочный, трещиноватый, кавернозный, выветрелый Low-strength dolomite, fractured, cavernous, weathered	37,0	40,0	1,94	1103	2040
11	Алеврит пониженной прочности, трещиноватый Siltstone of reduced strength, fractured	40,0	42,0	2,35	952	2100
12	Доломит малопрочный, трещиноватый, кавернозный Low-strength dolomite, fractured, cavernous	42,0	44,0	1,82	1071	2040
13	Алеврит низкой прочности, трещиноватый Siltstone of low strength, fractured	44,0	45,0	1,9	892	2130
14	Песчаник пониженной прочности, трещиноватый Sandstone of reduced strength, fractured	45,0	47,0	2,35	915	2130
15	Доломит средней прочности, трещиноватый Medium strength dolomite, fractured	47,0	48,0	1,57	928	2510
16	Алеврит пониженной прочности, трещиноватый Siltstone of reduced strength, fractured	48,0	50,0	1,5	952	2100

Результаты численного моделирования

На рис. 2–5 и в табл. 2 представлены наиболее типичные результаты численного анализа процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири с учетом изменения теплофизических свойств пород/грунтов по глубине.

Моделирование выполнено для тридцатилетнего периода эксплуатации геотермальной скважины как одного из типичных сроков работы рассматриваемого объекта. При этом основное внимание было сконцентрировано на влиянии нестационарности теплопереноса и значений температуры энергоносителя T_1 на интенсификацию процессов переноса тепла.

Адекватность результатов численного анализа подтверждается варьированием сеточных параметров, балансом энергии на границах области расчета и сопоставлением результатов исследований с литературными данными. Сеточные параметры, выбираемые из условий сходимости и устойчивости решений, составляли от 1 до 10 мм для шага по координате и не более 1 с для шага по времени. Отклонение по балансу энергии составляло не более 0,5 %.

Сопоставление результатов исследования с известными работами, например, [27–30], по анализу растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации нефтяных скважин позволяет говорить об их хорошем качественном согласовании. При этом следует отметить, что геометрия области решения в настоящей работе соответствует описан-

ной в [27], а характер изменения температурных полей идентичный.

На рис. 2–5 показаны изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения в различные моменты времени в зависимости от температуры энергоносителя T_1 .

Характер изменения координат изотермических линий 273,15 К в рассматриваемой области решения (рис. 2–5) позволяет сделать вывод об их зависимости от теплофизических характеристик пород/грунтов в соответствии с усредненным геологическим разрезом (табл. 1). При этом, как показывают результаты исследования (рис. 2–5), с течением времени и увеличением температуры энергоносителя T_1 радиус растепления ожидаемо возрастает. Этот результат важен в практическом плане: поскольку позволяет обоснованно выбирать схему размещения эксплуатируемых в многолетнемерзлых породах геотермальных скважин. Размещение геотермальных скважин, базирующееся на использовании математической модели (1)–(7), приведет к обоснованному выбору расстояний между соседними скважинами и иными сооружениями.

В табл. 2 сгруппированы результаты численного анализа по максимальному радиусу растепления многолетнемерзлых пород/грунтов в рассматриваемой области решения при различных температурах энергоносителя для тридцатилетнего периода эксплуатации геотермальной скважины.

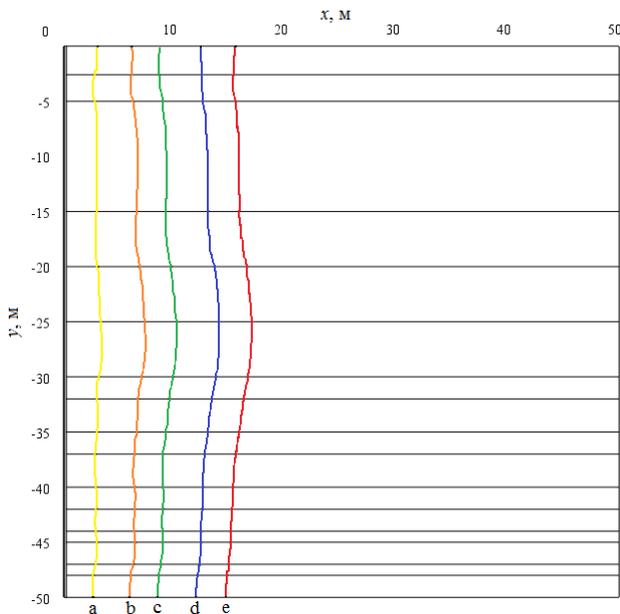


Рис. 2. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=373,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет

Fig. 2. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=373.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

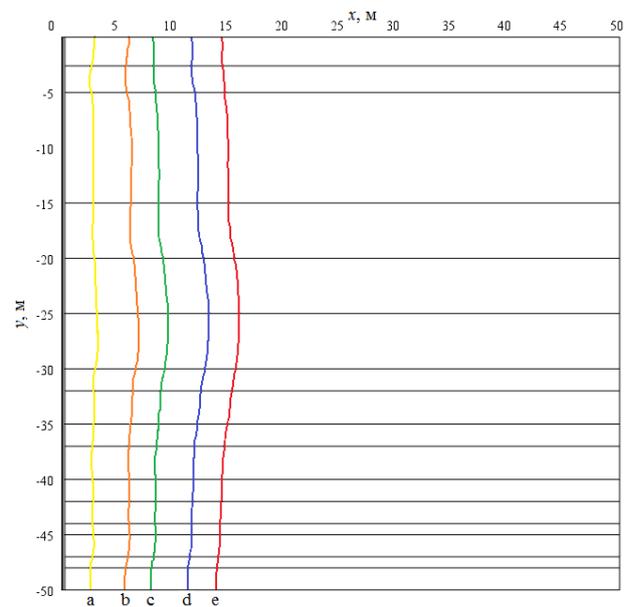


Рис. 3. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=348,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет

Fig. 3. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=348.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

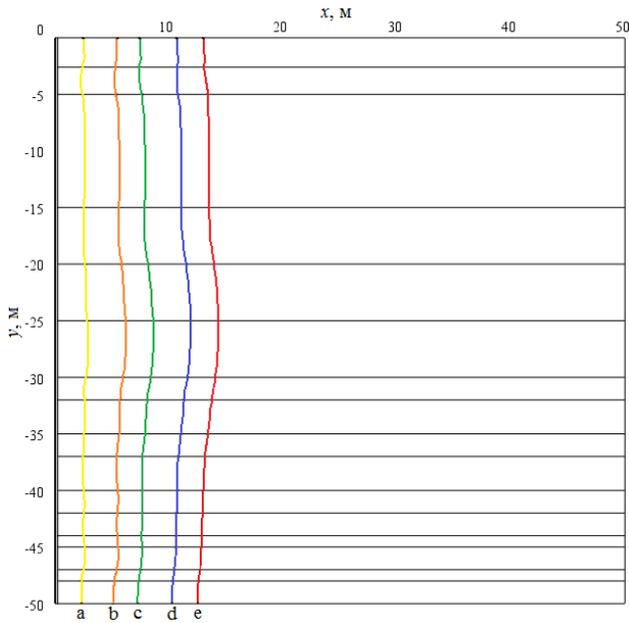


Рис. 4. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=323,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет
Fig. 4. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=323.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

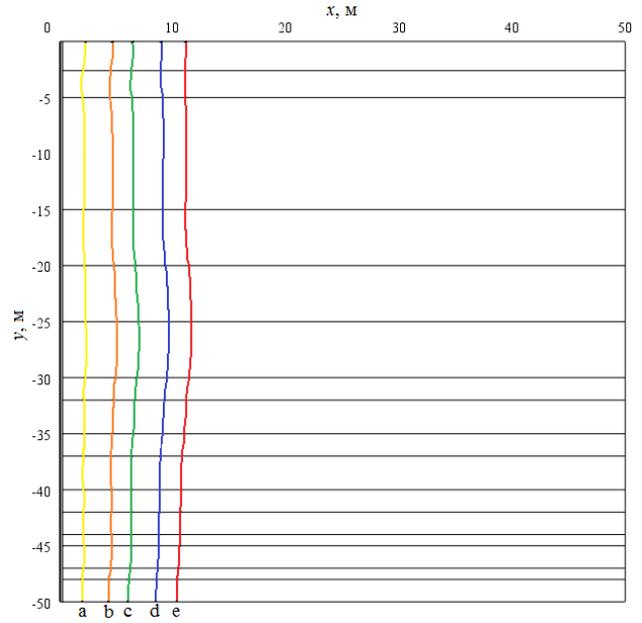


Рис. 5. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=298,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет
Fig. 5. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=298.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

Таблица 2. Максимальный радиус растепления пород/грунтов

Table 2. Maximum thawing radius of rocks/soils

T_1 , К	373,15	348,15	323,15	298,15
Максимальный радиус растепления, м	16,93	15,89	14,36	11,68
Maximum thawing radius, m	16,93	15,89	14,36	11,68

Радиусы растепления многолетнемерзлых пород (табл. 2) для условий Восточной Сибири являются существенными, составляют 12–17 м и должны учитываться при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов, использующих геотермальную энергию.

Следует отметить, что приведенные (табл. 2) величины радиусов растепления многолетнемерзлых пород являются максимально возможными, поскольку при проведении настоящего исследования не учитывалось снижение температуры энергоносителя при длительной эксплуатации из-за снижения теплового дебита геотермальных скважин.

сителя при длительной эксплуатации из-за снижения теплового дебита геотермальных скважин.

Заключение

Выполнен анализ процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири с учетом изменяющихся по глубине реальных характеристик многолетнемерзлых пород.

Выявлено, что радиусы растепления многолетнемерзлых пород для условий Восточной Сибири составляют 12–17 м.

Показана целесообразность учета зависимости теплофизических характеристик пород/грунтов в соответствии с параметрами геологического разреза при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов, использующих геотермальную энергию, для прогнозирования растепления многолетнемерзлых пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бульба Е.Е., Кузнецов Г.В., Швайбович М.И. Оценка перспектив использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в ближайшие двадцать лет // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 164–172.
- Solaun K., Cerdá E. Climate change impacts on renewable energy. A review of quantitative projections // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 116. – Article 109415.
- Development of renewable energy sources in the European Union in the context of sustainable development policy / P. Bórawski, R. Wyszomierski, A. Beldycka-Bórawska, B. Mickiewicz, B. Kalinowska, J.W. Dunn, T. Rokicki // Energies. – 2022. – № 15. – Article 1545.
- Zahedi R., Zahedi A., Ahmadi A. Strategic study for renewable energy policy, optimizations and sustainability in Iran // Sustainability. – 2022. – Vol. 14 (4). – Article 2418.

5. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review // *Geothermics*. – 2021. – Vol. 90. – № 101915. – P. 1–31.
6. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электроэнергетика, теплоснабжение (обзор) / В.А. Бугузов, Г.В. Томаров, А.Б. Алхасов, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов // *Теплоэнергетика*. – 2022. – № 1. – С. 3–17.
7. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // *Георесурсы*. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 113–122.
8. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability // *International Journal of Energy Research*. – 2015. – Vol. – 39. – № 5. – P. 585–606.
9. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 39. – P. 748–764.
10. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States // *Energy Policy*. – 2010. – Vol. 38. – № 2. – P. 803–813.
11. Stober I., Bucher K. *Geothermal energy*. 2nd ed. – Cham: Springer International Publ., 2021. – 390 p.
12. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems / M. Soltani, M.F. Kashkooli, A. Dehghani-Sani, A. Kazemi, N. Bordbar, M. Farshchi, M. Elmi, K. Gharali, B.M. Dusseault // *Sustainable cities and society* – 2019. – Vol. 44. – P. 793–818.
13. Hutterer G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020. Update Report, Review // *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. – Reykjavik, Iceland, 2021. – Article 01017.
14. Atam E., Helsen L. Ground-coupled heat pumps: Part 1 – Literature review and research challenges in modeling and optimal control // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 54. – P. 1653–1667.
15. Геотермальный тепловой насос в концепции пассивного дома / В.А. Костенко, Н.М. Гафиятуллина, А.А. Семчук, М.И. Куколев // *Инженерно-строительный журнал*. – 2016. – № 8 (68). – С. 18–25.
16. Моделирование работы тепловых насосов. Проблемы и перспективы / А.В. Толстых, Ю.Н. Дорошенко, В.В. Пенявский, И.О. Халимов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 125–137.
17. Understanding the Chena Hot Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data from exploration boreholes / K. Erkan, G. Holdmann, W. Benoit, D. Blackwell // *Geothermics*. – 2008. – Vol. 37. – № 6. – P. 565–585.
18. Томаров Г.В., Шипков А.А. Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой перегрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 11. – С. 63–71.
19. DiPippo R. Combined and hybrid geothermal power systems // *Geothermal Power Generation*. – 2016. – Vol. 1. – P. 391–420.
20. Hosseinnia S.M., Sorin M. Numerical approach for sizing vertical ground heat exchangers based on constant design load and desired outlet temperature // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – № 48. – Article 103932.
21. Li J., Dai C., Lei H. The influence of thermal boundary conditions of wellbore on the heat extraction performance of deep borehole heat exchangers // *Geothermics*. – 2022. – № 100. – Article 102325.
22. Tiwari A.K., Kumar A., Basu P. The influence of thermal interaction on energy harvesting efficiency of geothermal piles in a group // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – № 200. – Article 117673.
23. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis / G. Russo, A. Corbo, F. Cavuoto, S. Autuori // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2015. – Vol. 50. – P. 226–238.
24. Viggiani G.M.B., De Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples // *Geological Society Engineering Geology Special Publication*. – 2009. – Vol. 22. – № 1. – P. 215–240.
25. Myers T.G., Hennessy M.G., Calvo-Schwarzwälder M. The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 149. – Article 118975.
26. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects / M.A. Alzoubi, M. Xu, F.P. Hassani, S. Poncet, A. Sasmith // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2020. – Vol. 104. – Article 103534.
27. Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Радиус растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации нефтяных скважин в Восточной Сибири // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2014. – № 1. – С. 38–43.
28. Полозков К.А., Филиппов В.П., Полозков А.В. Теплоизоляция конструкций скважин и расчет теплопередачи через диафрагмы, соединяющие двустенные теплоизолированные трубы в многолетнемерзлых породах // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2011. – № 8. – С. 9–16.
29. Полозков А.В., Полозков К.А., Гафтуняк П.И. Теплоизоляция конструкций скважин и расчет их теплообмена с многолетнемерзлыми породами // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2011. – № 10. – С. 15–22.
30. Полозков К.А. Выбор расстояний между кустовыми эксплуатационными скважинами в зонах ММП // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2008. – № 3. – С. 21–29.

Информация об авторах

Вячеслав Юрьевич Половников, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. polovnikov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5504-0411>

Елена Евгеньевна Бульба, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. bulba@tpu.ru

Софья Дмитриевна Шелемехова, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shelemehovaaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9898-8867>

Егор Вадимович Любимый, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. evl27@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-8908-2041>

Поступила в редакцию: 11.01.2024

Поступила после рецензирования: 22.01.2024

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Bulba E.E., Kuznetsov G.V., Shvaybovich M.I. Assessment of the prospects for using unconventional renewable energy sources in the next twenty years. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 164–172. (In Russ.)
2. Solaun K., Cerdá E. Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 116, Article 109415.
3. Bórawski P., Wyszomierski R., Beldycka-Bórawska A., Mickiewicz B., Kalinowska B., Dunn J.W., Rokicki T. Development of renewable energy sources in the European Union in the context of sustainable development policy. *Energies*, 2022, vol. 15, Article 1545.
4. Zahedi R., Zahedi A., Ahmadi A. Strategic study for renewable energy policy, optimizations and sustainability in Iran. *Sustainability (Switzerland)*, 2022, vol. 14 (4), Article 2418.
5. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 2021, vol. 90, no. 101915, pp. 1–31.
6. Butuzov V.A., Tomarov G.V., Alkhasov A.B., Aliev R.M., Badavov G.B. Geothermal energy of Russia: resources, electric power generation, and heat supply (a review). *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69 (1), pp. 3–17. (In Russ.)
7. Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Current trends in the development of geothermal resources. *Georesursy*, 2020, vol. 22 (4), pp. 113–122. (In Russ.)
8. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39, no. 5, pp. 585–606.
9. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748–764.
10. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, no. 2, pp. 803–813.
11. Stober I., Bucher K. *Geothermal Energy*. 2nd ed. Cham, Springer International Publ., 2021. 390 p.
12. Soltani M., Kashkooli M.F., Dehghani-Saniy A., Kazemi A., Bordbar N., Farshchi M., Elmi M., Gharali K., Dusseault B.M. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 44, pp. 793–818.
13. Hutter G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020. Update Report, Review. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland, 2021. Article 01017.
14. Atam E., Helsen L. Ground-coupled heat pumps: Part 1 – Literature review and research challenges in modeling and optimal control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 54, pp. 1653–1667.
15. Kostenko V.A., Gafiyatullina N.M., Semchuk A.A., Kukolev M.I. Geothermal heat pump in the passive house concept. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, no. 8, pp. 18–25. (In Russ.)
16. Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N., Penyavskii V.V., Khalimov I.O. Simulation of heat pump operation. problems and prospects. *Journal of Construction and Architecture*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 125–137. (In Russ.)
17. Erkan K., Holdmann G., Benoit W., Blackwell D. Understanding the Chena Hot Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data from exploration boreholes. *Geothermics*, 2008, vol. 37, no. 6, pp. 565–585.
18. Tomarov G.V., Shipkov A.A. Geothermal combined binary power plant with flash steam superheating system: choice of optimal working fluids. *Teploenergetika*, 2019, no. 11, pp. 63–71. (In Russ.)
19. DiPippo R. Combined and hybrid geothermal power systems. *Geothermal Power Generation*, 2016, vol. 1, pp. 391–420.
20. Hosseinnia S.M., Sorin M. Numerical approach for sizing vertical ground heat exchangers based on constant design load and desired outlet temperature. *Journal of Building Engineering*, 2022, no. 48, Article 103932.
21. Li J., Dai C., Lei H. The influence of thermal boundary conditions of wellbore on the heat extraction performance of deep borehole heat exchangers. *Geothermics*, 2022, no. 100, Article 102325.
22. Tiwari A.K., Kumar A., Basu P. The influence of thermal interaction on energy harvesting efficiency of geothermal piles in a group. *Applied Thermal Engineering*, 2022, no. 200, Article 117673.
23. Russo G., Corbo A., Cavuoto F., Autuori S. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, vol. 50, pp. 226–238.
24. Viggiani G.M.B., De Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples. *Geological Society Engineering Geology Special Publication*, 2009, vol. 22, no. 1, pp. 215–240.
25. Myers T.G., Hennessy M.G., Calvo-Schwarzwälder M. The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 149, Article 118975.
26. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 104, Article 103534.
27. Polovnikov V.Yu., Tcygankova Yu.S. Radius of permafrost thawing while operating oil wells in the east Siberia. *Stroitelstvo nefitanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2014, no. 1, pp. 38–43. (In Russ.)
28. Polozkov K.A., Philippov V.P., Polozkov A.V. Thermal insulation of a well structure and calculation of heat transfer via diaphragms connecting double-wall thermal-insulated casing pipes in conditions of permafrost. *Stroitelstvo nefitanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2011, no. 8, pp. 9–16. (In Russ.)

29. Polozkov A.V., Polozkov K.A., Gaftuniak P.I. Heat insulation of well structures and calculation of their heat exchange with permafrost rock. *Stroitelstvo neftiykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2011, no. 10, pp. 15–22. (In Russ.)
30. Polozkov K.A. Selection of distances between cluster production wells in permafrost zones. *Stroitelstvo neftiykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2008, no. 3, pp. 21–29. (In Russ.)

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. polovnikov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5504-0411>

Elena E. Bulba, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. bulba@tpu.ru

Sofia D. Shelemekhova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shelemehovaaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9898-8867>

Egor V. Lyubivy, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. evl27@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-8908-2041>

Received: 11.01.2024

Revised: 22.01.2024

Accepted: 10.04.2024

УДК 504.45:504.054

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой

Е.А. Цветкова[✉], В.И. Полетаева, М.В. Пастухов

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, г. Иркутск

[✉]e.tsvetkova@igc.irk.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена напряженной экологической ситуацией в зоне воздействия крупного промышленного комплекса г. Усо́лья-Сибирского на р. Ангаре, поиском источников и путей поступления загрязняющих веществ в разные по техногенной нагрузке периоды, необходимым для оценки и прогноза происходящих изменений в водной экосистеме. *Цель:* изучить химический состав сточных вод промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского в разные по техногенной нагрузке периоды и оценить их воздействие на гидрохимические показатели воды р. Ангары. *Объекты:* сточные воды промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского и воды р. Ангары в импактном районе в период с высокой техногенной нагрузкой (2010 г.) и в период ее снижения (2020 г.). *Методы.* Химический состав сточных и природных вод определен в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института Геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск, Россия). Измерение концентраций главных ионов в водах проведено с использованием комплекса общепринятых в гидрохимии методов (атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная пламенная спектрометрия, спектрофотометрия, потенциометрия, титриметрия), концентрации Hg – с помощью метода атомно-абсорбционной спектрометрии, концентрации других микроэлементов – с помощью метода масс-спектрометрии (ISP MS). *Результаты.* Обнаружены значительные изменения химического состава сточных вод промышленной зоны в разные по техногенной нагрузке периоды, отражающие преобразования источников загрязнения в ходе работ по ликвидации техногенных объектов территории. За десятилетний период особо значимые изменения выражены в существенном снижении концентраций Hg, Al, Cs, Ti, Cr, Cl⁻ и Na⁺ и увеличении концентраций Mn в сточных водах промышленной зоны, что, в свою очередь, находит отражение в динамике гидрохимического состава вод р. Ангары в импактном районе. В 2010 г. наблюдалось закономерное последовательное снижение концентраций большинства элементов по мере удаления вод р. Ангары от техногенных источников. В то время как в 2020 г. их пространственное распределение противоположно: при значительном снижении концентраций большинства исследуемых элементов на участке реки в 50 м ниже промышленных сбросов обнаружено их увеличение на более удаленных мониторинговых станциях (1,5 и 5 км), где концентрации Mn, Cu, Cd и Tl достигают наибольших величин. Несмотря на значительные изменения химического состава сточных вод в разные по техногенной нагрузке периоды, воды р. Ангары на всех мониторинговых станциях в зоне воздействия промышленного комплекса г. Усо́лья-Сибирского относятся к загрязненным.

Ключевые слова: загрязнение, главные ионы, микроэлементы, река Ангара, сточные воды

Благодарности: Исследование проведено по государственному заданию в рамках проекта № 0284-2021-0003.

Для цитирования: Цветкова Е.А., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 39–58. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

UDC 504.45:504.054

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

Characteristics of wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe and its impact on hydrochemical composition of the Angara river during periods with different technogenic load

E.A. Tsvetkova[✉], V.I. Poletaeva, M.V. Pastukhov

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

[✉]e.tsvetkova@igc.irk.ru

Abstract. Relevance. Tense ecological situation in the impact zone of the large industrial complex of Usolye-Sibirskoe on the Angara river, search for sources and ways of pollutants inflow during different periods of technogenic load, necessary to assess and forecast the current changes in the aquatic ecosystem. **Aim.** To study chemical composition of wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe during different periods of technogenic load and assess their impact on hydrochemical parameters of the Angara river water. **Objects.** Wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe and Angara river waters in the impact area during the period of high technogenic load (2010) and the period of its reduction (2020). **Methods.** Chemical composition of wastewater and natural water was determined in the Center of Collective Use «Isotope-Geochemical Investigations» of Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk, Russia). Concentrations of major ions in waters were measured using a set of methods generally accepted in hydrochemistry (atomic absorption and atomic emission flame spectrometry, spectrophotometry, potentiometry, titrimetry), Hg concentration was measured using atomic absorption spectrometry, concentrations of other trace elements – using mass spectrometry method (ISP MS). **Results.** The authors have revealed significant changes in chemical composition of wastewater of the industrial zone in different periods of technogenic load, reflecting the transformation of pollution sources during the liquidation of technogenic objects of the area. Over the ten-year period particularly important changes are expressed in a significant decrease of Hg, Al, Cs, Ti, Cr, Cl⁻ and Na⁺ concentrations and increase of Mn concentrations in the wastewater of the industrial zone. This is reflected, in its turn, in the dynamics of hydrochemical composition of Angara river water in the impact area. In 2010 a regular consecutive decrease of most of elements concentrations was observed with distance of Angara river waters from technogenic sources. In 2020 their spatial distribution is opposite: with a significant decrease in concentrations of most of the studied elements at the river site 50 m downstream of industrial discharges, their increase was detected at more distant monitoring stations (1.5 and 5 km) where Mn, Cu, Cd and Tl concentrations were the highest. Despite significant changes in wastewater chemical composition in different periods of technogenic load, the Angara river waters at all monitoring stations in the impact zone of the industrial complex of Usolye-Sibirskoe are polluted.

Keywords: pollution, major ions, trace elements, Angara river, wastewater

Acknowledgements: The study was carried out under the state assignment within the framework of project no. 0284-2021-0003.

For citation: Tsvetkova E.A., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Characteristics of wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe and its impact on hydrochemical composition of the Angara river during periods with different technogenic load. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 39–58. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

Введение

Сточные воды являются одним из основных источников загрязнения водных экосистем. Поступление со сточными водами загрязняющих веществ в водоемы в значительной мере ухудшает качество водных ресурсов, создавая проблему общемирового масштаба [1–3]. Наибольшую опасность представляют промышленные сточные воды, характеризующиеся высокими концентрациями потенциально токсичных элементов [4]. В первую очередь, поступление сточных вод изменяет гидрохимический состав водоемов, который является главным детерминантом условий существования всей био-

тической составляющей [5, 6]. Увеличение концентраций элементов техногенного происхождения в водной среде может привести к токсикологическому воздействию на гидробионтов различных трофических уровней, а в итоге и к нарушению гомеостаза всей водной экосистемы [7–9].

Река Ангара, вытекающая из оз. Байкал, имеет большое значение для населения Иркутской области. Её водные ресурсы используются в питьевых, рекреационных, гидроэнергетических и рыбохозяйственных целях. Вместе с этим в границах ее водосборного бассейна расположены крупные промышленные комплексы, представленные ме-

таллургическими, нефтеперерабатывающими, лесозаготовительными и химическими производствами и оказывающие непосредственное влияние на химический состав всех компонентов экосистемы водоема. Поступление в р. Ангару загрязненных вод различного генезиса – хозяйственно-бытовых, производственных, сельскохозяйственных, а также поверхностного стока во многом определяет гидрохимический режим реки. Наиболее масштабная промышленная зона расположена в г. Усоля-Сибирском, в междуречье р. Ангары и ее притока – р. Белой (рис. 1). Промышленная зона включает в себя производства химической, фармацевтической и энергетической отраслей, предприятия которых обеспечивают поступление широкого круга органических и неорганических загрязнителей в окружающую среду Приангарья на протяжении нескольких десятков лет. Самым крупным предприятием промышленной зоны г. Усоля-Сибирского являлось организованный в 1936 г. предприятие «Усоляхимпром» (УХП), производившее разнообразную химическую продукцию (кремнийорганических полимеры, карбид кальция, метилцеллюлозы, каустической соды, металлического натрия, эпихлоргидрина и т. д.). Крупномасштабной экологической проблемой, вызванной деятельностью этого предприятия, является широко известное ртутное загрязнение геосистем Иркутской области, связанное с производством хлора и каустической соды методом ртутного электролиза. Результаты эколого-геохимических исследований импактного района показали чрезвычайно высокие концентрации Hg в почве в районе предприятия УХП, водах и донных осадках р. Ангары и созданного на ней Братского водохранилища [10, 11]. Закрытие цеха ртутного электролиза (1998 г.) и полная остановка предприятия (2012 г.) предопределяли снижение техногенной нагрузки на прилегающие к промышленной зоне г. Усоля-Сибирского экосистемы, в том числе и р. Ангары. Однако техногенное воздействие на окружающую среду Приангарья продолжается с функционирующими до сих пор предприятиями промышленной зоны. Помимо этого, в настоящее время проводятся работы по демеркуризации цеха ртутного электролиза и других высокотоксичных технологических объектов предприятия УХП, а значит, вероятность поступления веществ техногенного генезиса в окружающую среду существенно возрастает. В таких условиях принципиально важным становится изучение химического состава сточных вод и вод р. Ангары в зоне их влияния, а также проведение мониторинговых исследований, позволивших бы определить уровень загрязнения реки с учетом ретроспективной составляющей. В связи с этим целью работы стало: а) инвентаризация поступающих в р. Ангару сточных вод промышленной зоны г. Усоля-Сибирского; б) оценка воздействия сточных вод на гидрохимический состав р. Ангары.

Материалы и методы

Объекты исследования

Для изучения динамики химического состава сточных вод промышленной зоны г. Усоля-Сибирского и вод р. Ангары проведены исследования в разные по техногенной нагрузке периоды:

- 2010 г. – период с высокой техногенной нагрузкой. В пределах промышленной зоны г. Усоля-Сибирского функционируют градообразующее предприятие – «Усоляхимпром», а также ряд крупных производств химической, фармацевтической, энергетической (ТЭЦ–11) и пищевой отраслей с соответствующими вспомогательными инженерными структурами, городские канализационно-очистные сооружения (КОС);
- 2020 г. – период снижения техногенной нагрузки. Цеха предприятия УХП остановлены, крупные производства промышленной зоны функционируют.

В 2010 и 2020 гг. пробы сточных вод организованных выпусков промышленной зоны г. Усоля-Сибирского отобраны из коллекторных сбросов предприятия УХП (выпуск 1 (точка отбора В1) и выпуск 2 (точка отбора В2), дренажной канавы (точка отбора ДК)) и канавы системы гидрозолоудаления от золоотвалных сооружений ТЭЦ-11 (точка отбора ГЗУ) (рис. 1). В 2020 г. дополнительно проведен отбор сточных вод из коллекторного сброса городских канализационно-очистных сооружений (точка отбора ПК). Помимо этого, для инвентаризации сточных вод территории промышленной зоны г. Усоля-Сибирского выполнено рекогносцировочное обследование, позволившее охарактеризовать сточные воды в соответствии с их территориальной принадлежностью. Выявлено, что канава гидрозолоудаления вмещает в себя два смешивающихся водотока: левый (точка отбора С1) и правый (точка отбора С2) (рис. 1). Сточные воды канавы гидрозолоудаления отобраны в месте слияния этих водотоков (точка отбора С3) и ниже по течению вблизи р. Ангары (точка отбора ГЗУ). Ниже точки отбора ГЗУ в канаву гидрозолоудаления впадает малобитный водоток (МВ), который разгружается на склоне оврага и через 20 м поступает в канаву гидрозолоудаления. Для уточнения генезиса сточных вод отобраны образцы воды в надшламмовых водах золоотвалных сооружений ТЭЦ-11 (точка отбора НВ).

Образцы воды р. Ангары в районе промышленной зоны г. Усоля-Сибирского отобраны в 2010 и 2020 гг. на условно фоновом участке (около 10 км выше по течению от промышленной зоны) (точка отбора А1) и на удаленности 50 м ниже от канавы системы гидрозолоудаления (точка отбора А2), 1,5 км (точка отбора А3) и 5 км (точка отбора А4) ниже от всех промышленных сбросов.

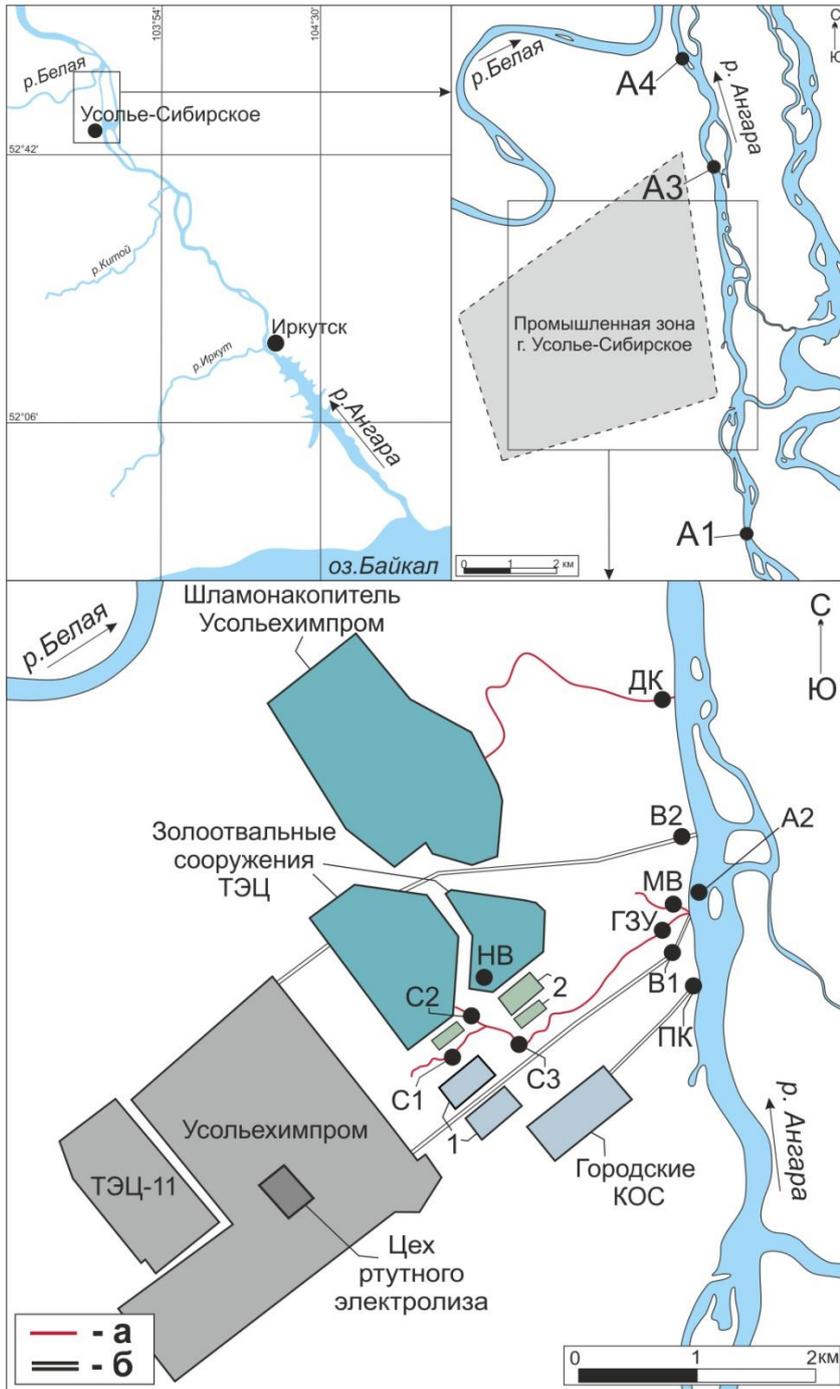


Рис. 1. Карта-схема района работ и точки отбора проб: а) сточные воды, поступающие в р. Ангару по поверхности; б) коллекторные выпуски сточных вод; 1 – канализационно-очистные сооружения Усольехимпром; 2 – станции нейтрализации жидких стоков Усольехимпром; точки отбора: сточные воды: ПК – приемная камера городских стоков, В1, В2, ДК – организованные выпуски Усольехимпром; С1, С2, МВ – водотоки, наполняющие канаву гидрозолоудаления; С3 и ГЗУ – канавы гидрозолоудаления; НВ – надшламовые воды золоотвальных сооружений ТЭЦ-11; р. Ангара: А1 – фоновый участок р. Ангары; А2 – участок р. Ангары на удаленности 50 м от выпуска канавы гидрозолоудаления; А3 – участок на удаленности 1,5 км от всех промышленных выпусков; А4 – участок на удаленности 5 км от всех промышленных выпусков

Fig. 1. Map-counter of study area and location of sampling sites: а) wastewater flowing into the Angara river by the surface; б) collector wastewater effluents; 1 – wastewater treatment facilities of Usoliekhimprom; 2 – liquid effluent neutralization plants of Usoliekhimprom; sampling sites: wastewater: ПК – intake chamber of town effluents; В1, В2, ДК – regulated effluents of Usoliekhimprom; С1, С2, МВ – watercourses filling the ash removal ditch; С3, ГЗУ – ash removal ditch; НВ – ash pond top water of the thermal power plant-11; the Angara river: А1 – background site of the Angara river; А2 – the Angara river site 50 m away from outlet of ash removal ditch; А3 – 1.5 km away from all industrial outlets; А4 – 5 km away from all industrial outlets

Химический анализ образцов и методы экологической оценки загрязнения

Определение концентраций элементов в образцах воды осуществлено в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института Геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия). Концентрации HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ определены по стандартным методикам, принятым для общего гидрохимического анализа: атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная пламенная спектрометрия, спектрофотометрия, потенциометрия, титриметрия. Концентрации 23 микроэлементов (Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sb, Cs, Tl, Pb, U, Ga и Ge) определены методом масс-спектрометрии с индуктивной связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре высокого разрешения с двойной фокусировкой ELEMENT-2. Определение концентраций Hg в воде проведено атомно-абсорбционной спектрометрией на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой РП-91.

Для определения степени воздействия сточных вод на р. Ангару применены однофакторный индекс загрязнения (pollution factor index CF) [12] и индекс нагрузки загрязнения (pollution load index PLI) [13], которые используются для оценки экологического состояния водной среды [14, 15]. Индексы рассчитаны для участков реки на удаленности 50 м, 1,5 и 5 км от промышленных сбросов.

CF используется для учета загрязнения отдельного элемента в каждом образце:

$$CF = \frac{C_i}{C_0},$$

где C_i – тестируемая концентрация элемента; C_0 – концентрация элемента в воде условно фонового участка.

PLI используется для расчета суммарного загрязнения каждого образца:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \cdot CF_2 \cdot \dots \cdot CF_n},$$

где CF – однофакторный индекс загрязнения для определенного элемента. По полученным значениям PLI образцы воды относятся к следующим категориям: $PLI < 0$ – незагрязненные, $0 < PLI \leq 1$ – содержащие базовые уровни загрязняющих веществ, $1 < PLI \leq 10$ – загрязненные, $10 < PLI \leq 100$ – сильно загрязненные, $PLI > 100$ – прогрессивное ухудшение окружающей среды.

Результаты и обсуждение

Сточные воды

Канализационные очистные сооружения
 г. Усолья-Сибирского

Наряду с промышленными сточными водами постоянным источником поступления элементов-загрязнителей в р. Ангару в г. Усолье-Сибирском являются хозяйственно-бытовые сточные воды го-

родских очистных сооружений. После механической и биологической очистки сточные воды накапливаются в приемной камере (ПК), из которой поступают непосредственно в реку по проложенному по ее дну трубопроводу. Воды ПК HCO_3^- – Cl – Ca – Na с самой низкой величиной минерализации (604 мг/л) из всех стоков промышленной зоны характеризуются окислительными условиями ($E_h=228$ мВ) и около-нейтральной реакцией среды ($pH=7,28$).

Микроэлементный состав городских сточных вод КОС не выделяется аномально высокими концентрациями относительно промышленных выпусков (табл. 1). Все концентрации микроэлементов ниже предельно-допустимых значений.

Таблица 1. Концентрации микроэлементов в сточных водах промышленной зоны, мкг/л

Table 1. Trace elements concentrations in wastewater from an industrial zone, $\mu\text{g/l}$

Микроэлементы Trace elements	ПДК/МРС		ПК	С1	С2	С3	МВ
	пв.*	рбх.**					
Li	30	80	11	16	10	14	173
B	500	100	22	342	760	299	244
Al	200	40	9,2	9,3	57,0	4,8	3,0
Ti	100	60	0,204	3,03	12,40	0,57	1,70
V	100	1	0,59	9,70	58,00	6,20	0,45
Cr	50	20	0,71	1,50	3,81	0,67	<ПО
Mn	100	10	5,4	159	225	111	2351
Fe	300	100	26,7	166	419	84	241
Co	100	10	0,08	0,26	0,73	0,32	2,30
Ni	20	10	6,7	9,1	35,0	6,5	26,6
Cu	1000	1	0,7	0,69	3,99	0,90	5,20
Zn	5000	10	9,4	1,7	1,9	7,0	26,8
As	10	50	1,5	22,0	41,1	13,5	136,1
Sr	7000	400	385	1092	514	982	7885
Mo	70	1	0,9	5,4	39,0	6,7	4,2
Cd	1	5	0,01	0,05	0,28	0,06	3,98
Sb	0,5	-	0,17	0,50	0,65	0,28	-
Cs	-	1000	0,121	0,006	0,017	0,011	0,778
Tl	0,1	-	0,002	0,008	0,007	0,008	3,264
Pb	10	6	0,15	2,34	1,55	3,44	39,29
U	15	-	0,68	1,31	2,11	1,62	16,69
Hg	0,5	0,01	0,006	0,840	2,360	0,131	0,004
Ga	-	-	0,115	0,09	0,44	0,13	4,08
Ge	-	-	0,071	0,45	1,24	0,27	3,91

Примечание: ПК – приемная камера городских КОС, С1 – правый водоток канавы гидрозолаудаления, С2 – левый водоток канавы гидрозолаудаления, С3 – канава гидрозолаудаления в месте слияния С1 и С2, МВ – малодобитный водоток, поступающий в канаву гидрозолаудаления ниже точки отбора ГЗУ; пв.* – предельно допустимая концентрация (ПДК) веществ для водных объектов питьевого значения [16], рбх.** – для водных объектов рыбохозяйственного значения [17].

Notes: ПК – intake chamber of municipal wastewater treatment plants, С1 – right-hand watercourse of the ash removal ditch, С2 – left-hand watercourse of the ash removal ditch, С3 – ash removal ditch at the confluence of С1 and С2, МВ – marginal watercourse, entering the ash removal ditch below the sampling point of ГЗУ (ARD); пв.* – maximum permissible concentration (MPC) of substances for water bodies of drinking significance [16], рбх.** – for water bodies of fishery significance [17].

Коллекторные сбросы предприятия «Усольехимпром» (В1и В2)

В период работы предприятия УХП промышленный коллекторный выпуск 1 осуществлял сброс сточных вод (расход 132384 м³/сут) непосредственно в р. Ангару. Основной вклад в него вносили стоки станции нейтрализации и системы промливневой канализации предприятия [18]. В 2020 г., несмотря на закрытие предприятия, сточные воды выпуска со значительно меньшим расходом поступают через поврежденную трубу выпуска в канаву гидрозолоудаления. Гидрохимические характеристики В1 демонстрируют значительную вариабельность в межгодовом аспекте (рис. 2). В 2010 г. сточные воды Cl–Na с высокой величиной минерализации (16322 мг/л), слабо окислительными условиями (Eh=32 мВ) и слабокислой реакцией среды (pH=6,3). В 2020 г. для сточных вод В1 характерны слабоекислительные условия (Eh=47 мВ) и слабощелочная реакция среды (pH=7,8). Величина минерализации вод В1 (1404 мг/л) снизилась в 11,6 раз, основной ионный состав сменился на Cl–Mg–Na–Ca.

В разные по техногенной нагрузке периоды, наряду с изменением соотношения концентраций

главных ионов в водах В1, происходит трансформация его микроэлементного состава. В 2010 г. сточные воды характеризуются максимальными для всех промышленных выпусков концентрациями Li, B, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Sr, Cd, Sb, Cs, Tl, Pb, Ga и Ge (рис. 3). Сравнение с ПДК, установленными для водных объектов питьевого водоснабжения (ПДКпв) и рыбохозяйственного (ПДКрбх) значения, показало, что концентрации микроэлементов, за исключением Cr, Co, As, Cd, Cs, Pb и U, превышают величины нормативных показателей. В большей степени это относится к Hg (5ПДКпв и 239 ПДКрбх), Mn (2 ПДКпв и 20 ПДКрбх), Al (3 ПДКпв и 15 ПДКрбх), B (3 ПДКпв и 14 ПДКрбх), Mo (7 ПДКрбх), Sb (6 ПДКпв), V (5 ПДКрбх), Cu (4 ПДКрбх) и Ni (2 ПДКпв и 3 ПДКрбх). В период спада техногенной нагрузки (2020 г.) концентрации большинства микроэлементов (рис. 3) ниже уровня ПДК. Вместе с этим выделяются концентрации Mn (5 ПДКпв и 50 ПДКрбх), Sr (6 ПДКрбх), As (1 ПДКпв) и U (увеличение в 17 раз, по сравнению с 2010 г.), которые, напротив, значительно возросли.

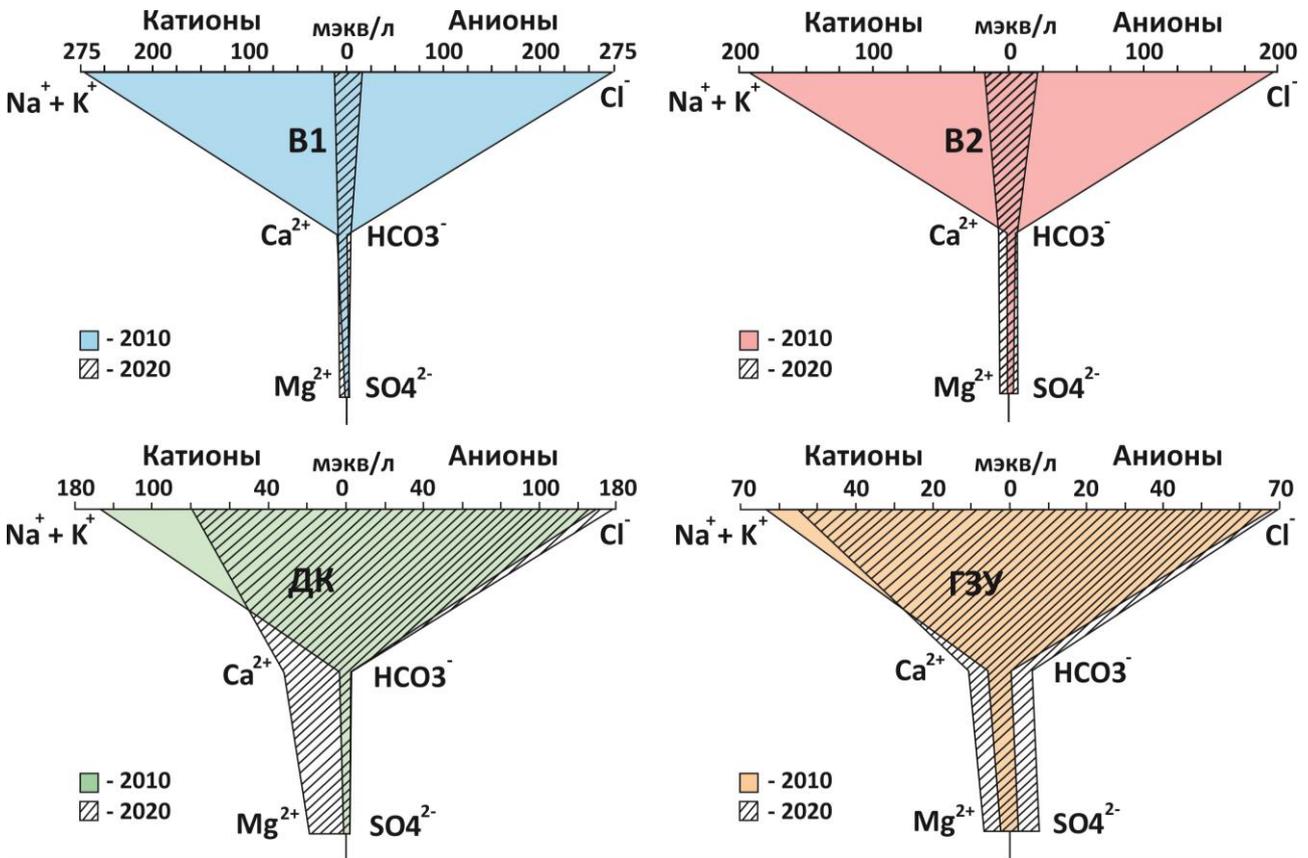


Рис. 2. Диаграммы Стиффа для сточных вод выпуска 1 (В1), выпуска 2 (В2), канавы ГЗУ и дренажной канавы (ДК) в 2010–2020 гг.

Fig. 2. Stiff diagram of the wastewater from effluent 1 (В1), effluent 2 (В2), ash removal ditch (ГЗУ) and drainage ditch (ДК) in 2010–2020

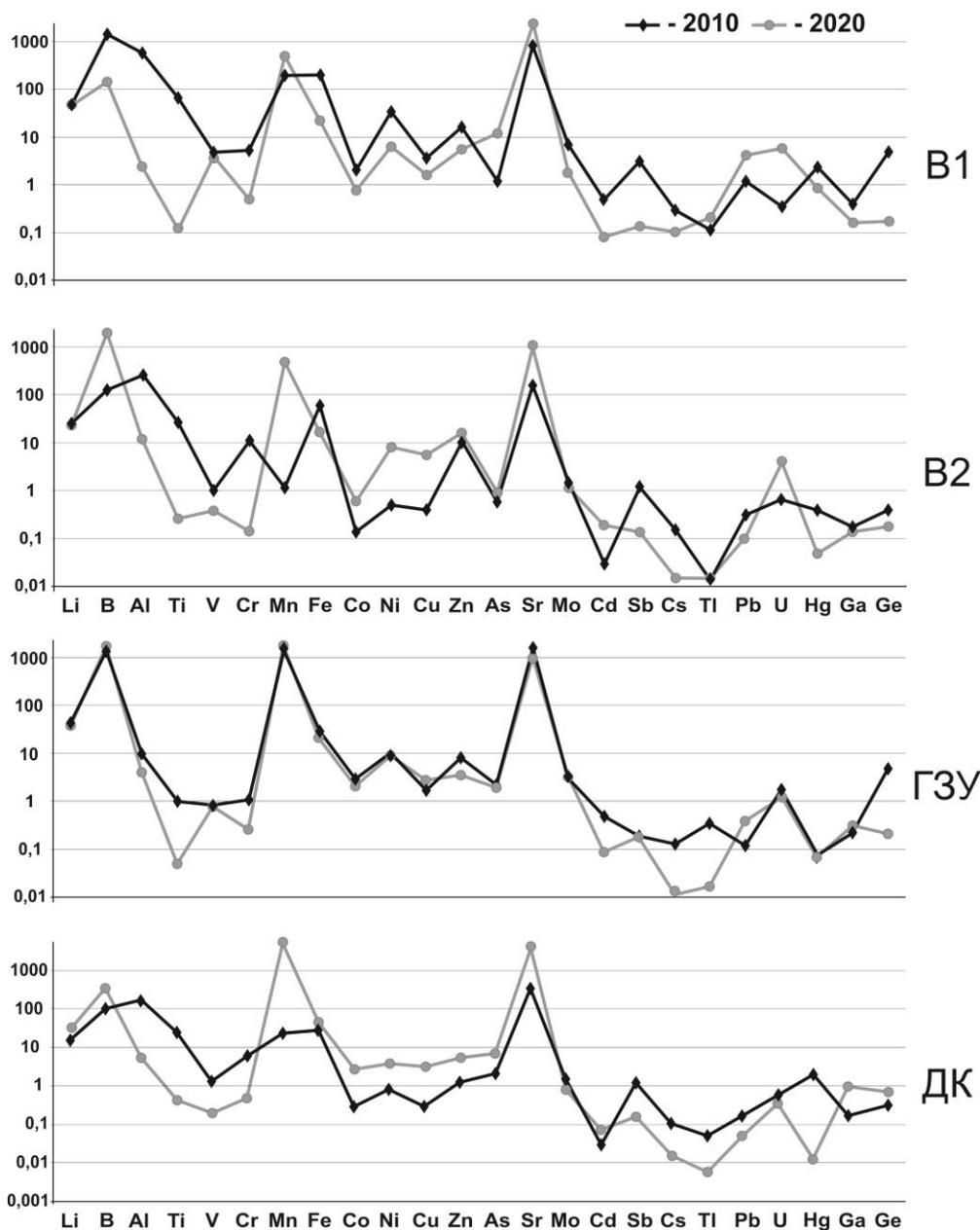


Рис. 3. Динамика концентраций микроэлементов в сточных водах выпуска 1 (B1), выпуска 2 (B2), канавы ГЗУ и ДК в 2010–2020 гг., мкг/л

Fig. 3. Dynamics of trace elements concentrations in wastewater from effluent 1 (B1), effluent 2 (B2), ash removal ditch (ГЗУ) and drainage ditch (ДК) in 2010–2020, µg/l

В 2010 г. в стоках B1 после станции нейтрализации была определена и максимальная для всех промышленных выпусков концентрация основного загрязнителя – Hg, составляющая 2,39 мкг/л (239 ПДКрбх и 5 ПДКпв). Следует отметить, что это значение находится в интервале концентраций (от 0,01 до 9,0 мкг/л), определенных в сточных водах B1 в течение ежемесячного трехлетнего мониторинга 2006–2008 гг. [19]. Высокие концентрации Hg в B1 в 2006–2008 и 2010 гг., несмотря на закрытие цеха ртутного электролиза, отражали специфику производства хлора и его производных методом

электролиза соляного раствора. В процессе электролиза водного раствора поваренной соли для получения газообразного хлора и едкого натра в качестве катода использовалась металлическая Hg. Помимо Hg, сточные воды обогащены Na^+ и Cl^- , а также рядом микроэлементов, в первую очередь, B, Mn, Fe и Al, характерных для подземных вод.

В 2020 г. концентрация Hg в B1 снижается (0,88 мкг/л), но остается повышенной, по сравнению с другими выпусками и ПДК. В работе [18] вариабельность концентраций Hg в сточных водах в период работы предприятия связывали не только

с производственными процессами, активизирующими эмиссию Hg из технологических объектов, но и со смывом соединений Hg поверхностными водами с высокозагрязненной промплощадки и прилегающей к ней территории. Спустя 22 года после остановки цеха ртутного электролиза на промплощадке УХП крупные очаги ртутного загрязнения обусловлены локализацией техногенной ртути под цехом ртутного электролиза, строительными конструкциями зданий, шламами, производственными отходами и т. д. За годы деятельности УХП суммарное поступление Hg в окружающую среду достигло 1327 т, из них 345 т накоплено в грунте под цехом ртутного электролиза, 620 т – в шламонакопителе УХП [20]. Поверхностный слой почв и грунтов (до 25 см) промплощадки УХП и прилегающих территории содержит порядка 24 т Hg [18].

Значительное уменьшение количества растворенных веществ и изменение основного гидрохимического состава В1 в 2020 г., с одной стороны, указывают на спад техногенной нагрузки от закрытого предприятия. С другой стороны, по-прежнему высокие концентрации Hg, V, Cu, Cs, Tl и Pb, а также увеличение концентраций Mn, As, U и Sr определяют вклад загрязненной системы промышленно-ливневой канализации, очагов крупных локализаций элементов техногенного происхождения на территории УХП и поверхностного стока с высокозагрязненных территорий.

Промышленный выпуск 2, как и выпуск 1, – часть организованной коллекторной водоотводной системы предприятия УХП. В период работы предприятия формирование сточных вод выпуска (расход 65904 м³/сут) происходило в основном из осветленных вод шламонакопителя предприятия и стоков системы промышленно-ливневой канализации [18]. В 2010 г. воды В2 Cl–Na с величиной минерализации, составляющей 11926 мг/л, обладают щелочной реакцией среды (рН=8,9) и окислительными условиями (Eh=72 мВ). После закрытия предприятия (2012 г.) сброс сточных вод В2 в р. Ангара прекратился [21], однако в 2020 г. поток со значительно меньшим, по сравнению с 2010 г., расходом воды возобновился. В 2020 г. гидрохимический состав В2 характеризуется также окислительными условиями (Eh=110 мВ) и слабощелочной реакцией среды (рН=8,1). Величина минерализации снизилась в 6 раз (2130 мг/л). Соотношение главных ионов изменилось в сторону уменьшения относительного содержания Cl⁻ и Na⁺ и увеличения HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ и Mg²⁺ (рис. 2).

В 2010 г. микроэлементный состав вод В2 (рис. 3) характеризуется высокими уровнями Hg (40 ПДКрбх), Al (1 ПДКпв и 7 ПДКрбх), Mo (2 ПДКрбх) и Sb (2 ПДКпв). В 2020 г. концентра-

ции Cs, Al, Cr и Ti значительно снижаются, Mn, V, Ni, Cu и Sr, напротив, повышаются до 46 ПДКрбх и 5 ПДКпв для Mn, 20 ПДКрбх и 4 ПДКпв для V, 6 ПДКрбх для Cu, 2 ПДКрбх для Sr. Кроме того, несмотря на отсутствие превышения ПДК, как и в В1, отмечен рост концентрации U (в 6 раз). Концентрация Hg в 2020 г. (0,05 мкг/л) значительно меньше, чем в 2010 г. (0,395 мкг/л), но все еще превышает нормативы. Тенденция, связанная с закрытием цеха ртутного электролиза, к снижению концентраций ртути была выявлена уже в 2000 г. [22]. Вместе с этим определено, что главным фактором, влияющим на содержание токсиканта в сточных водах выпуска, являлся плоскостной смыв ее адсорбированных форм с частицами грунта территории предприятия УХП.

Возобновление поступления сточных вод В2 в р. Ангара в 2020 г. совпало с началом работ по демуеркуризации цеха ртутного электролиза. С целью уменьшения поступления атомарной Hg в атмосферу в ходе демонтажа конструкций цеха была создана водяная завеса, на которую было использовано 900 т воды. Таким образом, появление стока выпуска 2 в 2020 г. может быть связано с излишками воды, поступившими в коллекторную сеть предприятия во время проведения работ по ликвидации накопленного экологического ущерба. Повышение концентраций Hg в водах, используемых для завесы, в большей степени, определяется поступлением токсиканта из высокозагрязненной коллекторной сети предприятия. Изучение отложений коллекторной сети УХП определило их как потенциальный источник поступления Hg [19]. Установлено, что в пробах отложений коллекторной сети доля нерастворимого HgS в среднем составляет 30 %, а 70 % техногенной Hg способны переходить в водный раствор.

Дренажная канава (ДК)

На территории промышленной зоны г. Усолье-Сибирское расположен крупный шламонакопитель УХП площадью около 130 га. Спроектированное для хлорно-щелочного комбината сооружение было предназначено для хранения и отстаивания шлама и жидких отходов производства, в том числе для отделения и очистки рассола и станции нейтрализации. В период работы УХП дренажная канава (длина около 2000 м) использовалась для отвода излишков воды из шламонакопителя. По данным [23] в период интенсивной работы предприятия (2006–2008 гг.) основной ионный состав ее вод был HCO₃-Cl-Na или HCO₃-Na с высоким содержанием Ca²⁺. Минерализация изменялась от 2082 до 7921 мг/л. Такой состав сточных вод отражал технологические особенности предприятия, а также состав и свойства отходов шламонакопителя.

В 2010 г. основной ионный состав вод дренажной канавы Cl–Na с минерализацией 7858 мг/л. Относительное содержание HCO_3^- уменьшилось, доминирующим стал Cl. Поступление сточных вод от шламонакопителя практически прекратилось в 2013 г. В 2020 г. дренажная канава представляет собой временный водоток, наполняемость которого обеспечивается поверхностным стоком с прилегающей территории и зависит от дождевых осадков и талых вод в период снеготаяния. Величина минерализации в водах ДК после закрытия предприятия, в отличие от В1 и В2, осталась в прежних пределах (7885 мг/л). Сточные воды ДК характеризуются окислительными условиями ($E_h=165$ мВ) и околонейтральной реакцией среды ($pH=7,31$). Трансформация основного ионного состава вод выражена в смене на Cl–Ca–Na с увеличением относительного содержания Ca^{2+} и Mg^{2+} (рис. 2).

Особенностью микроэлементного состава вод ДК в 2010 г. были максимальные, относительно всех стоков промышленной зоны (рис. 3), концентрации As (2,1 мкг/л), который, так же как Hg, относится к элементам первого класса опасности. Также в высоких пределах находятся концентрации Hg (4 ПДК_{пв} и 199 ПДК_{рбх}), Al (4 ПДК_{рбх}), Mn (2 ПДК_{рбх}), Mo (2 ПДК_{рбх}), Sb (2ПДК_{пв}), V (1 ПДК_{рбх}) и В (1 ПДК). За период работы цеха ртутного электролиза в шламонакопитель поступило более 620 т ртути [24]. Дренажные стоки высокозагрязненных отходов предприятия определяло и высокие концентрации этого токсиканта в сточных водах ДК: в 2006–2008 гг. (до 1,1 мкг/л) [22] и в 2010 г. (1,99 мкг/л). В 2020 г. концентрация Hg значительно снизилась, что отражает уменьшение техногенной нагрузки. Из других рассматриваемых микроэлементов в этот период в стоках ДК определено снижение концентраций Ti, Al и Cr и, напротив, увеличение Mn (51 ПДК_{пв} и 505 ПДК_{рбх}), Sr (9 ПДК_{рбх}), В (4 ПДК_{рбх}), Cu (3 ПДК_{рбх}), Co, Ga, Ni, Zn, As, и Ge (рис. 3). Отметим, что такая динамика для Hg, Ti, Al, Cr и Mn характерна для всех стоков УХП. Механизм формирования сточных вод ДК в 2020 г. определяет влияние поверхностного стока на состав ее вод. Водные массы, поступающие в дренажную канаву в период снеготаяния или в период дождевых осадков, обогащаются растворенными веществами за счет их выщелачивания из почво-грунтов техногенной территории. Еще одним важным фактором, влияющим на повышение концентраций элементов в наполняющих дренажную канаву водах, является их взаимодействие с высокозагрязненными отложениями (наилками) водотока, в которых за время работы предприятия накоплено значительное количество загрязняющих веществ.

Канава гидрозолоудаления (ГЗУ)

Канава ГЗУ на территории промышленной зоны г. Усоля-Сибирского является частью ирригационной производственной системы ТЭЦ-11, которая в качестве ресурсного обеспечения использует твердое угольное топливо. Образовавшаяся в процессе сжигания топлива минеральная составляющая переходит в аэрозольную и шлаковую фазы в определенных соотношениях [25]. Дымовые газы, содержащие летучую мелкодисперсную золу, обеспечивают аэроперенос техногенных элементов, состав и свойства которых зависят от характеристик угля, условий сжигания и используемой технологии [26].

Атмосферный перенос пылевых частиц как с зольными компонентами при сжигании топлива, так и при естественном пылении золоотвальных сооружений приводит к аккумуляции веществ антропогенного происхождения в различных компонентах природной среды: снеге, почве, поверхностных и подземных водах района размещения техногенных объектов [27, 28]. Поступление в атмосферу с зольными компонентами в процессе сжигания топлива ТЭЦ-11 и последующее осаждение V, Hg, As и U и их соединений в снеговой покров обсуждается в работе [29]. Жидкая (шлаковая) фаза ТЭЦ-11 представлена шлако-зольной пульпой, транспортируемой на два золоотвальных сооружения – специально оборудованные котлованы для хранения и фильтрации отходов. Состав надшламовых вод (НВ), который, как известно [30], зависит от исходного состава золошлаковых отложений, характеризуется SO_4 –Ca составом с величиной минерализации 1033 мг/л.

Концентрации большинства микроэлементов в НВ (табл. 2) выше, чем в сточных водах, поступающих в р. Ангара. В большей степени это относится к В, V, Cr, Mo, Cd, Ga и Ge. Источником высоких концентраций ряда элементов в НВ золоотвальных сооружений ТЭЦ-11 являются минеральные зольные компоненты бурых углей Азейского и Мугунского месторождений Восточной Сибири. Зола Мугунских углей характеризуется высоким содержанием Mn, Pb, Ni, V, Cr и As [31], Азейских углей, в свою очередь, обладает высоким содержанием ряда элементов-примесей, в том числе В и Mo [32]. Об обогащении Восточносибирских углей радиоактивными элементами, в частности U, известно из работ [33, 34]. Из выделенных элементов при сжигании топлива As и Pb преимущественно концентрируются в газообразной фазе [35–37]. V и Mn, напротив, поступают в шлаковую фазу, концентрируясь в толще шламового материала в золоотвальных сооружениях [35, 38].

Таблица 2. Концентрации микроэлементов в надшламовых водах золоотвала ТЭЦ-11, мкг/л

Table 2. Trace elements concentrations in the ash pond top water of the thermal power plant-11, µg/l

Элемент Element	Li	B	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Концентрация Concentration	181	5081	137	2,3	36	44	56	50	0,337	4,6	2,2	1,8
Элемент Element	As	Sr	Mo	Cd	Sb	Cs	Tl	Pb	U	Hg	Ga	Ge
Концентрация Concentration	6,6	2712	390	2,9	5,1	0,215	0,018	1,4	3,057	0,013	2,7	3,9

В 2010 г. (до перехода золоотвальных сооружений ТЭЦ-11 на замкнутый цикл водоснабжения) прошедшая через фильтрационные колодцы золоотвала вода по трубопроводу поступала в канаву гидрозолоудаления, затем в р. Ангару. Достигая места сброса в реку сточные воды ГЗУ обладали окислительными условиями ($E_h=221$ мВ), кислотной реакцией среды ($pH=3,7$) и имели Cl–Na состав с величиной минерализации 4119 мг/л (рис. 2). Микроэлементный состав вод ГЗУ в 2010 г. характеризовался высокими концентрациями В, Мп, Ni, Cu, Sr, Мо, Тl, Ge и Hg (рис. 3), из которых наибольшими превышениями нормативных показателей отличались Мп (146 ПДКрбх и 15 ПДКпв), Hg (8 ПДКрбх), Sr (4 ПДКрбх), Тl (4 ПДКпв) и Мо (3 ПДКрбх).

Сравнение основного гидрохимического состава НВ (SO_4 –Ca) и ГЗУ (Cl–Na) показывает, что по течению сточных вод канавы гидрозолоудаления по территории промплощадки их состав значительно изменяется. Проведенное в 2020 г. обследование территории промышленной зоны обнаружило, что сточные воды канавы сформированы двумя водотоками: левый (С2) выходит на поверхность вблизи золоотвальных сооружений ТЭЦ и протекает между полями нейтрализации промышленных отходов УХП, правый (С1) протекает в понижении рельефа между заброшенным комплексом канализационно-очистных сооружений для отходов УХП и полям нейтрализации (рис. 1). Эти два водотока соединяются в общий поток (С3), течение которого направлено к р. Ангаре.

Воды водотоков, формирующих канаву гидрозолоудаления, обладают различным гидрохимическим составом (рис. 4). Несмотря на близость выхода С2 к золоотвальным сооружениям ТЭЦ, основной ионный состав его вод отличается от состава надшламовых вод. Воды С2 Cl–Na с величиной минерализации 5996 мг/л характеризуются окислительными условиями ($E_h=86$ мВ) и щелочной реакцией среды ($pH=9,12$). Для вод С1 определены восстановительные условия ($E_h= -80$ мВ) и слабощелочная реакция среды ($pH=7,73$). Относительное содержание Cl^- и Na^+ значительно ниже, чем в С2. Основной ионный состав HCO_3^- –Cl–Ca–Na, минерализация составляет 4933 мг/л. При смешении

водотоков (С3) создаются слабовосстановительные условия ($E_h= -17$ мВ) и слабощелочная реакция среды ($pH=7,87$). Гидрохимический состав С3 преобразуется в Cl–Ca–Na с величиной минерализации 2852 мг/л.

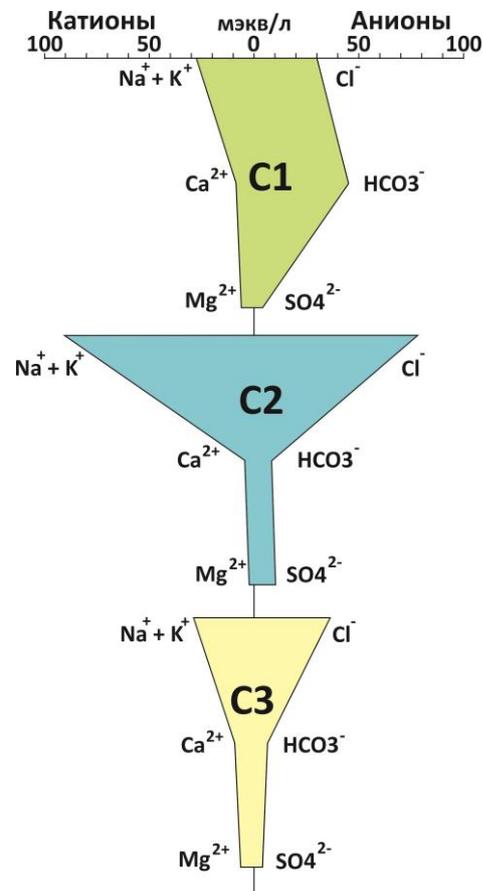


Рис. 4. Диаграмма Стиффа для вод, формирующих канаву гидрозолоудаления

Fig. 4. Stiff diagram of the waters forming the ash removal ditch

Воды С2 отличаются более высокими, чем С1, концентрациями большинства элементов. Несмотря на различия в основном ионном составе, в микроэлементном составе С2 прослеживается взаимосвязь с надшламовыми водами. Так же как в НВ, в нем определены высокие концентрации В, V, Cr,

Mo, Cd, Ga и Ge. Источником микроэлементов для вод С2 являются и поля нейтрализации стоков УХП, дренируя которые они обогащаются элементами, присущими технологическим отходам предприятия. В первую очередь, показателем этого являются высокие концентрации Hg (2,36 мкг/л). В водах С3 концентрации микроэлементов, за исключением Zn и Pb, так же как и компоненты основного ионного состава, уменьшаются относительно формирующих поток водотоков. В большей степени это относится к Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Ge и Hg. Смена окислительно-восстановительных условий может оказывать влияние на поведение этих элементов. Так, например, происходит выпадение гидроксидов железа, марганца, алюминия и других элементов.

Изменение основного ионного состава сточных вод канавы гидрозолаудаления происходит и по мере их течения от точки наблюдений С3 к точке наблюдений ГЗУ, что определяется увеличением концентраций Cl^- , Na^+ и величиной минерализации (от 2852 до 4788 мг/л). В разные по техногенной нагрузке периоды воды ГЗУ $\text{Cl}-\text{Na}$. Вместе с этим по сравнению с 2010 г., в 2020 г. относительное содержание Na^+ , Cl^- в них уменьшается, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} увеличивается (рис. 2).

В межгодовом аспекте в водах ГЗУ отмечается значительное снижение концентраций Ge, Tl, Ti и Cs, и несколько меньшее Cd, Sr и Cr (рис. 3). Обращает на себя внимание значительное увеличение объема сточных вод по мере течения канавы гидрозолаудаления к р. Ангаре. Изменяется и пространственная динамика в составе главных ионов и микроэлементов. Определено, что концентрации большинства микроэлементов перед поступлением сточных вод канавы в р. Ангару как в 2010 г., так и в 2020 г. значительно выше, чем в формирующих ее сток водотоках. Выделенные особенности указывают на существование дополнительных источников формирования стока канавы. Выявить точные источники поступления растворенных веществ в сточные воды канавы гидрозолаудаления от С3 до ГЗУ в настоящее время невозможно в связи с отсутствием публичной информации о водоотводных коллекторных сетях закрытого предприятия УХП. Однако полученные результаты позволяют выделить наиболее вероятные из них.

В первую очередь, это подземные коммуникации заброшенного предприятия, которые, так же как коллекторный выпуск 1, находятся в критическом состоянии. На это указывают полученные данные по концентрациям Cl^- и Na^+ , которые в сточных водах ГЗУ становятся близкими к организованным выпускам предприятия УХП (В1, В2, ДК). Наряду с утечками из коллекторной сети, источником поступления растворенных веществ является поверхностный сток с прилегающей терри-

тории, так как, подобно дренажной канаве, наполняемость канавы гидрозолаудаления обуславливается поступающими в нее водами сезонного характера. Привнесение загрязняющих веществ происходит с дождевыми и талыми водами от комплекса заброшенных очистных сооружений и станций нейтрализации УХП, а также с размывом отложений (наилков) канавы.

Существование третьего источника определено рекогносцировочным исследованием территории промышленной площадки, выявившим поступление в канаву гидрозолаудаления малобитного водотока (МВ), просачивающегося из-под земли. Воды МВ обладают самой высокой величиной минерализации (59783 мг/л) из всех опробованных сточных вод, слабавосстановительными условиями ($E_h = -34$ мВ) и имеют, так же как все выпуски промышленной зоны, $\text{Cl}-\text{Na}$ состав вод. Гидрохимический состав МВ выделяется высокими и колоссально высокими концентрациями как главных ионов, так и микроэлементов, превышающими ПДК (табл. 1). Вместе с этим концентрации Cl^- (38600 мг/л) и Na^+ (18750 мг/л) в водах МВ близки к их концентрациям (37396 и 22260 мг/л, соответственно [23]) в воде, отобранной из скважины Бродовича (глубина 190 м), находящейся в г. Усоля-Сибирском в 100 м от уреза воды р. Ангары. Ранее определено, что на участках расположения техногенных объектов УХП (шламонакопителей, полигонов хранения токсичных отходов, трубопроводов и т. д.) химический состав природных подземных вод верхней гидродинамической зоны кардинально изменен [39]. В естественном состоянии грунтовые воды до участка промплощадки имеют $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ состав, а в районе расположения объектов предприятия выделено 15 гидрохимических типов вод ($\text{HCO}_3-\text{Cl}-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Na}$, $\text{Cl}-\text{Na}$, $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{Ca}$ и т. д.). Вышесказанное позволяет предположить, что в канаву гидрозолаудаления на всем ее протяжении происходит подток грунтовых вод, разгрузка которых происходит в виде малобитных рассредоточенных выходов. На это указывают и восстановительные условия, определенные в воде канавы.

Воды р. Ангары

Условно фоновый участок: 10 км выше промышленной зоны г. Усоля-Сибирского (А1)

На формирование гидрохимического состава р. Ангары большое влияние оказывает оз. Байкал, которое является крупнейшим природным резервуаром чистой пресной воды (минерализация ~96 мг/л [40]). В воде истока реки минерализация и концентрации главных ионов сопоставимы с этими показателями в воде озера [41]. За счет влияния природных (литология, притоки) [42] и антропо-

генных факторов в 10 км выше промышленной зоны г. Усолья-Сибирского (160 км ниже истока р. Ангары) минерализация увеличивается, составляя 119 мг/л (2010 г.) и 125 мг/л (2020 г.). Это связано с повышением концентраций HCO_3^- (от 60,8 мг/л в воде истока реки [43] до 78 мг/л в воде А1), Ca^{2+} (от 15,2 до 20 мг/л, соответственно), SO_4^{2-} (от 5,7 до 10 мг/л, соответственно), Cl^- (от 0,6 до 5,6 мг/л, соответственно). По гидрохимическому составу р. Ангара в истоке и на условно фоновом участке, как и оз. Байкал, HCO_3^- -Ca.

Так же как основной ионный состав, микроэлементный состав вод истока р. Ангары слабо отличается от вод оз. Байкал [44]. По сравнению с исто-

ком реки, в воде условно фоновом участка концентрации Al, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Tl и Ga повышены, Zn, Pb и Ge, напротив, ниже (рис. 5). Zn в истоке реки характеризуется повышенным содержанием, наследуя геохимические особенности бассейна оз. Байкал, в частности, его поступление с эоловым переносом с западного побережья озера, коренные породы и почвы которого обогащены элементом [45]. В 2010 и 2020 гг. в воде А1 концентрации Li, B, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sb, Cs, Pb, U, Hg и Ge сопоставимы между собой (рис. 5). Наибольшие различия определены для концентраций Al, Ti, Fe и Ga, которые в 2010 г. выше, чем в 2020 г., концентрации Tl, напротив, ниже.

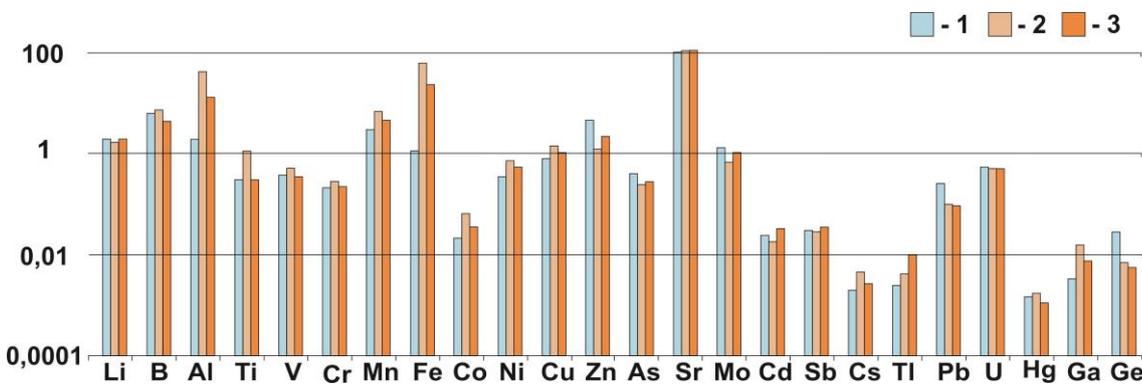


Рис. 5. Концентрации микроэлементов в воде р. Ангары, мкг/л: исток (1), фоновый участок 2010 г. (2) и 2020 г. (3)
 Fig. 5. Trace elements concentrations in Angara river water, µg/l: source (1), background site 2010 (2) and 2020 (3)

Таблица 3. Группы микроэлементов в сточных водах, сформированные по однофакторному индексу загрязнения (CFcm.в.)
 Table 3. Groups of trace elements in wastewater formed by the one-factor pollution index (CFcm.в.)

Сточные воды Wastewater	CFст.в. CFст.в.	2010	2020
Выпуск 1 Effluent 1	>1000	Hg	-
	100-1000	Ge, B, Sb	Hg, Mn
	50-99	Cs, Ti	-
	10-49	Ni, Li, Co, Mn, Tl, Cd, Ga, Cr, Al, Zn, Pb	Pb, As, Cs, B, Ge, Li, Co, Ga, Sr, Tl, U, V, Ni
2-9	V, Sr, As, Cu, Fe	Sb, Zn, Cr, Cu, Mo, Cd	
Выпуск 2 Effluent 2	>1000	-	B, Mn
	100-1000	Hg	-
	50-99	Ge	-
	10-49	Sb, Cr, Cs, Ti, B, Li, Ga	Hg, Ge, Ga, Co, Ni, Li
2-9	Zn, Al, Tl, Pb, V, Co, As, Mo, Cd	Sr, U, Zn, Cd, Cs, Cu, Sb, As	
Дренажная канава Drainage ditch	>1000	Hg	Mn
	100-1000	-	Ge, Ga,
	50-99	-	B, Co
	10-49	Sb, Ge, Cs, Ti, Cr, B, Tl, Ga	Sr, As, Li, Hg
2-9	As, Al, Co, Mn, Sr, V, Mo, Cd, Pb	Ni, Cs, Sb, Cu, Cr, Fe, Zn, Cd	
Канавы ГЗУ Ash removal ditch	>1000	-	-
	100-1000	Ge, Mn, B	B, Mn
	50-99	Tl	Hg, Co
	10-49	Hg, Co, Li, Cs, Cd, Ga, Ni, Sr	Ga, Ge, Li, Ni
2-9	As, Zn, Mo, Sb, Cr, U, V	Sr, As, Sb, Cs, Pb, U, Cu, Mo, Cd, V, Zn, Tl	
Приемная камера Intake chamber	>1000	-	-
	100-1000	-	-
	50-99	н/д	-
	10-49	-	Cs, Ga, Ge, Ni
2-9	-	Li, B, As, Sb, Hg, Zn, Sr, Cr, V, Co, Pb	

Примечание: жирным выделены микроэлементы, CFст.в. которых превышает 100.
 Notes: trace elements with CFcm.в. exceeding 100 are marked in bold.

Для оценки вклада каждого микроэлемента, поступающего со стоками промышленной зоны, в загрязнение р. Ангары использован однофакторный индекс загрязнения (СФст.в), рассчитанный через нормирование концентраций микроэлементов в сточных водах к их концентрациям в воде условно фонового участка (табл. 3). Элементы, СФст.в. которых превышает значение 100 и более, отнесены к приоритетным элементам-загрязнителям.

Как и ожидалось, в 2010 г. во всех сточных водах еще работающего предприятия УХП к таким элементам относится Hg (табл. 3). В 2020 г. СФст.в. Hg в В2 и ДК значительно уменьшается, составляя 45 и 12, соответственно. В В1 СФст.в. Hg остается высоким (800), а в ГЗУ переходит в категорию выше, чем в 2010 г. Рассчитанные значения СФст.в. показывают, что в 2010 г. в сточных водах всей промышленной зоны, помимо Hg, к приоритетным элементам-загрязнителям р. Ангары относятся Ge и В, частично – Sb и Mn. В 2020 г. возрастает вклад в загрязнение реки Mn (В1, В2, ДК, ГЗУ), а также В (В2, ГЗУ), Ga и Ge (ДК). Наименьший для всех микроэлементов СФст.в. (не превышающий 49) определен для сточных вод ПК. Однако, так же как для других выпусков, выделяются Ga и Ge, для которых определен самый высокий СФст.в.

Участок в 50 м ниже сбросов сточных вод (A2)

Во все периоды исследования наиболее значимая трансформация гидрохимического состава р. Ангары определена на близком к впадению промышленных сбросов участке. Поступление сточных вод изменяет $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ состав вод реки и увеличивает их минерализацию. В 2010 г. воды A2 Cl-Na с минерализацией 1280 мг/л. В 2020 г., за счет значительного снижения относительного содержания Cl^- и Na^+ (рис. 6), состав вод $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na-Ca}$ с минерализацией 147 мг/л.

В 2010 г. на этом участке концентрации большинства изучаемых микроэлементов выше фоновых значений. Наиболее значимые превышения определены для Hg, Ge и В (рис. 7), СФст.в. которых превышает 100. Концентрации В, Al, Mn, Cu и Mo находятся в пределах от 1 до 3 ПДКрбх, для Hg составляют 24 ПДКрбх. В 2020 г. концентрации микроэлементов, за исключением Tl, в воде A2 значительно уменьшаются относительно величин 2010 г. (рис. 7). Такая тенденция отражает снижение количества растворенных веществ в промышленных стоках (рис. 3, табл. 3) и объема поступающих в р. Ангару сточных вод. Превышения установленных нормативов все еще обнаруживаются для Mn (2 ПДКрбх), Cu (1 ПДКрбх) и Mo (1 ПДКрбх).

Качество вод р. Ангары определено с помощью СФ, рассчитанного через нормирование concentra-

ций микроэлементов в водах участка A2, а также A3 и A4, к их концентрациям в воде условно фонового участка (A1) (табл. 4). По классификации, предложенной [12] для оценки экологического состояния водной среды, СФ выше 6, определенный в 2010 г. для Hg, Ge, В, Cs и Sb, позволяет отнести воды участка A2 к категории очень высокого загрязнения. Воды A2 по концентрациям большинства микроэлементов умеренного (от 1 до 3) и значительного (от 3 до 6) загрязнений, низкого загрязнения – только по Fe и Cu. В 2020 г. показатели качества вод р. Ангары на близком к месту сбросов участке улучшаются: полученные значения СФ классифицируют воды как умеренно загрязненные и низко загрязненные (табл. 4). Исключением является СФ для Tl, который демонстрирует смену уровня загрязнения со значительного на очень высокий. Для Hg во все периоды определено очень высокое загрязнение вод, для Mn – значительное.

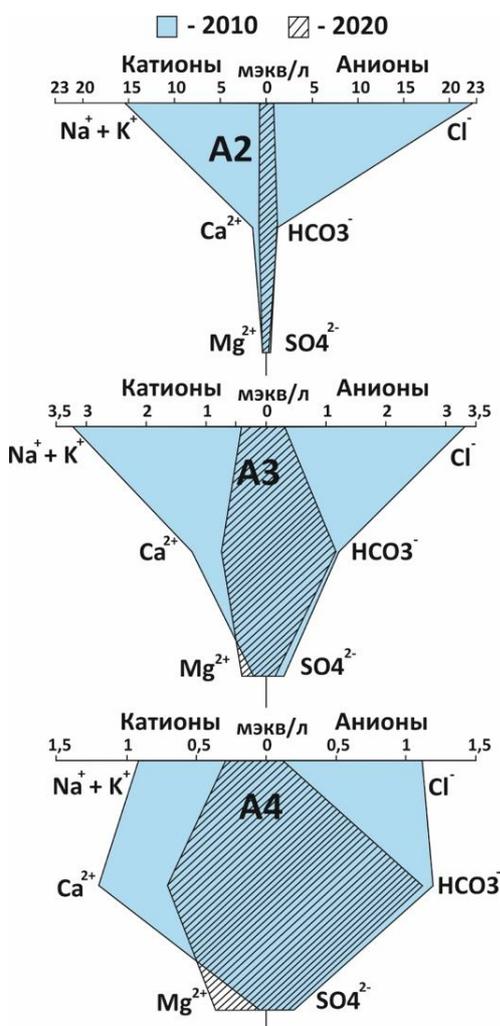


Рис. 6. Диаграмма Стиффа для вод реки Ангары в точках A2, A3 и A4

Fig. 6. Stiff diagram of the Angara river waters at points A2, A3 and A4

Таблица 4. CF микроэлементов в воде р. Ангары

Table 4. CF of trace elements in Angara river water

Водный участок р. Ангары The Angara river water site	CF значение* CF value*	Микроэлементы (2010) Trace elements (2010)	Микроэлементы (2020) Trace elements (2020)
50 м от выпуска канавы гидрозолоудаления (A2) 50 m away from outlet of ash removal ditch (A2)	CF<1	Fe, Cu	Zn, Mo, Cd, Pb, U
	1≤CF≤3	Al, V, Cr, As, Sr, Mo, Pb, U	Li, B, Al, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Sr, Sb, Cs
	3≤CF≤6	Li, Ti, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, Cd, Tl	Mn
	6≤CF	B, Ge, Sb, Cs, Hg	Tl, Hg
1,5 км от всех сбросов сточных вод (A3) 1.5 km away from all industrial outlets (A3)	CF<1	Mo, As, U	Zn, Mo, Cd, Tl, U, Hg
	1≤CF≤3	Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Sr, Cd, Sb, Cs, Tl, Pb	Li, B, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ge, As, Sr, Sb, Pb
	3≤CF≤6	–	Co, Ga, Cs
	6≤CF	Hg	Al, Ti, Fe
5 км от всех сбросов сточных вод (A4) 5 km away from all industrial outlets (A4)	CF<1	Mo, U	Li, B, Mo, U, Hg
	1≤CF≤3	Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Sr, Cd, Sb, Cs, Tl, Hg	V, Cu, Zn, Ge, As, Sr, Cd, Sb
	3≤CF≤6	Pb	Cr, Mn, Ni, Pb
	6≤CF	–	Al, Ti, Fe, Co, Ga, Cs, Tl

Примечание: категории качества вод в соответствии с [12]: CF<1 – низкое загрязнение, 1≤CF≤3 – умеренное загрязнение, 3≤CF≤6 – значительное загрязнение, 6≤CF – очень высокое загрязнение.

Notes: water quality categories according to [12]: CF<1 – low contamination, 1≤CF≤3 – moderate contamination, 3≤CF≤6 – significant contamination, 6≤CF – very high contamination.

Участки в 1,5 и 5 км ниже сбросов сточных вод (A3 и A4)

В 2010 г. воды A3 и A4 характеризовались HCO₃–Cl–Ca–Na и Cl–HCO₃–Na–Ca составом, соответственно, с повышенными относительного Al величинами минерализации (309 и 169 мг/л, соответственно). В 2020 г. количество растворенных веществ в водах A3 (121 мг/л) и A4 (107 мг/л) ниже, основной ионный состав изменился на HCO₃–Mg–Ca (рис. 6).

В период с высокой техногенной нагрузкой (2010 г.) в воде A3 концентрации Hg составляют 3 ПДКрбх, Al – 2 ПДКрбх, Cu – 2 ПДКрбх, Mn – 1 ПДКрбх и Fe – 1 ПДКрбх, в воде A4 – Al (3 ПДКрбх), Mn (2 ПДКрбх), Cu (2 ПДКрбх) и Fe (2 ПДКрбх). По мере удаления речных вод от техногенных источников только концентрации Mo в воде A4 достигают фоновых значений. Содержание Li, V, Ti, Ni, Ga, Mo, Cs, Tl и Hg характеризуется закономерным последовательным уменьшением по течению реки (рис. 7), что обуславливается, в первую очередь, сильным разбавлением сточных вод большим объемом низкоминерализованных вод р. Ангары. Одновременно выведению из водной среды потенциально токсичных элементов способствуют процессы их сорбции взвешенными частицами. Как было определено ранее для процессов перераспределения техногенной ртути [19], часть поступающей в составе сточных вод взвеси выводится из водной среды в результате осаждения на ближних к источнику загрязнения участках реки. В пространственном распределении концентраций элементов выделяются Pb и Fe, для которых,

напротив, характерно постепенное увеличение содержания по мере удаления вод от источников загрязнения, а также Mn, Co, Zn, Cd и Sb, которые, снижаясь в воде A3, далее повышаются в воде A4.

В 2020 г. превышения нормативов определены в воде A3 и A4 для Al (2 и 4 ПДКрбх, соответственно), Fe (2 и 3 ПДКрбх, соответственно), Mn (1 и 3 ПДКрбх, соответственно), Cu (1 и 3 ПДКрбх, соответственно), в A4 – Tl (5 ПДКрбх). Результаты исследования этого периода не повторяют выделенных в 2010 г. трендов. Основной особенностью 2020 г. является уменьшение концентрации основного элемента-загрязнителя промышленной зоны – Hg – в A3 и A4 до фоновых значений и соответствия ПДК. Концентрации As и U близки между собой на всех станциях наблюдений. Наиболее высокие, по сравнению с A2 и A3, концентрации Al, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Cs и Pb зафиксированы в воде A4, концентрации Mn, Cd, Sb и Tl, уменьшаясь в воде A3, по сравнению с A2, вновь увеличиваются в A4 (рис. 7). С одной стороны, выделенное пространственное распределение микроэлементов в воде р. Ангары в период снижения техногенной нагрузки может определять накопленный за годы интенсивной работы предприятия экологический вред. В частности, аккумуляцию элементов техногенного происхождения в береговых донных отложениях и их вторичное поступление в водную среду. Одним из факторов, провоцирующих взмучивание загрязненных осадков и высвобождение элементов из депонирующей среды в водную, является изменение уровня режима водоема в межсезонном и межгодовом аспектах. С другой стороны,

можно предположить наличие еще одного источника, влияющего на увеличение концентраций микроэлементов: подземные воды, поступающие по зонам повышенной трещиноватости в долине

реки. Повышение хлорид-ионов и ионов натрия, основных показателей рассолов, в водной среде участка реки в 5 км ниже сточных вод определено как в настоящем исследовании, так и ранее [46].

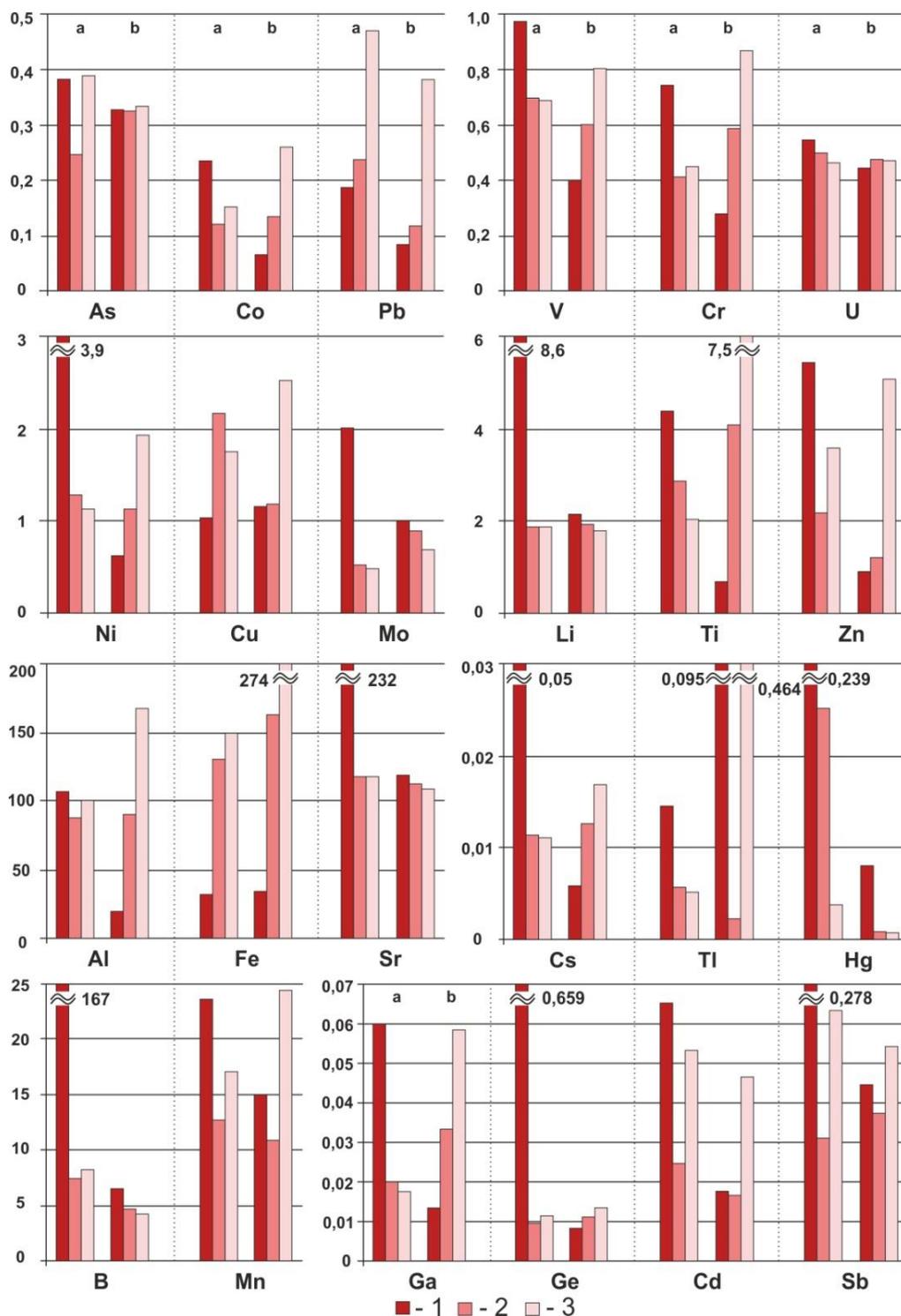


Рис. 7. Концентрации микроэлементов в воде р. Ангары (мкг/л) на участках в 50 м ниже выпуска канавы гидрозолоудаления (1), 1,5 км (2) и 5 км (3) ниже всех выпусков промышленной зоны г. Усолья-Сибирского. а - 2010 г., б - 2020 г.

Fig. 7. Trace element concentrations in the Angara river water (µg/l) at sites 50 m below outlet of ash removal ditch (1), 1.5 km (2) and 5 km (3) below the discharge of the Usole-Sibirskoe industrial zone. a - 2010, b - 2020

В 2010 г. показатель CF на участках А3 и А4 по большинству микроэлементов определяет умеренный уровень загрязнения (табл. 4). Исключением является CF для Hg в воде А3 и для Pb в воде А4, определяющий очень высокое и значительное загрязнение, соответственно. Качество вод в 2020 г. на этих участках р. Ангары ухудшилось (табл. 4). В водах А3 уровень загрязнения Co, Ga, Cs сменился с умеренного на значительный, Al, Fe и Ti – с умеренного на очень высокий, в водах А4 – Cr, Mn и Ni с умеренного на значительный, Al, Ti, Fe, Co, Ga, Cs и Tl – с умеренного на очень высокий.

Индекс нагрузки загрязнения PLI, суммирующий моноэлементные показатели качества вод, в 2010 г. составил для А2 – 4,1, А3 – 1,6 и А4 – 1,7, в 2020 г. 1,4, 1,6 и 3,0, соответственно. Сравнение качественных характеристик воды р. Ангары на разных мониторинговых участках по полученным значениям PLI показывает, что во все периоды исследований воды р. Ангары «загрязненные».

Заключение

Изучение химического состава сточных вод промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского в разные по техногенной нагрузке периоды показало, что, несмотря на остановку предприятия УХП, в р. Ангару по-прежнему поступают сточные воды, содержащие значительное количество элементов техногенного происхождения. Cl–Na состав организованных выпусков предприятия УХП (В1, В2, ДК) в период с высокой техногенной нагрузкой (2010 г.) полностью отражал специфику действующего производства. В период снижения техногенной нагрузки (2020 г.) в В1 и В2 значительно уменьшается величина минерализации, основной ионный состав изменяется на Cl–Mg–Na–Ca и Cl–Ca–Na. При изменении основного ионного состава ДК на Cl–Ca–Na величина минерализации (7885 мг/л) ее сточных вод остается высокой. Несмотря на то, что канава гидрозолоудаления является производственным объектом ТЭЦ-11, состав надшламовых вод которой SO₄–Ca, гидрохимический состав сточных вод ГЗУ перед поступлением в р. Ангару Cl–Na. Трансформацию химического состава сточных вод по мере течения определяют формирующие ее сток водные потоки.

Наибольшим изменениям в сточных водах подвержены концентрации приоритетного элемента-

загрязнителя территории исследования – Hg, динамика снижения которого в сточных водах, безусловно, является показателем снижения уровня техногенной нагрузки на окружающую среду от предприятия УХП. Однако временной тренд концентраций других микроэлементов в сточных водах не указывает на значительное улучшение экологической ситуации: установлено увеличение концентрации Mn, V, Ge и Ga. В связи с этим говорить об устойчивой тенденции к прекращению и (или) уменьшению поступления элементов техногенного генезиса в окружающую среду преждевременно. На гидрохимический состав сточных вод, поступающих в р. Ангару, значительно влияют инфраструктура и инженерные коммуникации УХП, которые находятся в катастрофическом состоянии: практически все производственные объекты заброшены и полуразрушены, водоотводные системы промплощадки не демонтированы. В условиях закрытия предприятия наиболее значимым фактором, негативно влияющим на экологическую ситуацию р. Ангары, становится поступление поверхностного стока с высокозагрязненных территорий как непосредственно в реку, так и через коллекторную сеть промплощадки.

В период снижения техногенной нагрузки поступление сточных вод и большие объемы накопленных за годы работы предприятия УХП техногенных отходов продолжают оказывать влияние на гидрохимический состав р. Ангары. По результатам исследования установлено, что воды р. Ангары в районе промышленной зоны сохраняют статус загрязненных. Кроме того, наблюдается ухудшение качественных характеристик на удаленных от сбросов сточных вод участках, создавая потенциальную угрозу для всей водной экосистемы. В настоящее время изучение биогеохимических циклов загрязняющих веществ природно-техногенной системы (промышленная зона – р. Ангара) становится важным для установления объективной оценки и прогноза вектора преобразования экологической ситуации. Проведенное исследование, как ожидается, внесет вклад в политику природопользования Иркутской области при проведении мероприятий по ликвидации накопленного экологического ущерба на территории промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mokarram M., Saber A., Sheykhi V. Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 227. – 123380. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123380> (дата обращения 03.07.2023).
2. China's industrial gray water footprint assessment and implications for investment in industrial wastewater treatment / Y. Huang, Z. Beihai, H. Ruru, L. Xiaohui, L. Shuo, L. Nan // *Environmental science and pollution research*. – 2019. – Vol. 27. – P. 7188–7198. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07405-y> (дата обращения 03.07.2023).
3. Hydrochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area / Y. Gao, H. Quin, W. Ren, H. Wang, F. Liu, F. Yang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 260. – 121006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121006> (дата обращения 03.07.2023).

4. Okereke J.N., Ogidi O.I., Obasi K.O. Environmental and health impact of industrial wastewater effluents in Nigeria – a review // *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*. – 2016. – Vol. 3. – № 6. – P. 55–67.
5. Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review / M. Ilyas, W. Ahmad, H. Khan, S. Yousaf, M. Yasir, A. Khan // *Reviews on Environmental Health*. – 2019. – Vol. 34. – № 2. – P. 171–186. URL: <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0078> (дата обращения 03.07.2023).
6. Physico-chemical analysis of industrial wastewater pollution from Kigali special economic zone (KSEZ) and the potential impacts in the downstream regions of Kigali City in Rwanda / B. Manirakiza, L.A. Gbadegesin, E.S. Okeke, R. Bagaragaza, G.A. Felix // *Sustainable Water Resources Management*. – 2022. – Vol. 8 – № 95. URL: <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00693-2> (дата обращения 03.07.2023).
7. Exposure to wastewater effluent disrupts hypoxia responses in killifish (*Fundulus heteroclitus*) / S.C. Lau, H. Mehdi, L.M. Bragg, M.R., Servos S. Balshine, G.R. Scott // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 284. – 117373. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117373> (дата обращения 03.07.2023).
8. Impacts of wastewater treatment plants on benthic macroinvertebrate communities in summer and winter / C. Aristone, H. Mehdi, J. Hamilton, K.L. Bowen, W.J.S. Currie, K.A. Kidd, S. Balshine // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. 820. – 153224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153224> (дата обращения 03.07.2023).
9. Millar E.N., Surette M.G., Kidd K.A. Altered microbiomes of aquatic macroinvertebrates and riparian spiders downstream of municipal wastewater effluents // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. 809. – 151156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151156> (дата обращения 03.07.2023).
10. Оценка воздействия источника ртутного загрязнения на компоненты природной среды Приангарья / П.В. Коваль, Е.А. Руш, Г.П. Королева, Ю.Н. Удодов, Л.Д. Андрулайтис // *Экологический вестник Северного Кавказа*. – 2006. – Т. 2. – № 1. – С. 60–65.
11. Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsskikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region Russia // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2019. – 321 – 012041. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012041> (дата обращения 03.07.2023).
12. Hakanson L. Ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // *Water Research*. – 1980. – Vol. 14. – № 8. – P. 975–1001.
13. Problem in the assessment of heavy metals level in estuaries and the formation of a pollution index / D.L. Tomlinson, J.G. Wilson, C.R. Harris, D.W. Jeffrey // *Helgolander Meeresunters.* – 1980. – Vol. 33. – P. 566–575.
14. Assessment of metal pollution in surface sediments of coastal Tasaul Lake (Romania) / D. Vasiliu, A. Bucse, N. Lupascu, B. Ispas, C. Gheablaui, I. Stanescu // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2020. – Vol. 192. – 749. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08698-0> (дата обращения 03.07.2023).
15. Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: the role of groundwater discharge / M. Luo, Y. Zhang, H. Li, W. Hu, K. Xiao, S. Yu, C. Zheng, X. Wang // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 807. – 151070. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070> (дата обращения 03.07.2023).
16. СанПин 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28.01.2021 № 2. URL: <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf> (дата обращения 03.07.2023).
17. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» от 13.12.2016 № 552. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения 03.07.2023).
18. Руш Е.А., Хицкий Я.В. Поверхностных сток как основной фактор ртутного загрязнения Ангары // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2003. – № 4. – С. 80–84.
19. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртути в Братском водохранилище / В.И. Алиева, Е.В. Бутаков, М.В. Пастухов, Л.Д. Андрулайтис // *Геоэкология. Инженерная геология, Гидрогеология, Геокриология*. – 2011. – № 5. – С. 431–438.
20. Коваль П.В., Бутаков Е.В., Виноградова Т.П. Ртуть в биогеохимическом цикле Братского водохранилища. Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы: 8 т. / пред. ред. кол. Н.П. Лавров. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – Т. 4. – С. 97–103.
21. Tsvetkova E.A., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Dynamics of mercury concentrations in wastewater from the Usolye–Sibirskoye industrial zone in periods with different technogenic loads // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – № 3. – С. 1346–1348. URL: <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-3-1346> (дата обращения 03.07.2023).
22. Хицкий Я.В. Исследование и разработка технологии локальной очистки ртутьсодержащих вод: авторефер. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2004. – 18 с.
23. Алиева В.И., Пастухов М.В. Гидрохимическая характеристика реки Ангары в районе влияния Усольского промышленного узла // *География и природные ресурсы*. – 2012. – № 1. – С. 68–73.
24. Геоэкология: воздействие сосредоточенного источника ртутного загрязнения на компоненты природной среды Приангарья / П.В. Коваль, Е.А. Руш, Г.П. Королева, Ю.Н. Удодов, Л.Д. Андрулайтис, Р.Х. Зарипов // *Инженерная экология*. – 2004. – № 6. – С. 18–24.
25. Сидорова Г.П., Крылов Д.А., Якимов А.А. Экологическое воздействие угольных ТЭС на окружающую среду // *Вестник ЗабГУ*. – 2015. – № 9. – С. 28–38.
26. Vassilev S.V., Vassileva C.G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour // *Fuel*. – 2007. – Vol. 86. – P. 1490–1512.
27. Воздействия золоотвалов теплоэлектростанций на окружающую среду в черте пригородных зон / Е.В. Ковалева, Т.И. Матвеевко, И.Ю. Вагулин, О.С. Кузмина // *Polish Journal of Science*. – 2020. – № 28. – С. 11–21.

28. Шумилова Л.П. Оценка техногенного загрязнения почв Благовещенска // География и природные ресурсы. – 2016. – № 2. – С. 36–45.
29. Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова в различных функциональных зонах г. Усолье-Сибирское / М.С. Холодова, М.В. Пастухов, В.А. Бычинский, С.Н. Просекин, О.Ю. Белозерова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 219–230. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/73212> (дата обращения 03.07.2023).
30. Усманова Л.И., Замана Л.В. Сравнительная эколого-гидрохимическая характеристика гидрозолошлакоотвалов теплоэлектростанций топливно-энергетического комплекса Восточного Забайкалья // Геосферные исследования. – 2021. – № 2. – С. 87–100. URL: <https://doi.org/10.17223/25421379/19/8> (дата обращения 03.07.2023).
31. Джумаев Н.Р., Наставкин А.В. Мацеральный и химический состав бурых углей Мугунского месторождения // Химия твердого топлива. – 2019. – Т. 53. – № 4. – С. 3–8.
32. Ильенок С.С., Арбузов С.И. Металлоносные угли Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 132–144. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/50263> (дата обращения 03.07.2023).
33. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbuзов, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, S.S. Penok // International Journal of Coal Geology. – 2011. – Vol. 86. – P. 318–328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.03.005> (дата обращения 03.07.2023).
34. Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири: авторефер. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2005. – 48 с.
35. Кизильштейн Л.Я. Геохимия тяжелых металлов в углях: экологический аспект // Геохимия. – 1998. – № 8. – С. 848–853.
36. A critical review on lead migration, transformation and emission control in Chinese coal-fired power plants / Y. Wang, H. Hu, X. Wang, H. Liu, L. Dong, G. Luo, Y. Zhao, H. Yao // Journal of Environmental sciences. – 2022. – Vol. 124. – P. 397–413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.09.039> (дата обращения 03.07.2023).
37. Migration and emission behavior of arsenic and selenium in a circulating fluidized bed power plant burning arsenic/selenium-enriched coal / Y. Huang, H. Gong, H. Hu, B. Fu, B. Yuan, S. Li, G. Luo, H. Yao // Chemosphere. – 2021. – Vol. 263. – P. 127920. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127920> (дата обращения 03.07.2023).
38. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 650 с.
39. Паутов Д.В. Роль природных и техногенных факторов в формировании режима подземных вод (на примере ОАО «Усольехимпром») // Материалы всероссийского совещания по подземным водам Востока России. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – С. 174–176.
40. Current chemical composition of Lake Baikal / T.V. Khodzher, V.M. Domysheva, L.M. Sorokovikova, M.V. Sakirko, I.V. Tomberg // Inland waters. – 2017. – Vol. 7. – № 3. – P. 250–258. URL: <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982> (дата обращения 03.07.2023).
41. Многолетний геохимический мониторинг истока р. Ангара (сток оз. Байкал) / В.И. Гребенщикова, М.И. Кузьмин, О.А. Пройдакова, О.В. Зарубина // Доклады академии наук. – 2018. – Т. 480. – № 4. – С. 449–454. URL: <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060028> (дата обращения 03.07.2023).
42. Карнаухова Г.А. Литологический состав донных осадков в барьерной зоне «река–водохранилище» (на примере Братского водохранилища) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2015. – Т. 13. – С. 78–87.
43. Гребенщикова В.И., Загорулько В.А. Многолетние мониторинговые исследования макро- и микрокомпонентного состава истока реки Ангары // Вестник ИРГСХА. – 2013. – № 57-2. – С. 88–95.
44. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Trace element compositions and water quality assessment in the Angara river source (Baikal Region, Russia) // Water. – 2022. – Vol. 14. – P. 3564. URL: <https://doi.org/10.3390/w14213564> (дата обращения 03.07.2023).
45. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В.И. Гребенщикова, Е.Е. Лаутсберг, Н.А. Китаев, И.С. Ломоносов. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 234 с.
46. Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржицкий Ю.Б. Изменение геологической среды в зоне влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 254 с.

Информация об авторах

Евгения Андреевна Цветкова, аспирант, инженер-исследователь Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. e.tsvetkova@igc.irk.ru

Вера Игоревна Полетаева, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А; доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. al-ieva@igc.irk.ru

Михаил Владимирович Пастухов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. mpast@igc.irk.ru

Поступила в редакцию: 04.07.2023

Поступила после рецензирования: 24.08.2023

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Mokarram M., Saber A., Sheykhi V. Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 227, 123380. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123380> (accessed 3 July 2023).
2. Huang Y., Beihai Z., Ruru H., Xiaohui L., Shuo L., Nan L. China's industrial gray water footprint assessment and implications for investment in industrial wastewater treatment. *Environmental science and pollution research*, 2019, vol. 27, pp. 7188–7198. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07405-y> (accessed 3 July 2023).
3. Gao Y., Quin H., Ren W., Wang H., Liu F., Yang F. Hydrochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 260, 121006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121006> (accessed 3 July 2023).
4. Okereke J.N., Ogidi O.I., Obasi K.O. Environmental and health impact of industrial wastewater effluents in Nigeria – a review. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 2016, vol. 3, no. 6, pp. 55–67.
5. Iyas M., Ahmad W., Khan H., Yousaf S., Yasir M., Khan A. Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review. *Reviews on Environmental Health*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 171–186. Available at: <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0078> (accessed 3 July 2023).
6. Manirakiza B., Gbadegesin L.A., Okeke E.S., Bagaragaza R., Felix G.A. Physico-chemical analysis of industrial wastewater pollution from Kigali special economic zone (KSEZ) and the potential impacts in the downstream regions of Kigali City in Rwanda. *Sustainable Water Resources Management*, 2022, vol. 8, no. 95. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00693-2> (accessed 3 July 2023).
7. Lau S.C., Mehdi H., Bragg L.M., Servos M.R., Balshine S., Scott G.R. Exposure to wastewater effluent disrupts hypoxia responses in killifish (*Fundulusheteroclitus*). *Environmental Pollution*, 2021, vol. 284, 117373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117373> (accessed 3 July 2023).
8. Aristone C., Mehdi H., Hamilton J., Bowen K.L., Currie W.J.S., Kidd K.A., Balshine S. Impacts of wastewater treatment plants on benthic macroinvertebrate communities in summer and winter. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 820, 153224. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153224> (accessed 3 July 2023).
9. Millar E.N., Surette M.G., Kidd K.A. Altered microbiomes of aquatic macroinvertebrates and riparian spiders downstream of municipal wastewater effluents. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 809, 151156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151156> (accessed 3 July 2023).
10. Koval P.V., Rush E.A., Koroleva G.P., Udodov Yu.N., Andrulaitis L.D. Assessment of the impact of a source of mercury pollution on the natural environment components of the Angara region. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.)
11. Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsskikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region Russia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, 321, 012041. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012041> (accessed 3 July 2023).
12. Hakanson L. Ecological Risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14, no. 8, pp. 975–1001.
13. Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problem in the assessment of heavy metals level in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters*, 1980, vol. 33, pp. 566–575.
14. Vasiliu D., Bucse A., Lupascu N., Ispas B., Gheablu C., Stanescu I. Assesment of metal pollution in surface sediments of coastal Tasaul Lake (Romania). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192, no. 749. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08698-0> (accessed 3 July 2023).
15. Luo M., Zhang Y., Li H., Hu W., Xiao K., Yu S., Zheng C., Wang X. Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: the role of groundwater discharge. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 807, 151070. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070> (accessed 3 July 2023).
16. SanPiN 1.2.3685-21 «Hy-gienic standards and requirements to ensure safety and (or) harm-lessness for humans of environmental factors» of January 28, 2021 No 2. (In Russ.) Available at: <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf> (accessed 3 July 2023).
17. «On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum allowable concentrations of hazardous substances in the waters of water bodies of fishery significance» of 13 December, 2016 No 552. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (accessed 3 July 2023).
18. Rush E.A., Khitsky Ya.V. Surface runoff as a major factor of mercury pollution in the Angara. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka*, 2003, no. 4, pp. 80–84. (In Russ.)
19. Alieva V.I., Butakov E.V., Pastukhov M.V., Andrulaitis L.D. Specific features of anthropogenic pollution and forms of mercury transport in the Bratsk Reservoir. *Inzhenernaya geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*, 2011, no. 5, pp. 431–438. (In Russ.)
20. Koval P.V., Butakov E.V., Vinogradova T.P. Mercury in the biogeochemical cycle of the Bratsk Reservoir] and the environmental consequences of mercury pollution. *Changes of natural environment and climate. Natural and possible consequent human-induced catastrophes*. Ed. by N.P. Laverov. Moscow, IFZ RAN Publ., 2008. Vol. 4, pp. 97–103. (In Russ.)
21. Tsvetkova E.A., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Dynamics of mercury concentrations in wastewater from the Usolye–Sibirskoye industrial zone in periods with different technogenic loads, *Limnology and Freshwater Biology*, 2022, no. 3, pp. 1346–1348. Available at: <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-3-1346> (accessed 3 July 2023).
22. Khitsky Ya.V. *Research and development of technology for local treatment of mercury-containing water*. Cand. Diss. Abstract. Irkutsk, 2004. 18 p. (In Russ.)
23. Alieva V.I., Pastukhov M.V. Hydrochemical characteristics of the Angara River in the impact area of the Usolskiy Industrial Hub. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2012, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.)
24. Koval P.V., Rush E.A., Koroleva G.P., Udodov Yu.N., Andrulaitis L.D., Zaripov R.H. Geo-ecology: the impact of a concentrated source of mercury pollution on the natural environment components of the Angara region. *Inzhenernaya ekologiya*, 2004, no. 6, pp. 18–24. (In Russ.)

25. Sidorova G.P., Krylov D.A., Yakimov A.A. Environmental impact of coal plants on the environment. *Vestnik ZabGU*, 2015, no. 9, pp. 28–38. (In Russ.)
26. Vassilev S.V., Vassileva C.G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel*, 2007, vol. 86, pp. 1490–1512.
27. Kovaleva E., Matveenkov T., Vagurin I., Kuzmina O. Impact of ash and slag landfills of thermal power plants on atmospheric air, soils and plants. *Polish Journal of Science*, 2020, no. 28, pp. 11–21. (In Russ.)
28. Shumilova L.P. Assessing technogenic pollution of soils in Blagoveshchensk. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2016, no. 2, pp. 36–45. (In Russ.)
29. Kholodova M.S., Pastukhov M.V., Bychinsky V.A., Prosekin S.N., Belozerova O.Yu. Mineral and material composition of solid sediment of snow cover in various functional zones of Usolye–Sibirskoe. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 219–230. (In Russ.) Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/73212> (accessed 3 July 2023).
30. Usmanova L.I., Zamana L.V. Comparative ecological and hydrochemical characteristics of hydraulic ash and slag dumps of heat power stations of the fuel and energy complex of the Eastern Transbaikalia. *Geosphere Research*, 2021, no. 2, pp. 87–100. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.17223/25421379/19/8> (accessed 03 July 2023).
31. Dzhumanyan N.R., Nastavkin A.V. Maceral and chemical compositions of brown coals from the Mugunsk deposit. *Himiya tverdogo topliva*, 2019, vol. 53, no. 4, pp. 197–201. (In Russ.)
32. Ilenok S.S., Arbuzov S.S. Metalliferous coals of Azeyskoe deposit of Irkutsk coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 132–144. (In Russ.) Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/50263> (accessed 3 July 2023).
33. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *International Journal of Coal Geology*, 2011, vol. 86, pp. 318–328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.03.005> (accessed 3 July 2023).
34. Arbuzov S.I. *Geochemistry of rare elements in Central Siberian coals*. Dr. Diss. Abstract. Tomsk, 2005. 48 p. (In Russ.)
35. Kizilshstein L.Ya. Geochemistry of heavy metals in coal: an environmental perspective. *Geohimiya*, 1998, no. 8, pp. 848–853. (In Russ.)
36. Wang Y., Hu H., Wang X., Liu H., Dong L., Luo G., Zhao Y., Yao H. A critical review on lead migration, transformation and emission control in Chinese coal-fired power plants. *Journal of Environmental sciences*, 2022, vol. 124, pp. 397–413. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.09.039> (accessed 3 July 2023).
37. Huang Y., Gong H., Hu H., Fu B., Yuan B., Li S., Luo G., Yao H. Migration and emission behavior of arsenic and selenium in a circulating fluidized bed power plant burning arsenic/selenium-enriched coal. *Chemosphere*, 2021, vol. 263, 127920. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127920> (accessed 3 July 2023).
38. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Toxic elements impurities in fossil coals*. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2005. 650 p. (In Russ.)
39. Pautov D.V. Role of natural and anthropogenic factors in the formation of the groundwater regime (using the example of Usoliekhimprom). *Proc. of the All-Russian conference on groundwater in Eastern Russia*. Irkutsk, IGTU Publ., 2003. pp. 174–176. (In Russ.)
40. Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal. *Inland waters*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 250–258. Available at: <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982> (accessed 3 July 2023).
41. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Proydakova O.A., Zarubina O.V. Long-term geochemical monitoring of the source of the Angara River (runoff from Lake Baikal). *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 480, no. 2, pp. 735–740. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060028> (accessed 3 July 2023).
42. Karnaukhova G.A. Lithological composition of bottom sediments in the river-reservoir barrier zone (case study of Bratsk Reservoir). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2015, vol. 13, pp. 78–87. (In Russ.)
43. Grebenshchikova V.I., Zagoruljko N.A. Long-term monitoring of macro- and trace element composition of the Angara River runoff. *Vestnik IRGSHA*, 2013, vol. 57-2, pp. 88–95. (In Russ.)
44. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Trace element compositions and water quality assessment in the Angara river source (Baikal Region, Russia). *Water*, 2022, vol. 14, 3564. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14213564> (accessed 3 July 2023).
45. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A., Lomonosov I.S. *Environmental Geochemistry of Pribaikalye (Baikal Ecological Test Site)*. Novosibirsk, Academic Publ. «Geo», 2008. 234 p.
46. Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhitsinsky Yu.B. *Changes in the geological environment in the zone of influence of the Angara-Yenisei reservoirs*. Novosibirsk, Siberian Publ. Company of the Russian Academy of Sciences, 1999. 254 p.

Information about the authors

Evgeniia A. Tsvetkova, Postgraduate Student, Research Engineer, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation. e.tsvetkova@igc.irk.ru

Vera I. Poletaeva, Cand. Sc., Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation; Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. alieva@igc.irk.ru

Mikhail V. Pastukhov, Cand. Sc., Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation. mpast@igc.irk.ru

Received: 04.07.2023

Revised: 24.08.2023

Accepted: 10.04.2024

УДК 621.3.019, 681.51, 62.52, 622.73
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

Приближенное решение задачи оптимального резервирования сложной технологической системы измельчения руды

С.Ш. Баласанян✉, Э.М. Геворгян

Капанский филиал Национального политехнического университета Армении, Армения, г. Капан

✉seyran@sunicom.net

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности функционирования технологической системы измельчения руды путем поэлементного оптимального нагруженного резервирования ее элементов. *Цель:* обоснование необходимости повышения эффективности функционирования технологической системы измельчения руды путем оптимального резервирования и приближенное решение следующих задач: 1) максимизировать эффективность функционирования сложной системы измельчения руды путем поэлементного нагруженного резервирования при ограничении, наложенном на технико-экономический показатель системы; 2) минимизировать технико-экономический показатель системы измельчения руды при заданном значении показателя эффективности ее функционирования. *Объект:* технологическая система измельчения руды, рассмотренная как система со многими работоспособными состояниями (multi-state system), элементы которой обладают лишь двумя возможными состояниями. Рассматриваемая система зарезервирована способом поэлементного нагруженного резервирования. *Методы:* метод оценки эффективности функционирования систем со многими состояниями, метод неопределенных множителей Лагранжа. *Результат.* Получено приближенное значение показателя эффективности функционирования технологической системы измельчения руды со многими работоспособными состояниями, элементы которой обладают лишь двумя возможными состояниями. Рассмотрены задачи оптимального резервирования сложной технологической системы измельчения руды. Получены приближенные решения указанных задач методом неопределенных множителей Лагранжа, которые могут быть использованы при ориентировочных расчетах на этапе проектирования сложных технологических систем измельчения руды. Рассмотрена также задача оптимального резервирования, когда из m элементов сложной системы измельчения руды можно зарезервировать только n элементов. Учитывая определенные допущения для эффективности функционирования системы, зарезервированной способом поэлементного нагруженного резервирования, получено приближенное решение этой задачи.

Ключевые слова: надежность, эффективность функционирования, оптимальное резервирование, система измельчения руды, метод множителей Лагранжа

Для цитирования: Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Приближенное решение задачи оптимального резервирования сложной технологической системы измельчения руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 59–65. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

UDC 621.3.019, 681.51, 62.52, 622.73
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

Approximate solution of the problem of redundancy optimization of a complex technological ore grinding system

S.Sh. Balasanyan✉, H.M. Gevorgyan

Kapan branch of the National Polytechnic University of Armenia, Kapan, Armenia

✉seyran@sunicom.net

Abstract. *Relevance.* The need to improve the reliability and efficiency of the technological ore grinding system by element-by-element optimal loaded redundancy of its elements. *Aim.* To substantiate the need to improve the efficiency of the ore grinding technological system functioning by optimal redundancy; to find out an approximate solution of the following prob-

lems: 1) to maximize the efficiency of the ore grinding complex system functioning by element-by-element loaded redundancy limited, superimposed on the technical and economic indicator of the system; 2) to minimize technical economic indicator of the ore grinding system at the set value of the efficiency indicator of its functioning. **Object.** Ore grinding technological system, considered as a system with many operable states (multi-state system), the elements of which have only two possible states. The system under consideration is reserved by the element-by-element loaded redundancy method. **Methods.** Method for evaluating the efficiency of functioning of the systems with many states, the method of indefinite Lagrange multipliers. **Results.** The authors have obtained an approximate value of the performance indicator of the ore grinding technological system with many workable states, the elements of which have only two possible states. The paper considers the problems of optimal redundancy of the ore grinding complex technological system. Approximate solutions of these problems are obtained by the method of indefinite Lagrange multipliers, which can be used in rough calculations at the stage of designing complex technological systems for grinding ore. The problem of optimal redundancy is also considered, when it is possible to reserve only m elements from the n elements of ore grinding complex system. Taking into account certain assumptions for the efficiency of the system functioning, reserved by the element-by-element loaded redundancy method, an approximate solution of this problem is obtained.

Keywords: reliability, functioning efficiency, optimal redundancy, ore grinding system, Lagrange multiplier method

For citation: Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. Approximate solution of the problem of redundancy optimization of a complex technological ore grinding system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 59–65. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

Введение

Благодаря структурной и функциональной избыточности сложные технологические системы обладают многими работоспособными состояниями. В отличие от бинарных систем, обладающих лишь двумя возможными состояниями (работоспособным и неработоспособным), для таких систем (*multi-state systems*) [1–4] практически невозможно определить общепринятое понятие отказа. Поэтому для систем со многими состояниями вместо надежности вводится понятие технической эффективности, оценка которой производится с помощью специально выбранных показателей эффективности, учитывающих последствие влияния отказов элементов системы на качество ее функционирования.

Методологической основой существующих методов оценки и исследования эффективности функционирования сложных систем со многими состояниями служит концепция системного подхода. Эта концепция в данном случае проявляется в том, что показатель эффективности рассматривается как функционал от процесса функционирования системы.

В рамках указанного подхода оценка эффективности функционирования сложных систем основывается на использовании модели процесса изменения работоспособности элементов системы. Ее сущность заключается в следующем. Формально каждый элемент E_i^0 ($i = \overline{1, n}$) системы в любой момент времени может находиться в одном из возможных состояний $y_i^0 \in Y_i^0$, каждое из которых характеризуется определенным уровнем работоспособности. Совокупность состояний элементов $y^0(t) = (y_1^0(t), y_2^0(t), \dots, y_n^0(t))$ в произвольный момент времени однозначно определяет состояние системы.

С течением времени под влиянием внешних и внутренних случайных факторов элементы системы переходят из одного состояния в другое. В результате происходит последовательная смена состояний системы в целом.

Случайный n -мерный процесс $Y^0(t) = \{y^0(t)\}$ рассматривается как формализованный процесс изменения работоспособности элементов системы и описывает ее поведение во времени. Каждой реализации $y^0(t)$ процесса $Y^0(t)$ соответствует определенная траектория в пространстве состояний системы

$Y^0 = \prod_{i=1}^n Y_i^0$. Если обозначить через $P_{y^0}(t, t+\theta)$ вероятность того, что формализованный процесс $Y^0(t)$ в интервале времени $[t, t+\theta]$ имел реализацию $y^0(t, t+\theta) \in Y^0(t, t+\theta)$, а через $\varepsilon_{y^0}(t, \theta)$ – условный показатель эффективности функционирования системы для этой реализации, то показатель эффективности функционирования системы может быть определен как математическое ожидание условного показателя $\varepsilon_{y^0}(t, \theta)$:

$$E(t, \theta) = \int_{Y^0(t, t+\theta)} \varepsilon_{y^0}(t, \theta) dP_{y^0}(t, t+\theta). \quad (1)$$

Несмотря на кажущуюся простоту записи, соотношение (1) малоприспособно для расчетов из-за чрезмерной трудности определения $\varepsilon_0(t, \theta)$, $P_{y^0}(t, t+\theta)$ и может быть использовано лишь для оценки эффективности функционирования систем с небольшим числом состояний. Сравнительно хорошо разработаны аналитические методы оценки эффективности функционирования систем с небольшим числом состояний. Сравнительно хорошо разработаны аналитические методы оценки эффективности функционирования систем с небольшим числом состояний. Особенности этих систем позволили получить достаточно компактные расчетные формулы для оценки эффективности их функционирования.

Постановка задачи

Измельчение руды является важнейшим технологическим процессом рудоподготовки, непосредственно предшествующим конечному процессу флотации руды и в значительной мере предопределяющим его эффективность [5–8]. Как показывает опыт эксплуатации обогатительных фабрик, эффективность флотации заметно снижается в результате ухудшения выходных характеристик технологической системы измельчения руды (ТСИР) вследствие отказов ее оборудования [9–11]. В связи с этим вопросы обеспечения надежности и эффективности функционирования ТСИР приобретают особую важность. Одним из возможных способов повышения эффективности функционирования ТСИР является резервирование. При проектировании сложных технологических систем измельчения с использованием резервирования возникают задачи оптимального резервирования [12–21]. Сущность этих задач заключается в определении чисел x_i , $i = \overline{1, n}$ элементов i -го типа, максимизирующих значение показателя эффективности функционирования технологической системы измельчения руды при ограничении, наложенном на технико-экономический показатель (стоимость, вес, объем и т. д.) системы, или минимизирующих технико-экономический показатель системы при заданном значении показателя эффективности функционирования системы.

Рассмотрим некоторую сложную технологическую систему измельчения руды, состоящую из n нерезервированных элементов. Допустим, что каждый элемент может находиться только в двух возможных состояниях: в состоянии работоспособности и в состоянии отказа. Эта система имеет конечное число несовместимых состояний:

- S_0 – состояние системы, когда все элементы работоспособны;
- S_i – состояние системы, когда отказал только i -й элемент ($i = \overline{1, n}$);
- $S_{i,j}$ – состояние системы, когда отказали только i -й и j -й элементы ($i < j$; $i, j = \overline{1, n}$);
- $S_{i,j,\dots,m}$ – состояние системы, когда отказала совокупность только i, j, \dots, m элементов ($i < j < \dots < m$; $i, j, \dots, m = \overline{1, n}$);
- $S_{1,2,\dots,n}$ – состояние системы, когда отказали все элементы системы.

Пусть вероятность состояний $S_0, S_i, S_{i,j}, S_{i,j,\dots,m}, S_{1,2,\dots,n}$ и показатели эффективности функционирования системы для этих состояний соответственно равны $P_0, P_i, P_{i,j}, P_{i,j,\dots,m}, P_{1,2,\dots,n}, \varepsilon_0, \varepsilon_i, \varepsilon_{i,j}, \varepsilon_{i,j,\dots,m}, \varepsilon_{1,2,\dots,n}$. Тогда эффективность функционирования системы определится как математическое ожидание показателя эффективности $\tilde{\varepsilon}$ по формуле

$$\varepsilon = M[\tilde{\varepsilon}] = \varepsilon_0 P_0 + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i P_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n \varepsilon_{i,j} P_{i,j} + \dots + \sum_{\substack{i,j,\dots,m=1 \\ i < j < \dots < m}}^n \varepsilon_{i,j,\dots,m} P_{i,j,\dots,m} + \varepsilon_{1,2,\dots,n} P_{1,2,\dots,n}. \quad (2)$$

Предположим, что отказы элементов системы взаимно независимы. Тогда можно написать

$$P_0 = \prod_{k=1}^n (1 - q_k),$$

$$P_i = q_i \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - q_k),$$

$$P_{i,j} = q_i q_j \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^n (1 - q_k),$$

$$P_{i,j,\dots,m} = q_i q_j \dots q_m \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j,\dots,m}}^n (1 - q_k),$$

$$P_{1,2,\dots,n} = \prod_{k=1}^n q_k,$$

где q_i – вероятность отказа i -го элемента.

Требуется найти решение следующих задач:

- 1) максимизировать эффективность функционирования сложной системы измельчения руды путем поэлементного нагруженного резервирования при ограничении, наложенном на технико-экономический показатель системы;
- 2) минимизировать технико-экономический показатель системы измельчения руды при заданном значении показателя эффективности ее функционирования.

При поэлементном нагруженном резервировании вероятности состояний системы определяются следующими выражениями:

$$P_0 = \prod_{k=1}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_i = q_i^{x_i} \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_{i,j} = q_i^{x_i} q_j^{x_j} \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_{i,j,\dots,m} = q_i^{x_i} q_j^{x_j} \dots q_m^{x_m} \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j,\dots,m}}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_{1,2,\dots,n} = \prod_{k=1}^n q_k^{x_k},$$

где x_i – общее число элементов i -го типа.

Для случая высоконадежной системы, т. е. когда выполняется условие $q_i^{x_i} \ll 1/n$, вместо (2) можно записать приближенно

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i).$$

Тогда могут быть сформулированы две следующие задачи, соотносящиеся с задачами 1 и 2, указанными выше в постановке:

$$1) \max \Phi(x_1, \dots, x_n) = \max_{x_i} \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) \right)$$

при условии, что

$$\sum_{i=1}^n d_i x_i = D^*; i = \overline{1, n};$$

$$2) \min \Phi(x_1, \dots, x_n) = \min_{x_i} \sum_{i=1}^n d_i x_i$$

при условии, что

$$\varepsilon_0 = \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) = \varepsilon^*; i = \overline{1, n},$$

где d_i – технико-экономический показатель одного элемента i -го типа; D^* – технико-экономический показатель системы; ε^* – заданное значение показателя эффективности функционирования системы.

Метод решения

Поставленные двойственные задачи оптимального резервирования можно решить различными методами (метод динамического программирования, градиентные методы, генетические алгоритмы оптимизации [1, 11, 13, 14, 16, 18, 21] и т. п.), каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Однако все эти методы требуют применения вычислительной техники. В данной статье поставленные задачи решаются аналитическим методом, который позволяет обеспечить простоту решения и возможность ее всестороннего анализа.

Если рассмотреть $\Phi(\cdot)$ как непрерывную функцию от x , то поставленные задачи первоначально можно решить с помощью неопределенных множителей Лагранжа и, получив истинные решения x для каждого элемента, округлить их до ближайших целых чисел. Если необходимы более точные значения x_i , то для их определения нужно исследовать ближайшие к x_i слева и справа (не меньше единицы) целые числа $[x_i]$ и $[x_i+1]$, из них выбрать те, при которых $\Phi(x_1, \dots, x_n)$ имеет наибольшее значение в задаче 1 и наименьшее значение в задаче 2.

Решение задачи 1 сводится к решению следующей системы уравнений с $n+1$ неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n d_i x_i - D^* \right) \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^n d_i x_i = D^*. \end{cases} \quad (3)$$

Решение (3) имеет вид

$$x_i = -(1/\ln q_i) \cdot \left(1/\sum_{i=1}^n a_i \left(D^* - \sum_{i=1}^n a_i \ln(\varepsilon_0 - \varepsilon_i/a_i) \right) + \ln(\varepsilon_0 - \varepsilon_i/a_i) \right),$$

где

$$a_i = -(d_i/\ln q_i), i = \overline{1, n}.$$

Для решения задачи 2 составим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{i=1}^n d_i x_i + \lambda \cdot \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) - \varepsilon^* \right) \right) = 0, \\ \varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) = \varepsilon^*; i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (4)$$

Решая (4), получим

$$x_i = 1/\left(-\ln q_i \left(\ln((\varepsilon_0 - \varepsilon_i)/a_i) - \ln \left(\varepsilon_0 - \varepsilon^* / \sum_{i=1}^n a_i \right) \right) \right).$$

Если показатель эффективности функционирования системы имеет денежное выражение, то можно поставить следующую задачу, являющуюся частным случаем задачи 1:

$$\max_{x_i} \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) - \sum_{i=1}^n c_i x_i \right), \quad (5)$$

где c_i – стоимость одного элемента i -го типа.

Дифференцируя соотношение (5) по x_i и приравнявая его к нулю, находим

$$x_i = -(1/\ln q_i) \cdot \ln((\varepsilon_0 - \varepsilon_i)/a_i),$$

где через a_i обозначено выражение $(-c_i/\ln q_i)$.

На практике часто возникает задача оптимального резервирования, когда из m элементов сложной системы измельчения руды можно зарезервировать только n элементов. Учитывая сделанные допущения для эффективности функционирования системы, зарезервированной способом поэлементного нагруженного резервирования, приближенно получим

$$\varepsilon_m = \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) \times \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) + \left(1 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} \right) \cdot \sum_{k=n+1}^m \varepsilon_k q_k \prod_{\substack{j=n+1 \\ j \neq k}}^m (1 - q_j) \right). \quad (6)$$

Требуется решить задачи типа 1 и 2, сформулированные для данного случая, т. е. когда эффективность определяется выражением (6). Решив эти за-

дачи таким же образом, что и задачи 1 и 2, соответственно получим

$$x_i = -(1/\ln q_i) \times \\ \times \left(1/\sum_{i=1}^n a_i \cdot \left(D^* - \sum_{i=1}^n a_i \ln \left(\varepsilon_{0m} - \varepsilon_i \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) \right) / a_i \right) \right) + \\ + \ln \left(\varepsilon_{0m} - \varepsilon_i \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) / a_i \right), \\ x_i = -(1/\ln q_i) \cdot \left(\ln \left(\left(\varepsilon_0 - \varepsilon_i \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) \right) / a_i \right) \right) - \\ - \ln \left(\left(\varepsilon_0 - \varepsilon_m^* \right) / \sum_{i=1}^n a_i \right),$$

где

$$\varepsilon_{0m} = \varepsilon_0 \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) + \sum_{k=n+1}^m \varepsilon_k q_k \cdot \prod_{\substack{j=n+1 \\ j \neq k}}^m (1 - q_j).$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lisnianski A., Levitin G. Multi-state system reliability. Assessment, optimization and applications. – Singapore: World Scientific, 2003. – 358 p.
2. Баласанян С.Ш. Метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 6–18.
3. Баласанян С.Ш. Стратифицированное моделирование сложных технологических систем. – Saarbrücken: Академическое издательство «Ламберт», 2016. – 385 с.
4. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Компьютерная модель принятия решений по реконфигурации структуры технологической системы измельчения руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 39–50.
5. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Обогажительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
6. King R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems. 2nd ed. – Boston: Butterworth–Heinemann, 2015. – 416 p.
7. Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J.S. Review of the flotation of molybdenite // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – Vol. 148. – P. 48–58.
8. Jovanovic I., Miljanovic I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review // Minerals Engineering. – 2015. – Vol. 70. – P. 228–249.
9. Карепов В.А., Безверхая Е.В., Чесноков В.Т. Надежность горных машин и оборудования. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 134 с.
10. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Имитационная модель процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 21–34.
11. Kim Heungseob, Kim Pansoo. Reliability redundancy allocation problem considering optimal redundancy strategy using parallel genetic algorithm // Reliability Engineering and System Safety. – 2017. – Vol. 159 (C). – P. 153–160.
12. Zhigang Tian, Ming J. Zuo, Hongzhong Huang. Reliability-redundancy allocation for multi-state series-parallel systems // IEEE Transactions on Reliability. – 2008. – Vol 57. – Iss. 2. – P. 303–310.
13. Chatwattanasiri N., Coit D.W., Wattanapongsakorn N. System redundancy optimization with uncertain stress-based component reliability: minimization of regret // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 154 (C). – P. 73–83.
14. Coit D.W., Zio E. The evolution of system reliability optimization // Reliability Engineering and System Safety. – 2019. – Vol. 192 (C). – P. 153–160.
15. Mu-Xia Sun, Yan-Fu Li, Enrico Zio. On the optimal redundancy allocation for multi-state series-parallel systems under epistemic uncertainty // Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – Vol. 192. – P. 48–58.
16. Jianchun Zhang, Lei Li, Zhiwei Chen. Strength-redundancy allocation problem using artificial bee colony algorithm for multi-state systems // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 209. – P. 163–170.
17. Hanxiao Zhang, Muxia Sun, Yan-Fu Li. Reliability-redundancy allocation problem in multi-state flow network: Minimal cut-based approximation scheme // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 225. – P. 163–173.

Заключение

Технологическая система измельчения руды рассмотрена как сложная система, обладающая многими работоспособными состояниями (*multi-state system*).

Получено приближенное значение показателя эффективности функционирования этой системы, элементы которой обладают лишь двумя возможными состояниями. С использованием приближенного значения показателя эффективности функционирования технологической системы измельчения руды методом неопределенных множителей Лагранжа получены приближенные решения задачи оптимального резервирования системы.

Следует отметить, что округление значений $x_i, i = \overline{1, n}$ до ближайших целых чисел существенно не влияет на точность решения, поскольку сами по себе $d_i, \varepsilon_0, \varepsilon_i$ также являются величинами более или менее приближенными. Поэтому полученные результаты могут быть с успехом использованы при ориентировочных расчетах.

При решении рассмотренных задач методом динамического программирования полученные решения можно использовать в качестве опорного. Область поиска при этом значительно сужается.

18. Yan-Fu Li, Hanxiao Zhang. The methods for exactly solving redundancy allocation optimization for multi-state series-parallel systems // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2022. – Vol. 221. – P. 156–165.
19. Reliability analysis of complex multi-state system with common cause failure based on evidential networks / J. Mi, Y.-F. Li, W. Peng, H.-Z. Huang // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2018. – Vol. 174. – № 6. – P. 71–81.
20. Huang Taijun, Chen Guobing, Yang Zichun. Multi-state system reliability calculation considering probabilistic common cause failure // *Chinese Journal of Ship Research*. – 2019. – Vol. 14 (S1). – P. 17–22.
21. Reliability Analysis of a Complex Multistate System Based on a Cloud Bayesian Network / Jin-Zhang Jia, Zhuang Li, Peng Jia, Zhi-Guo Yang // *Shock and Vibration*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–27.

Сведения об авторах

Сейран Шамирович Баласянян, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28. seyran@sunicom.net
Эрмине Михайловна Геворгян, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28. hermine799@gmail.com

Поступила в редакцию: 28.06.2023

Поступила после рецензирования: 14.09.2023

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Lisnianski A., Levitin G. *Multi-state system reliability. Assessment, optimization and applications*. Singapore, World Scientific, 2003. 358 p.
2. Balasanyan S.Sh. A stratified method of formalization of multistate complex technological systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 6–18. (In Russ.)
3. Balasanyan S.Sh. *Stratified modeling of complex technological systems*. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2016. 385 p. (In Russ.)
4. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. Computer model of decision making on reconfiguration of the ore grinding technological system structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no 1, pp. 39–50. (In Russ.)
5. Avdokhin V.M. *The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing*. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p. (In Russ.)
6. King R.P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. 2nd ed. Boston, Butterworth-Heinemann, 2015. 416 p.
7. Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J.S. Review of the flotation of molybdenite. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, vol. 148, pp. 48–58.
8. Jovanovic I., Miljanovic I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 70, pp. 228–249.
9. Karepov V.A., Bezverkhaya E.V., Chesnokov V.T. *Reliability of mining machines and equipment*. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 134 p. (In Russ.)
10. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. Simulation model of changing working capacity of grinding equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 21–34. (In Russ.)
11. Kim Heungseob, Kim Pansoo. Reliability redundancy allocation problem considering optimal redundancy strategy using parallel genetic algorithm. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, vol. 159 (C), pp. 153–160.
12. Zhigang Tian, Ming J. Zuo, Hongzhong Huang. Reliability-redundancy allocation for multi-state series-parallel systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, vol 57, Iss. 2, pp. 303–310.
13. Chatwattanasiri N., Coit D.W., Wattanapongsakorn N. System redundancy optimization with uncertain stress-based component reliability: Minimization of regret. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 154 (C), pp. 73–83.
14. Coit D.W., Zio E. The evolution of system reliability optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, vol. 192 (C), pp. 153–160.
15. Mu-Xia Sun, Yan-Fu Li, Enrico Zio. On the optimal redundancy allocation for multi-state series-parallel systems under epistemic uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, vol. 192, pp. 48–58.
16. Jianchun Zhang, Lei Li, Zhiwei Chen. Strength-redundancy allocation problem using artificial bee colony algorithm for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, vol. 209, pp. 163–170.
17. Hanxiao Zhang, Muxia Sun, Yan-Fu Li. Reliability-redundancy allocation problem in multi-state flow network: minimal cut-based approximation scheme. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, vol. 225, pp. 163–173.
18. Yan-Fu Li, Hanxiao Zhang. The methods for exactly solving redundancy allocation optimization for multi-state series-parallel systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, vol. 221, pp. 156–165.
19. Mi J., Li Y.-F., Peng W., Huang H.-Z. Reliability analysis of complex multi-state system with common cause failure based on evidential networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 2018, vol. 174, no. 6, pp. 71–81.
20. Huang Taijun, Chen Guobing, Yang Zichun. Multi-state system reliability calculation considering probabilistic common cause failure. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14 (S1), pp. 17–22.
21. Jin-Zhang Jia, Zhuang Li, Peng Jia, Zhi-Guo Yang. Reliability analysis of a complex multistate system based on a cloud Bayesian network. *Shock and Vibration*, 2021, vol. 2021, pp. 1–27.

Information about the authors

Seyran Sh. Balasanyan, Dr. Sc., Professor, Head of Department of Information Technologies, Informatics and Automated Systems, Kapan branch of the National Polytechnic University of Armenia, 28, Baghaberd street, Kapan, 3307, Armenia. seyran@sunicom.net

Hermine M. Gevorgyan, Cand. Sc., Associate Professor, Kapan branch of the National Polytechnic University of Armenia, 28, Baghaberd street, Kapan, 3307, Armenia. hermine799@gmail.com

Received: 28.06.2023

Revised: 14.09.2023

Accepted: 10.04.2024

УДК 504.062
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Сорбция тяжелых металлов лигнинсодержащими осадками целлюлозно-бумажной промышленности

А.С. Шатрова[✉], А.В. Богданов, О.В. Тюкалова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

[✉]shatrova.irk@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В настоящее время особенно остро стоит проблема загрязнения почв тяжелыми металлами, которые аккумулируются в организме животных и растений, вызывая различные токсические эффекты. Несмотря на существование различных методов рекультивации нарушенных земель, как правило, их применение неэффективно или дорогостояще, особенно когда речь идет об аномально высоких концентрациях тяжелых металлов. Таким образом, крайне актуальной задачей является поиск эффективных и недорогих способов рекультивации земель, загрязненных высокими концентрациями тяжелых металлов. Статья посвящена изучению возможности использования смеси, полученной из накопленных отходов лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности ОАО «Байкальский ЦБК» в качестве сорбента. **Цель:** изучение и оценка эффективности использования в качестве сорбента тяжелых металлов смеси, в состав которой входят вымороженные лигнинсодержащие осадки ОАО «Байкальский ЦБК». **Методы.** Для оценки сорбционной эффективности полученного сорбента из вымороженных осадков шлам-лигнина были взяты образцы аномально загрязненных почв промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенного в МО «г. Свирск» Иркутской области. Для определения поверхностной структуры полученного сорбента на наличие микро-, мезо- и макропор проводилась съемка его поверхности на двухлучевой системе JEOL. Для установления типов связей сорбента с извлекаемыми металлами использовался метод ИК-спектроскопии. **Результаты.** Исследования показали, что полученный сорбент из вымороженных лигнинсодержащих осадков ОАО «Байкальский ЦБК» имеет пористую структуру с преобладанием мезопор, сорбирующих ионы тяжелых металлов, при этом большое количество микропор способствует возникновению процессов химической сорбции. Полученные ИК-спектры указывают на возможность химической сорбции свинца в результате реакции замещения атома водорода в различных гидроксильных группировках сорбента группы ароматических или карбоксильных структур. При этом полученный сорбент по своим сорбционным свойствам не уступает товарным природным сорбентам – бентонитовой глине и низовому торфу. Проведенные исследования позволяют сделать положительное заключение о возможности применения разработанной смеси в качестве сорбента для иммобилизации тяжелых металлов при рекультивации земель, которые загрязнены высокими содержаниями тяжелых металлов, в том числе свинцом.

Ключевые слова: сорбция, переработка отходов, ОАО «Байкальский ЦБК», шлам-лигнин, тяжелые металлы

Для цитирования: Шатрова А.С., Богданов А.В., Тюкалова О.В. Сорбция тяжелых металлов лигнинсодержащими осадками целлюлозно-бумажной промышленности // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299

UDC 504.062
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299

Heavy metal sorption with lignin-containing sludge from the pulp and paper industry

A.S. Shatrova[✉], A.V. Bogdanov, O.V. Tyukalova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

[✉]shatrova.irk@gmail.com

Abstract. Relevance. At present, the problem of soil pollution with heavy metals, which are accumulated in the body of animals and plants, causing various toxic effects, is especially acute. Despite the existence of various methods of reclamation of disturbed lands, as a rule, their application is inefficient or expensive, especially when it comes to abnormally high concentrations of heavy metals. Thus, an extremely urgent task is to find effective and inexpensive ways to recultivate lands contaminated with high concentrations of heavy metals. The article considers one of the promising areas for the reclamation of such lands using a mixture obtained from the accumulated waste of lignin-containing sediments from the pulp and paper industry of Baikal Pulp and Paper Mill as sorbents. **Aim.** To study and evaluate the effectiveness of using a mixture, which includes frozen lignin-containing sediments of Baikal Pulp and Paper Mill, as heavy metal sorbent. **Methods.** To assess the sorption efficiency of the obtained sorbent from the frozen sediments of sludge-lignin, the samples of anomalously contaminated soils were taken from the industrial site of the former battery plant "Vostsibelement", located in Svirsk, Irkutsk region. To determine the surface structure of the obtained sorbent for the presence of micro-, meso-, and macropores, its surface was surveyed using a JEOL two-beam system. IR spectroscopy was used to establish the types of bonds between the sorbent and the extracted metals. **Results.** The studies have shown that the resulting sorbent from the frozen lignin-containing sediments of Baikal Pulp and Paper Mill has a porous structure with a predominance of mesopores, sorbing heavy metal ions, while a large number of micropores contributes to the occurrence of chemical sorption. The obtained IR spectra indicate the possibility of chemical sorption of lead as a result of the reaction of substitution of a hydrogen atom in various hydroxyl groups of the sorbent of the group of aromatic or carboxyl structures. At the same time, the resulting sorbent in terms of its sorption properties is not inferior to commercial natural sorbents – bentonite clay and grassroots peat. The conducted studies allow us to make a positive conclusion about the possibility of using the developed mixture as a sorbent for the immobilization of heavy metals during the reclamation of lands that are contaminated with high levels of heavy metals, including lead.

Keywords: sorption, waste processing, Baikal Pulp and Paper Mill, lignin sludge, heavy metals

For citation: Shatrova A.S., Bogdanov A.V., Tyukalova O.V. Heavy metal sorption with lignin-containing sludge from the pulp and paper industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами заключается в их способности поступать и накапливаться в различных органах растений и животных, приводя тем самым к серьёзным последствиям. Даже в небольших концентрациях такие тяжелые металлы, как мышьяк, ртуть, свинец, кадмий, а также их соединения, крайне токсичны для большинства высших животных и растений [1]. Например, некоторые из фитотоксических проявлений тяжелых металлов включают нарушение захвата и транслокации питательных веществ, снижение фотосинтеза (уменьшение количества фотосинтетических пигментов), ингибирование транспорта электронов, снижение концентрации CO_2 , фотоокислительное повреждение, образование активных форм кислорода (АФК), ингибирование антиоксидантных ферментов, дисбаланс клеточного окислительно-восстановительного потенциала, повреждение ДНК и окисление белков [2]. При этом накопление тяжелых металлов в почве вызывает озабоченность в сельскохозяйственном производстве из-за неблагоприятного воздействия, влияющего на безопасность пищевых продуктов и приводящего к снижению объема и роста урожая из-за фитотоксичности [3, 4].

Особенно остро стоит проблема загрязнения почвы тяжелыми металлами, поскольку существует опасность не только их поступления в организм человека по трофической цепочке, но и вторичного загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха и подземных вод.

Согласно [5], по результатам многолетних наблюдений за период с 2012 по 2021 гг., в Российской Федерации по индикатору неблагоприятного воздействия на здоровье населения, который выражается в показателе загрязнения почв Z_{ϕ} , к опасной категории загрязнения почв тяжелыми металлами (Z_{ϕ} более 32) относятся почвы следующих территорий: в Иркутской области – территория МО «г. Свирск» ($Z_{\phi}=54$), в Красноярском крае значительно загрязнены почвы г. Норильска ($Z_{\phi}=123$), в Свердловской области тяжелыми металлами загрязнены почвы однокилометровой зоны от ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» в г. Ревда ($Z_{\phi}=52$), почвы городов Кировград ($Z_{\phi}=46$) и Реж ($Z_{\phi}=49$), в Новосибирской области наиболее загрязненными являются почвы Кировского района г. Новосибирска ($Z_{\phi}=65$).

На территории Иркутской области промышленные центры Прибайкалья сформировали зоны опасной категории в таких крупных промышленных городах, как Братск (алюминиевый завод, завод ферросплавов), МО «г. Свирск» (бывший металлургический и аккумуляторный заводы), Иркутск (строительные, машиностроительные заводы), Черемхово (заводы тяжелого машиностроения, механический, химический, а также добыча угля открытым способом).

Несмотря на существование большого количества методов восстановления земель, таких как известкование, внесение органических веществ, фиторемедиация [6], устранение миграции тяжелых металлов или их извлечение различными химиче-

скими [7], физико-химическими способами и другими методами, зачастую их применение неэффективно или дорогостояще, особенно когда речь идет об аномально высоких концентрациях тяжелых металлов [8, 9]. В этом случае применяются кардинальные меры, включающие в себя полное снятие, вывоз и утилизацию загрязненного почвогрунта с его заменой на новый рекультивационный слой, что является крайне дорогостоящими и громоздкими мероприятиями.

В связи с этим встает вопрос о поиске эффективных и недорогих способов рекультивации земель, загрязненных высокими концентрациями тяжелых металлов. В статье рассматривается возможность применения разработанных смесей, полученных из накопленных отходов лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности в качестве эффективных сорбентов для иммобилизации тяжелых металлов при проведении рекультивации нарушенных земель.

Материалы и методы

Известно [10, 11], что некоторые тяжелые металлы способны образовывать сложные малорастворимые комплексные соединения с органическим веществом почв, тем самым снижая их биодоступность, а применение органических удобрений увеличивает запасы гумуса в почве, улучшает ее буферную способность и поглощающую емкость, являясь эффективным средством снижения подвижности тяжелых металлов [12].

Целью исследования являлось изучение и оценка эффективности использования в качестве сорбента тяжелых металлов органоминерального субстрата, в состав которого входит вымороженный лигнинсодержащий осадок ОАО «Байкальский ЦБК» (рис. 1). При этом все концентрации валовых

форм тяжелых металлов в исследуемых образцах лигнинсодержащих осадков карт-накопителей соответствуют гигиеническим нормативам. По отношению к фоновым значениям средних содержаний тяжелых металлов в Прибайкалье (Байкальский геоэкологический полигон) в вымороженных лигнинсодержащих осадках наблюдается превышение меди, цинка и ртути в 1,7, 1,8 и 5,2 раз соответственно [13]. Однако вымороженные лигнинсодержащие осадки по своему составу соответствуют ГОСТ Р 54534-2011 «Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель».

В состав предполагаемого сорбента входят вымороженные лигнинсодержащие осадки целлюлозно-бумажной промышленности, а в качестве добавок внесены золы ТЭЦ и осадки канализационных очистных сооружений г. Байкальска в соотношении 7:1:1. При этом ранее проведенные исследования состава зол ТЭЦ и осадков канализационных очистных сооружений г. Байкальска показали, что концентрации тяжелых металлов в образцах соответствуют гигиеническим нормативам, кроме содержания меди в золе ТЭЦ – превышение по ОДК для суглинистых и глинистых почв с pH_{KCl} более 5,5 в 2,3 раза [13]. За счет невысокого компонентного содержания зол ТЭЦ в получаемом сорбенте (11 %) установленная удельная эффективная активность природных радионуклидов в образцах сорбента не превышает 300 Бк/кг, что соответствует ГОСТ Р 54651-2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия». Возможность использования данной смеси в качестве сорбента, прежде всего, обусловлена содержанием более 40 % микроцеллюлозного волокна.



Рис. 1. Солзанский полигон ОАО «Байкальский ЦБК» для складирования лигнинсодержащих осадков (более 6 млн м³)
Fig. 1. Solzansky landfill of Baikalsky Pulp and Paper Mill for storage of lignin-containing sediments (more than 6 million cubic meters)

Таблица 1. Результаты процесса сорбция–десорбция тяжелых металлов с применением полученного сорбента
Table 1. Results of sorption–desorption of heavy metals using the obtained soil-sorbent

Показатели Indicators	Pb		Cu		Ni		Zn	
	мг/л/mg/l							
	5	400	5	400	5	400	5	400
СОЕ, мг/г/Static exchange capacity, mg/g	0,2	8,7	0,15	4,7	0,14	3,6	0,12	2,8
Е, %	94	44	60	23	56	18	48	14
Десорбция 24 ч/Desorption 24 h, %	3	16	5	15	8	10	5	14

Ранее проведенные исследования [14] показали, что эффективность сорбции тяжелых металлов сорбентом располагается в ряду $Pb > Cu > Ni > Zn$, а сорбированные ионы металлов имеют достаточно прочную физико-химическую связь с поверхностью сорбента. Установлено, что использование разработанного сорбента способно иммобилизовать тяжелые металлы в почве со снижением концентраций их подвижных форм до 80 %.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента по изучению процесса сорбция–десорбция тяжелых металлов на изучаемом сорбенте в модельных растворах с концентрациями ионов металлов свинца, меди, никеля и цинка 5 и 400 мг/л.

Как видно из табл. 1, максимальная степень извлечения E (%) зафиксирована у свинца с концентрацией 5 мг/л и составляет 94 %, при этом с увеличением концентрации свинца до 400 мг/л происходит снижение степени извлечения до 44 % со степенью десорбции, равной 16 %, что говорит о высокой поглощательной способности предлагаемого сорбента по отношению к свинцу [15]. Так как максимальное значение десорбции не превышает 16 %, можно сделать вывод о том, что

остальная часть сорбированных ионов металлов (84 %) имеет достаточно прочную физико-химическую связь с поверхностью сорбента, эффективность которого соизмерима с такими природными сорбентами, как бентонитовая глина и низовой торф [14].

Для оценки сорбционной эффективности полученного сорбента были взяты образцы аномально загрязненных почв промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенной в МО «г. Свирск» (рис. 2) Иркутской области [16].

Превышения свинца в МО «г. Свирск» достигает 3-300 ПДК [17].

Для определения поверхностной структуры полученного сорбента на наличие микро-, мезо- и макропор проводилась съемка его поверхности на двухлучевой системе JEOL серии JIB-4501 (JEOL, Япония), представляющей собой многофункциональный растровый электронный микроскоп, оснащенный мощной ионной пушкой. Изучаемые образцы полученного сорбента высушивались до воздушно-сухого состояния, растирались в агатовой ступке и анализировались на микроскопе.



Рис. 2. Промплощадка бывшего завода «Востсибэлемент» МО «г. Свирск»
Fig. 2. Industrial site of the former Vostsibelement plant, the city of Svirsk

Для установления типов связей сорбента с извлекаемыми металлами использовался метод ИК-спектроскопии на приборе IR Prestige-21 (Shimadzu, Япония), который является первым ИК-Фурье спектрометром, позволяющим работать не только в классической средней ИК-области (MIR), но и в ближней (NIR) и дальней (FIR) областях. Образцы для ИК-спектроскопии готовились следующим образом: растертый в агатовой ступке полученный сорбент (0,5 г) обрабатывался насыщенным раствором нитрата свинца с концентрацией 30 г/100 мл и выдерживался 24 часа, затем отфильтровывался, промывался водой, высушивался при 105 °С и анализировался на ИК-спектрометре. ИК-спектры образцов регистрировались с помощью приставки НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) с кристаллом из селенида цинка.

Все исследования проводились на высокоточном современном оборудовании по аттестованным методикам в лабораториях Технопарка ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Полученные результаты и их обсуждение

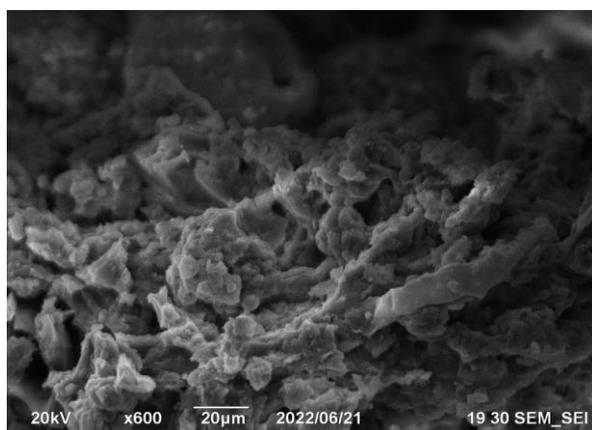
Применение электронной микроскопии позволяет оценить структуру и наличие микро-, мезо- и макропор в исследуемых образцах сорбента. На рис. 3 представлены результаты микроскопической съемки поверхности сорбента (в 600 и 4000 раз), полученного из вымороженных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК».

Как видно из рис. 3, поверхность полученного сорбента обладает высокой степенью пористости с наличием макро-, мезо- и микропор в его структуре, что обуславливает его применение в качестве сорбента. Макропоры выполняют функцию транспортных каналов, облегчающих диффузию адсор-

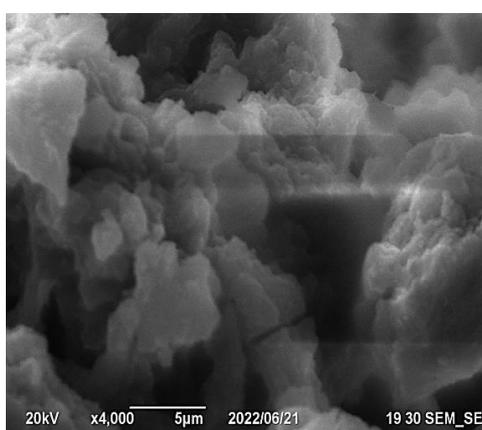
бирующихся молекул к внутренним слоям сорбента, мезопоры отвечают за образование последовательных адсорбционных слоев с заполнением пор по механизму капиллярной конденсации, а наличие микропор позволяет значительно увеличить удельную поверхность, повысить химическую активность и адсорбционную ёмкость сорбента [18]. Установлено, что соотношение микро-, мезо- и макропор в исследуемых образцах составляет 20:50:30 соответственно. При этом структура исследуемого сорбента является в большей степени корпускулярной за счёт срастания большого числа отдельных элементов – первичных частиц. Порами в данном случае являются промежутки между частицами, которые срослись вследствие процессов вымораживания–оттаивания коллоидных осадков шлам-лигнина [19].

На рис. 4 приведены ИК-спектры поверхности полученного сорбента до (1) и после (2) сорбирования ионов свинца.

При исследовании возможности сорбции ионов свинца полученным сорбентом обнаружено, что в ИК-спектрах наблюдаются следующие изменения. В ИК-спектре обработанного раствором свинца сорбента снижается интенсивность полосы 1230 см^{-1} , характеризующей фенольные фрагменты и свободные карбоксильные группы [20], при этом возрастает интенсивность полосы 1410 см^{-1} , относящейся к симметричным колебаниям карбоксилатов, характерных для комплексов гумусовых кислот с ионами тяжелых металлов [21]. Аналогичные результаты были получены в [22], где было показано, что катионы свинца взаимодействуют с гуминовыми веществами, в том числе с гуминовыми кислотами по ионно-обменному механизму при участии карбоксильных и фенольных групп (рис. 5).



a/a



б/б

Рис. 3. Микроскопический снимок поверхности сорбента, полученного из вымороженных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК», увеличение в 600 раз (а), увеличение в 4000 раз (б)

Fig. 3. Microscopic image of the surface of the sorbent obtained from the frozen sediments of the sludge-lignin of the Baikal Pulp and Paper Mill, 600x increase (a), 4000x increase (b)



Рис. 4. ИК-спектры поверхности полученного сорбента до (1) и после (2) сорбирования ионов свинца
Fig. 4. IR spectra of the surface of the sorbent obtained before (1) and after (2) sorption of lead ions

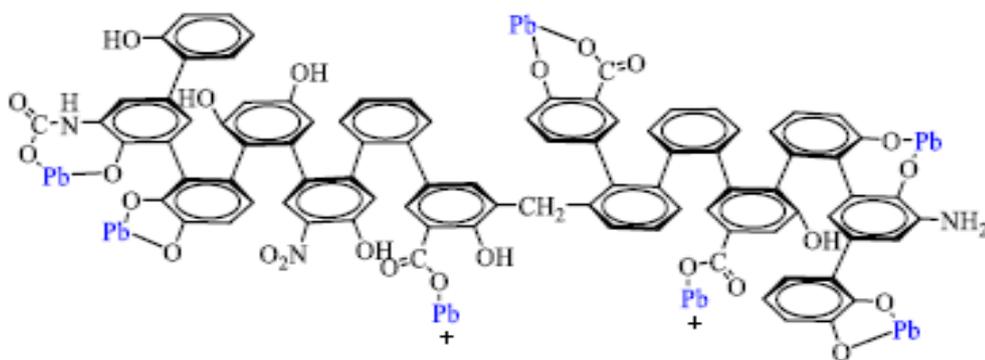


Рис. 5. Связывание ионов Pb^{2+} с гуминовыми веществами [22]
Fig. 5. Binding of Pb^{2+} ions with humic substances [22]

Полосы в области $1230\text{--}1270\text{ cm}^{-1}$ могут быть отнесены к колебаниям С-О групп в группировках простых и сложных эфиров, а также в фенолах [23]. Изменение спектра в этой области также свидетельствует об изменении состояния фенола вследствие координации иона металла.

Значительные изменения наблюдаются в области $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$, относящейся к С-С валентным колебаниям ароматического кольца, и валентным колебаниям группы С=О. Изменения в этой области могут свидетельствовать об изменении в характере замещения в ароматическом кольце.

Также значительно изменяется форма полосы поглощения при $1630\text{--}1640\text{ cm}^{-1}$, которая обусловлена наложением колебаний ароматической С=С связи, колебаний С-Н в гетероциклических группах и колебаниями карбоксильных групп [21]. Кроме того, наблюдается некоторое изменение симметрии полосы валентных колебаний О-Н группы.

Таким образом, совокупность изменений в спектре ИК поглощения полученного сорбента после обработки его солью свинца показывает возмож-

ность его химической сорбции в результате замещения атома водорода в различных гидроксильных группировках. Возникающие сдвиги полос поглощения связаны с изменением зарядов и распределением масс внутри органических структур. В процессах хемосорбции участвуют преимущественно гидроксильные группы ароматических или карбоксильных структур. Отсутствие изменений ИК полосы 1040 cm^{-1} , относящейся к колебаниям С-О в группе $\text{CH}_3\text{-OH}$, обусловлено нахождением С-О в первичной спиртовой группе в различных конформациях, что свидетельствует о том, что эти гидроксильные группы не участвуют в процессе хемосорбции ионов свинца.

Выводы по результатам ИК-спектроскопических исследований согласуются с полученными ранее результатами сорбция-десорбция, представленными в табл. 1, по которым можно предположить, что механизм сорбции тяжелых металлов полученным сорбентом может складываться до 16 % за счет химической адсорбции и до 84 % за счет физической адсорбцией [14].

Таблица 2. Сравнение качественных показателей рекультивации исследуемыми сорбентами

Table 2. Comparison of qualitative indicators of reclamation with the studied sorbents

Показатели Indicators	Объект исследования/Object of research			
	Усредненная проба почвы с промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» Averaged soil sample from the industrial site of the former Vostsibelement plant	Почва с внесенным сорбентом (10:1) Soil with applied sorbent (10:1)	Почва с внесенным сорбентом – низинным торфом (10:1) Soil with added sorbent – lowland peat (10:1)	Почва с внесенным сорбентом – Бентонитовой глиной (10:1) Soil with added sorbent – bentonite clay (10:1)
Свинец подвижный, мг/кг (ПДК=6,0) Lead mobile, mg/kg (MPC=6,0)	603	6,3	6,8	5,8
Медь подвижная, мг/кг (ПДК=3,0) Cuprum mobile, mg/kg (MPC=3,0)	98,8	4,4	5,6	3,2
Цинк подвижный, мг/кг (ПДК=23,0) Zinc mobile, mg/kg (MPC=23,0)	219	25,3	24,6	22,5
Класс опасности Hazard Class	II	IV	IV	IV

В табл. 2 приведены результаты исследований по качественным показателям рекультивации земель промплощадки «Востсибэлемент» с использованием товарных сорбентов природного происхождения и предлагаемого сорбента из отходов целлюлозно-бумажной промышленности. В качестве исходной пробы исследовалась усредненная почва с промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент», в которую вносился полученный сорбент в различных соотношениях. После окончания процессов стабилизации смеси проводился ее анализ.

Как видно из табл. 2, сорбент, в состав которого входит вымороженный лигнинсодержащий осадок целлюлозно-бумажной промышленности, не уступает товарным сорбентам природного происхождения (бентонитовая глина, низовой торф) и позволяет иммобилизовать подвижные формы тяжелых металлов, значительно снижая их концентрации. При этом происходит снижение класса опасности с II (высокоопасные отходы) на IV (малоопасные отходы). Также предлагаемый сорбент улучшает агрохимическое состояние земель за счет дополнительного внесения питательных элементов и органического вещества.

Заключение

Проведенные исследования показали, что полученный сорбент на основе вымороженных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК» имеет пористую структуру, в которой преобладают мезопоры, способные сорбировать на себе ионы тяжелых металлов, при этом большое количество микропор способствует возникновению процессов химической сорбции. Полученные ИК-спектры указывают на возможность химической сорбции свинца в результате реакции замещения атома водорода в различных гидроксильных группировках сорбента группы ароматических или карбоксильных структур. Экспериментально подтверждено, что полученный сорбент по своим сорбционным свойствам не уступает товарным природным сорбентам – бентонитовой глине и низовому торфу.

Таким образом, использование полученного сорбента из вымороженных лигнинсодержащих осадков ОАО «Байкальский ЦБК» позволит решить две важные экологические проблемы – утилизация крупнотоннажных лигнинсодержащих отходов целлюлозно-бумажной промышленности и рекультивация нарушенных земель, загрязненных высоким содержанием тяжелых металлов, в том числе свинцом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Muhammad A., Farouk N. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review // *MOJ Ecology & Environmental Sciences*. – 2018. – Vol. 3 (4). – P. 265–268. DOI: 10.15406/mojes.2018.03.00098.
- Sperdouli I. Heavy metal toxicity effects on plants // *Toxics*. – 2022. – Vol. 10 (12):715. – P. 1–4.
- Ambika A., Mohnish P., Kumar N. Effect of heavy metals on plants: an overview // *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*. – 2016. – Vol. 5 (3). – P. 56–66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204.
- Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteometabolomics, and ionomics / S. Samiksha, P. Parul, S. Rachana, S. Vijay, P. Sheo // *Frontiers in Plant Science*. – 2015. – Vol. 6. – 280 p. DOI: 10.3389/fpls.2015.01143.
- Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2021 году. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2022. – 131 с.
- Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal polluted land / A. Yan, Y. Wang, S. Tan, Y. Mohd, S. Ghosh, Z. Chen // *Front Plant Sci*. – 2020. – Vol. 11 (359). – 15 p. DOI: 10.3389/fpls.2020.00359.
- Bhupendra K., Taak P. Chemical methods of soil remediation // *Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils*. – 2018. – P. 77–84. DOI: 10.1007/978-981-13-2420-8_4.
- Radocaj D., Natalija V., Mladen J. The remediation of agricultural land contaminated by heavy metals // *Poljoprivreda*. – 2020. – Vol. 26. – P. 30–42. DOI: 10.18047/poljo.26.2.4.

9. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability / L. Lianwen, L. Wei, S. Weiping, G. Mingxin // *The Science of the total environment*. – 2018. – Vol. 633. – P. 206–219. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
10. Орлов Д.С., Лыткин И.И. Сорбционная способность торфянистых почв и их роль в формировании состава почвенно-грунтовых вод // *Водные ресурсы*. – 1983. – № 1. – С. 81–93.
11. Spark K., Wells J., Johnson B. The interaction of a humic acid with heavy metals // *Australian Journal of Soil Research*. – 1997. – Vol. 35 (1). – P. 89–101. DOI: 10.1071/S96008.
12. Мамася Н.Н. Участие сложного компоста в миграции тяжёлых металлов в агроландшафте // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 80–87.
13. Технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в почвогрунты с использованием естественных природных процессов / А.С. Шатрова, А.В. Богданов, А.И. Шкрабо, О.В. Алексеева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 153–162. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658.
14. Шатрова А.С., Богданов А.В. Использование почвогрунтов из осадков шлам-лигнина в качестве сорбента тяжёлых металлов при рекультивации загрязненных земель // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2022. – № 4. – С. 52–64.
15. Лукин В.Д. Адсорбционные процессы в химической промышленности. – Л.: Химия, 1973. – 63 с.
16. Богданов А.В., Шатрова А.С., Тюкалова О.В. Оценка воздействия промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» Иркутской области на объекты окружающей среды // *Экология и промышленность России*. – 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 52–57. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-3-52-57.
17. Михайлова О.С., Булаева Н.М., Мусихина Е.А. Мониторинг загрязнения тяжёлыми металлами почвенного покрова территории города Свирска // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2014. – № 4 (21). – С. 34–40.
18. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 132 с.
19. Tanaka K., Kimura Y. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2019. – Vol. 21. – P. 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g.
20. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. – М.: Изд-во Московского университета, 1985. – 558 с.
21. Корельская Т.А., Румянцева Т.И. Строение гумусовых кислот как функция выполнения ими экoproтекторной роли в отношении тяжёлых металлов // *Journal of Siberian Federal University*. – 2014. – № 7. – С. 139–150.
22. Осина К.В. Выявление закономерностей связывания гуминовых веществ торфов с тяжёлыми металлами и формами монтмориллонита: дис. ... канд. хим. наук. – Иваново, 2018. – 156 с.
23. Каюгин А.А., Черкашина Л.В., Шигабаева Г.Н. Спектроскопическая характеристика гуминовых кислот донных отложений // *Вестник ТГУ*. – 2008. – № 3. – С. 153–160.

Информация об авторах

Анастасия Сергеевна Шатрова, кандидат технических наук, докторант кафедры обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии, научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. shatrova.irk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8054-1680>

Андрей Викторович Богданов, доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. bogdanovav@istu.edu; <https://orcid.org/0000-0002-7519-1126>

Ольга Васильевна Тюкалова, кандидат химических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. olgaburlak1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2464-261X>

Поступила в редакцию: 18.06.2023

Поступила после рецензирования: 13.09.2023

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Muhammad A., Farouk N. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 2018, vol. 3 (4), pp. 265–268. DOI: 10.15406/mojes.2018.03.00098.
2. Sperdoui I. Heavy metal toxicity effects on plants. *Toxics*, 2022, vol. 10 (12):715, pp. 1–4.
3. Ambika A., Mohnish P., Kumar N. Effect of heavy metals on plants: an overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2016, vol. 5 (3), pp. 56–66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204.
4. Samiksha S., Parul P., Rachana S., Vijay S., Sheo P. Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteometabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, 280 p. DOI: 10.3389/fpls.2015.01143.
5. *Soil pollution of the Russian Federation with industrial toxicants in 2021*. Obninsk, Research and Production Association Typhoon Publ., 2022. 131 p. (In Russ.)

6. Yan A., Wang Y., Tan S., Mohd Y., Ghosh S., Chen Z. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal polluted land. *Front Plant Sci*, 2020, vol. 11 (359), 15 p. DOI: 10.3389/fpls.2020.00359.
7. Bhupendra K., Taak P. Chemical methods of soil remediation. *Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils*, 2018, pp. 77–84. DOI: 10.1007/978-981-13-2420-8_4.
8. Radocaj D., Natalija V., Mladen J. The remediation of agricultural land contaminated by heavy metals. *Poljoprivreda*, 2020, vol. 26, pp. 30–42. DOI: 10.18047/poljo.26.2.4
9. Lianwen L., Wei L., Weiping S., Mingxin G. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability. *The Science of the total environment*, 2018, vol. 633, pp. 206–219. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
10. Orlov D.S., Lytkin I.I. Sorption capacity of peaty soils and their role in the formation of soil and groundwater composition. *Water Resources*, 1983, vol. 1, pp. 81–93. (In Russ.)
11. Spark K., Wells J., Johnson B. The interaction of a humic acid with heavy metals. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, vol. 35 (1), pp. 89–101. DOI: 10.1071/S96008.
12. Mamas N.N. Participation of complex compost in the migration of heavy metals in the agricultural landscape. *The North Caucasus Ecological Herald*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 80–87. (In Russ.)
13. Shatrova A.S., Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Alekseeva O.V. Technology for processing waste of the pulp and paper industry into soil ground using natural processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 153–162. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658.
14. Bogdanov A.V., Shatrova A.S. Use of soils from sediments of sludge-lignin as a sorbent of heavy metals in the reclamation of contaminated lands. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2022, no. 4, pp. 52–64. (In Russ.)
15. Lukin V.D. *Adsorption processes in the chemical industry*. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 63 p. (In Russ.)
16. Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Tyukalova O.V. Assessment of the impact of the industrial site of the former battery plant "Vostsibelemt" in the Irkutsk region on environmental objects. *Ecology and Industry of Russia*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 52–57. (In Russ.) DOI: 10.18412/1816-0395-2022-3-52-57.
17. Mikhaylova O.S., Bulaeva N.M., Musihina E.A. Monitoring of pollution by heavy metals of the soil cover of the territory of the city of Svirsk. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2014, vol. 4, no. 21, pp. 34–40. (In Russ.)
18. Gavrilova N.N., Nazarov V.V. *Analysis of the porous structure based on adsorption data: textbook allowance*. Moscow, Mendeleev University of Chemical Technology Publ., 2015. 132 p. (In Russ.)
19. Tanaka K., Kimura. Y. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, vol. 21, pp. 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g.
20. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Suhanova N.I. *Soil chemistry*. Moscow, Moscow University Publ. House, 1985. 558 p. (In Russ.)
21. Korelskaya T.A., Rummyantseva T.I. Structure of humic acids as a function of their ecoprotective role in relation to heavy metals. *Journal of Siberian Federal University*, 2014, no. 7, pp. 139–150. (In Russ.)
22. Osina K.V. *Identification of patterns of binding of peat humic substances with heavy metals and forms of montmorillonite*. Cand. Diss. Ivanovo, 2018. 156 p. (In Russ.)
23. Kayugin A.A., Cherkashina L.V., Shigabaeva G.N. Spectroscopic characteristics of humic acids in bottom sediments. *Bulletin of Tyumen State University*, 2008, no. 3, pp. 153–160. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia S. Shatrova, Cand. Sc., Research Assistant, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. shatrova.irk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8054-1680>

Andrey V. Bogdanov, Dr. Sc., Professor, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. bogdanovav@istu.edu; <https://orcid.org/0000-0002-7519-1126>

Olga V. Tyukalova, Cand. Sc., Research Assistant, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. olgaburlak1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2464-261X>

Received: 18.06.2023

Revised: 13.09.2023

Accepted: 10.04.2024

УДК 622.276.66; 550.832
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4281
Шифр специальности ВАК: 25.00.10

Рекомендации по проведению промысловых геофизических исследований профиля притока в горизонтальных скважинах с многостадийным ГРП

А.С. Топольников^{1✉}, Р.К. Яруллин², Р.Р. Муртазин^{3,4}, К.В. Торопов⁵

¹ООО «РН-БашНИПИнефть», Россия, г. Уфа

²Уфимский университет науки и технологий, Россия, г. Уфа

³АО «ИГиРГИ», Россия, г. Москва

⁴Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

⁵ПАО «НК «Роснефть», Россия, г. Москва

✉ТopolnikovAS@bnipi.rosneft.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью корректного планирования и повышения результативности промысловых геофизических исследований на горизонтальных скважинах с многостадийным гидроразрывом пласта. Широкое распространение горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта требует развития технологий исследования работы трещин гидроразрыва пласта в задачах оптимизации технологий заканчивания, гидроразрыва пласта и мониторинга разработки месторождений. Инструментальные способы исследования притока флюида, к числу которых относятся промысловые геофизические исследования, в условиях горизонтальных скважин с множественными трещинами гидроразрыва пласта обнаруживают ряд недостатков, значительно снижающих их достоверность. **Цели:** повышение качества промысловых геофизических исследований на горизонтальных скважинах с множественными трещинами гидроразрыва пласта за счет разработки критериев применения технологий проведения исследований. **Методы:** анализ результатов промыслово-геофизических методов исследования горизонтальных скважин, обобщение опыта исследований действующих горизонтальных скважин с множественными трещинами гидроразрыва пласта в ПАО «НК «Роснефть». **Результаты.** Разработана экспертная система принятия решений в виде матрицы, которая представляет собой критерии применения методов промысловых геофизических исследований в горизонтальных скважинах с множественными трещинами гидроразрыва пласта. Эта матрица позволяет в зависимости от параметров скважины (конструкция скважины, число и расположение портов гидроразрыва пласта, состав скважинного флюида) и сценарных условий (тип решаемой задачи, локализация притока, характеристики геофизических приборов) оценить вероятность доставки приборов в скважину разными средствами, информативность методов промысловых геофизических исследований, качество решения поставленной задачи. На стадии опытно-промышленных работ матрица была адаптирована к условиям низкодебитных горизонтальных скважин. Также в работе был рассмотрен опыт применения на низкодебитных скважинах пакерного расходомера и спектральной шумомерии.

Ключевые слова: промысловые геофизические исследования, профиль притока, горизонтальные скважины, многостадийный гидроразрыв пласта

Для цитирования: Рекомендации по проведению промысловых геофизических исследований профиля притока в горизонтальных скважинах с многостадийным ГРП / А.С. Топольников, Р.К. Яруллин, Р.Р. Муртазин, К.В. Торопов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 75–84. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4281

UDC 622.276.66; 550.832
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4281

Recommendations for field geophysical research of inflow profile in horizontal wells with multiple hydraulic fracturing

A.S. Topolnikov^{1✉}, R.K. Yarullin², R.R. Murtazin^{3,4}, K.V. Toropov⁵

¹ LLC «RN-BashNIPIneft», Ufa, Russian Federation

² Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

³ JTC «IGiRGI», Moscow, Russian Federation

⁴ Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russian Federation

⁵ PJSC «NK «Rosneft», Moscow, Russian Federation

✉ TopolnikovAS@bnipi.rosneft.ru

Abstract. Relevance. Correct planning and improving the effectiveness of field geophysical surveys in horizontal wells with multi-stage hydraulic fracturing. Wide distribution of horizontal wells with multi-stage hydraulic fracturing requires development of methods of researching hydraulic fractures in the field of optimization of completion technologies, hydraulic fracturing and field development monitoring. The instrumental methods of researching fluid inflow, which include field geophysical research, under conditions of horizontal wells with multistage fracturing, find out the set of missing, which essentially reduce it reliability. **Aim.** Improvement of the quality of field logging in horizontal wells with multistage fracturing by developing criteria for application of research technologies. **Methods.** Analysis of field geophysical data of horizontal wells with hydraulic fractures in PJSC Rosneft Oil Company. **Results.** The authors have developed an expert decision-making system, which has the form of matrix with criteria of application of field geophysical research methods to horizontal wells with multi-stage hydraulic fracturing. This matrix enables in dependence on the well parameters (well construction, number and position of hydraulic fracturing ports, well fluid content) and scenario conditions (type of problem to be solved, inflow localization, characteristics of geophysical devices) to estimate the probability of delivery of devices inside the well with different ways, the informative value of field geophysical research, the quality of solution of the problem to be set. During pilot works the matrix was improved by the methods of researching low-rate horizontal wells. The paper also considered the experience of using low-rate wells with a packer flow meter and spectral noise logging.

Keywords: field geophysical research, inflow profile, horizontal wells, multistage hydraulic fracturing

For citation: Topolnikov A.S., Yarullin R.K., Murtazin R.R., Toropov K.V. Recommendations for field geophysical research of inflow profile in horizontal wells with multiple hydraulic fracturing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 75–84. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4281

Введение

Взрывной рост количества горизонтальных скважин, увеличение длины горизонтальных участков скважин и количества стадий гидроразрыва пласта (ГРП), применение кластерных многостадийных гидроразрывов пласта (МГРП) требует развития новых технологий исследования работы трещин ГРП и повышения достоверности существующих методов исследований. Несмотря на наличие альтернативных методов анализа работы горизонтальных скважин (ГС) с МГРП, таких как гидродинамические исследования [1], трассерные исследования [2–7], микросейсмический мониторинг [8–10], оптоволоконные системы термометрии скважин с распределенными датчиками и визуальная аналитика [11], промышленные геофизические методы сохраняют свою доминирующую роль как по числу исследований, так и по многообразию решаемых при этом задач [12–15].

В настоящей работе обобщен опыт применения промышленных геофизических исследований (ПГИ) для оценки профиля притока флюида в более чем 50 горизонтальных скважинах с многостадийным ГРП в ПАО «НК «Роснефть». Исследования проводились преимущественно в добывающих скважинах, при этом использовались как дистанционные, так и автономные приборы. Количество исследованных портов ГРП варьировалось от нуля (непрохождение прибора в горизонтальный ствол скважины) до 10. В ходе исследований приходилось иметь дело со всеми возможными типами пластового флюида: одно-, двух- и трехфазными потоками. Анализ результатов исследований выявил большое многообразие траекторий ГС с МГРП и длин горизонтальных участков скважины. Исследования проводились при различных значениях дебита/приемистости и депрессии/репрессии в ГС с МГРП.

Среди основных проблем получения качественных результатов ПГИ можно выделить следующие:

- загрязнение горизонтального ствола, непрохождение прибора до текущего забоя;
- необоснованный подход к выбору технологии проведения исследований;
- применение аппаратуры, не рассчитанной для исследования действующих горизонтальных скважин;
- неблагоприятные геолого-промысловые условия для получения качественных результатов.

Опыт проведения ПГИ был использован для разработки матрицы, которая представляет собой критерии применения методов ПГИ в ГС с МГРП. В зависимости от типа решаемой задачи, конструкции скважины, состава флюида, величины притока из пласта и других параметров, матрица позволяет рекомендовать комплекс геофизических приборов и технологию их доставки на забой скважины. Кроме этого, с помощью матрицы можно провести предварительную оценку результативности ПГИ в ГС с МГРП.

Помимо классических методов исследований были испытаны методы спектральной шумомерии и пакерной расходомерии на низкодебитном фонде скважин. Как итог, результаты опытно-промышленных работ позволили расширить область применения классических технологий проведения ПГИ.

Матрица выбора технологий ПГИ

Основной целью промысловых геофизических исследований горизонтальных скважин с МГРП является выделение работающих интервалов, определение состава и дебита поступающего флюида, а также решение сопутствующих задач, например, оценка герметичности хвостовика.

Всего было выделено 22 метода ПГИ для решения 17 задач (табл. 1). Для каждого метода рассчитывалась применимость, которая зависит:

- от типа задачи (табл. 1);
- состава флюида (табл. 2);
- характерного дебита (учитывается как дебит скважины, так и притоки из каждого порта, рассчитанные на основе известной конструкции, числа портов и априорного распределения профиля притока (табл. 2);
- депрессии (табл. 2);
- режима течения в хвостовике и порте (табл. 2).

Общая информативность метода определялась на основе его применимости для всех решаемых задач. Вероятность успешного решения задачи определялась количеством и информативностью приборов, которые выбраны для проведения ПГИ. При этом учитывалась возможность получить бо-

лее качественную информацию за счет дублирования приборов в геофизической связке.

Перечень методов ПГИ и интерпретируемые ими параметры, которые используются в матрице выбора методов, следующие:

- гамма-каротаж (ГК) – привязка к разрезу;
- локатор муфт (ЛМ) – расположение муфт по стволу;
- манометр (МН) – давление;
- термометр локальный (Т) и распределенный по сечению ствола скважины (T_{\downarrow}) – температура;
- резистивиметр локальный (Рез лок.) и распределенный по сечению ствола скважины (Рез \downarrow) – доля воды в жидкости;
- влагомер локальный (Вл. лок) и распределенный по сечению ствола скважины (Вл \downarrow) – доля воды в жидкости;
- датчик газа распределенный (ДГ \downarrow) – доля газа в смеси;
- гамма-гамма плотномер (ГГП) – плотность;
- расходомер локальный (РГД лок.), объемный (РГД \downarrow), пакерный (РГД пак.) и радиальный (РГД \leftrightarrow) – скорость потока флюида;
- термоанемометр локальный (СТИ лок.) и распределенный по сечению ствола скважины (СТИ \downarrow) – скорость потока флюида;
- акустический шумомер непрерывный (АШ н) и спектральный (АШ спек.) – наличие притока;
- внутренний диаметр ствола (\emptyset);
- ориентация прибора в пространстве (xyz);
- линейное ускорение прибора ($a\leftrightarrow$).

В табл. 1 представлен сравнительный рейтинг применимости методов ПГИ в зависимости от типа решаемой задачи. Каждому методу ставится в соответствие число в интервале от нуля до 1 в зависимости от того, насколько он является информативным при решении конкретной задачи (если, к примеру, информативность 0,9 – это означает, что 90 замеров из 100 будут соответствовать истинным значениям). Все методы разделены на три группы с помощью цветовой палитры: методы, которые являются основными при проведении исследований, выделены зеленым цветом, вспомогательные методы выделены желтым цветом, наконец, методы, которые неинформативны и имеют нулевой рейтинг, цветом не выделяются. Табл. 1 не позволяет определить суммарный рейтинг приборного комплекса ПГИ (потому что рейтинги отдельных методов не складываются), но помогает отсеять заведомо неинформативные или малоинформативные методы ПГИ и качественно сравнить информативность нескольких приборных связок при решении конкретной задачи.

Таблица 1. Критерии выбора методов ПГИ в ГС в зависимости от типа решаемой задачи

Table 1. Criteria for selecting methods of production logging in a horizontal well, depending on the type of problem being solved

Задачи Tasks	Методы ПГИ Methods																			Геометрия и ориентация Geometry and orientation				
	ГК/ГК	ЛМ/КЛ	МН/Р	Т	Т↑	Рез лок./Res.loc.	Рез ↓/Res.↓	Вл лок./НМ loc.	Вл ↓/НМ↓	ДГ ↓/GS↓	ГПП/СРР	РГД лок./FML loc.	РГД об./FML vol.	РГД пак./FML pac.	РГД ↓/FML↓	РГД ↔/FML↔	СТИ лок./STI loc.	СТИ ↑/STI↑	АШ н/ANM con.	АШ спек./ANM spec.	∅	хyz	а ↔	
Привязка к разрезу Binding to the formation	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Привязка к конструкции Binding to the construction	0	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0,1
Контроль траектории скважины Well trajectory monitoring	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,8	0,1	
Локализация интервалов притока Localization of inflow intervals	0	0	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,4	0,5	0,4	0,5	0,05	0,3	0,1	
Идентификация состава флюида в хвостовике Identification of fluid composition	0	0	0,3	0	0	0,8	0,9	0,8	0,9	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	
Поинтервальный профиль притока Point-to-point inflow profile	0	0	0,3	0,2	0,3	0,05	0,1	0,05	0,1	0	0	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,4	0,5	0,2	0,3	0,05	0,3	0,05	
Поинтервальный состав притока Point-to-point inflow composition	0	0	0,3	0,2	0,3	0,5	0,9	0,5	0,9	0,5	0,05	0	0	0	0	0,2	0,3	0	0	0	0	0,3	0	
Локализация притока газа Gas inflow localization	0	0	0,3	0,4	0,5	0,05	0,1	0,05	0,1	0,9	0,3	0,7	0,8	0,8	0,9	0,3	0,4	0,5	0,5	0,8	0,05	0,3	0,05	
Локализация притока воды Water inflow localization	0	0,3	0,3	0,2	0,3	0,8	0,9	0,8	0,9	0	0,5	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,4	0,5	0,1	0,15	0,05	0,3	0,05	
Оценка герметичности пакера хвостовика Assessment of packer tightness	0	0	0,3	0,4	0,5	0	0,2	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,05	0,3	0	
Оценка интервала ЗКЦ в пределах ГС Estimation of the backflow interval within a horizontal borehole	0	0,3	0,3	0,8	0,9	0	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,8	0,05	0,3	0	
Оценка интервала ЗКЦ в голове хвостовика Estimation of behind-the-casing flow interval in a horizontal wellbore hanger	0	0	0,3	0,8	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,8	0,05	0,3	0	
Оценка суммарного дебита Total flow rate estimation	0	0	0,3	0	0	0	0,3	0	0,3	0,5	0	0,7	0,8	0,9	0,9	0	0	0	0	0	0,05	0,3	0,05	
Профиль приемистости Injectivity profile	0,15	0,3	0,3	0,3	0	0,05	0	0,05	0	0	0	0,7	0,8	0,8	0	0,9	0,5	0	0,3	0,3	0,05	0,3	0,05	
Локализация интервалов ухода при закачке Localization of care intervals during injection	0	0	0,3	0,5	0	0,05	0	0,05	0	0	0,05	0,7	0,8	0	0	0,9	0,5	0	0,3	0,3	0,05	0,3	0,05	
Локализация интервалов поглощения в пласт Localization of absorption intervals in the formation	0,15	0	0,3	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,05	0,3	0,05	
Локализация интервалов ЗКЦ в нагнетательной скв. Localization of the backflow interval in the injection well	0,15	0	0,3	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,05	0,3	0,1	

Таблица 2. Критерии выбора методов ПГИ в ГС в зависимости от скважинных условий

Table 2. Criteria for selecting methods of production logging in a horizontal well depending on well conditions

Состав флюида Fluid composition	Дебит, м ³ /сут Flow rate, m ³ /day	Перепад тем- ператур Temperature difference, °C	ГК/ГК	ЛМ/КЛ	МН/Р	Т	Т↑	Рез лок./Res.loc.	Рез↑/Res.↑	Вл лок./НМloc.	Вл↑/НМ↑	ДГ↑/GS↑	ГП/ГП	РГД лок./FMLloc.	РГД об./FMLvol.	РГД пак./FMLpac.	РГД↑/FML↑	РГД↔/FML↔	СТИ лок./STI loc.	СТИ↑/STI↑	АШн/ANMcon.	АШ спек./ANMspec.	Ø	xyz	a ↔
нефть или вода oil or water	≤50	<0,1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	½	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	
	≤50	>0,5	1	1	1	½	1	1	1	1	1	0	½	0	0	1	0	0	0	0	½	½	1	1	
	>100	<0,1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	½	1	1	0	1	1	½	½	0	0	1	1	
	>100	>0,5	1	1	1	½	1	1	1	1	1	0	½	1	1	0	1	1	½	½	½	½	1	1	
нефть+вода oil+water	≤50	<0,1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	½	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	
	≤50	>0,5	1	1	1	½	1	1	1	1	1	0	½	0	0	1	0	0	0	0	0	½	1	1	
	>100	<0,1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	½	1	1	0	1	1	½	½	0	0	1	1	
	>100	>0,5	1	1	1	½	1	1	1	1	1	0	½	1	1	0	1	1	½	½	½	½	1	1	
жидкость+газ liquid+gas	≤50	<0,1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	
	≤50	>0,5	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	½	1	1	1	
	>200	<0,1	1	1	1	0	0	0	½	0	½	1	0	½	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
	>200	>0,5	1	1	1	1	1	0	½	0	½	1	0	½	1	0	1	1	1	1	½	1	1	1	

В табл. 2 рейтинг методов ПГИ приводится в зависимости от типа флюида (нефть, вода, смесь нефти и воды для соотношений, смесь жидкости и газа для соотношений), дебита жидкости и ожидаемого перепада температур в пласте и стволе скважины. Ожидаемый перепад температур для смеси пропорционален депрессии на пласт и может быть вычислен через массовое содержание ее компонентов и перепад температур. Перепад температур рассчитан отдельно для воды, нефти и газа с помощью коэффициента Джоуля–Томсона, который для воды приблизительно равен 0,02 °C/атм, для нефти – 0,04 °C/атм, для попутного газа – 0,3 °C/атм. Если дебит или ожидаемый перепад температур не попадают в установленные табл. 2 интервалы значений, то рейтинг метода ПГИ для типа флюида усредняется. Для этого используется линейная интерполяция между крайними точками: например, если рейтинг метода при дебите до 50 м³/сут равен 0,5, а при дебите более 100 м³/сут – 1, то для дебита 70 м³/сут он будет равен 0,7. Как следует из табл. 2, некоторые методы, например, расходомеры (за исключением пакерного) не информативны при низких дебитах, другие, например, термометры, работают только в условиях достаточной депрессии. На третьи, например, ЛМ и ГК, методы привязки вообще не оказывают никакого влияния.

Матрица выбора средств доставки приборов и технологий ПГИ ГС с МГРП

Наиболее широкое распространение имеют следующие технологические приемы транспортировки скважинной аппаратуры на забой скважины [16]: гибкие насосно-компрессорные трубы (ГНКТ), за-

бойный трактор, жесткий кабель (ЖК), «Латераль», геофизический кабель.

Опыт применения различных средств доставки показал наличие существенных недостатков для любой из схем в зависимости от геолого-промысловых условий месторождений. В частности, жесткий кабель и «Латераль» не работоспособны при наличии буферного давления на устье и ограниченно применимы при длине горизонтального ствола более 300 м. Применение специальной компоновки труб в комплексе «Латераль» при благоприятных условиях увеличивает проходимость по длине ГС до 600–800 м. Однако работа с комплексом «Латераль» через колонну НКТ в условиях отложений парафина и смол резко увеличивает вероятность аварии за счет прихвата труб комплекса по муфтам при подъеме. В связи с этим область применения этих способов ограничена территорией старых нефтяных месторождений Урало-Поволжья и Западной Сибири, где исследования проводятся в скважинах с высоким уровнем обводнения продукции и малой длиной ГС, в том числе в скважинах с боковым стволом.

Технология ГНКТ зарекомендовала себя как универсальное средство транспортировки скважинной аппаратуры в условиях горизонтальных стволов в Западной Сибири при наличии обустроенных дорог, необходимых для транспортировки тяжелой техники. Она используется при наличии буферного давления, свободного газа в продукции и длине горизонтальных стволов до 1000–1500 м. Одно из ограничений к применению – значительное гидродинамическое сопротивление потока в межкольецевом пространстве между внешней стен-

кой ГНКТ и внутренней стенкой НКТ. Этот эффект проявляется при исследовании высокодебитных скважин, работающих в режиме фонтанирования, когда спуск прибора в ГС существенно нарушает режим работы скважины, вплоть до полной остановки скважины.

В практике геофизических исследований действующих горизонтальных скважин со сложной траекторией и длинными горизонтальными стволами (более 1000 м) хорошо зарекомендовали себя забойные трактора. Дополнительным преимуществом забойного трактора является его мобильность, что обеспечивает возможность его транспортировки к месту проведения работ при отсутствии дорожной сети вертолетом или легким наземным транспортом. Учитывая значительное тепловыделение в приводе трактора и его расположение за скважинным прибором, основные замеры выполняются на первом спуске, когда возмущающее влияние сборки «трактор+прибор» на структуру потока и температурное поле минимальны. Замер на подъеме нецелесообразен и проводится преимущественно для привязки к разрезу и конструкции скважины.

Применение жесткого геофизического кабеля к горизонтальным скважинам сильно ограничено. В редких случаях с помощью жесткого кабеля удается доставить комплекс приборов для ПГИ в скважину на расстояние не более 200 м по горизонтальному участку ствола. Традиционный геофизический кабель в условиях ГС практически неприменим, исключения составляют боковые стволы с ограничением по углу в пределах до 65 градусов при малой их длине.

Опыт применения других технологий доставки геофизических приборов на забой скважины (например, шлангокабеля) незначительный, решение о возможности их применения основано на сопоставлении заявленных характеристик этих технологий с характеристиками технологий, описанных выше.

Исходя из проанализированного опыта, были сформированы рекомендации по доставке приборов в виде матрицы применения. Рекомендации строятся на основе вероятности успеха, который зависит от траектории скважины, длины горизонтального участка, способа эксплуатации/освоения, диаметров прибора и диаметра фрезы, количества локальных перегибов, если траектория скважины волнообразная.

Если вероятность успеха для нескольких способов доставки приборов превышает минимально допустимое значение, то учитывается относительная стоимость способа.

В табл. 3 представлен рейтинг способов доставки геофизических приборов в зависимости от тра-

ектории горизонтальной ствола скважины. Рейтинг конкретного способа доставки определяется как произведение рейтингов по траектории, способу эксплуатации/освоения, дополнительным ограничениям и относительной стоимости. Способ доставки рекомендуется к применению, если его рейтинг равен максимальному рейтингу среди всех способов: 0 означает, что данный способ не применим, 0,25 – применим в редких случаях, 0,5 – применим с ограничениями, >0,75 – применим в большинстве случаев.

Кроме траектории скважины при выборе способа доставки геофизических приборов на забой скважины используются другие формализованные критерии, учитывающие способ эксплуатации (фонтан, электроцентробежный насос, штанговый насос, струйный насос), дебит скважины, наличие Y-tool, загрязнение ствола скважины и т. д., которые в данной статье не приводятся.

Полученные матрицы выбора методов ПГИ (табл. 1, 2) и средств доставки приборов (табл. 3) были объединены в единую экспертную систему, которая позволила выбирать лучшие технологии ПГИ в ГС с МГРП в зависимости от исходных данных и сценарных условий.

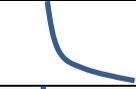
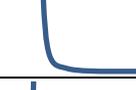
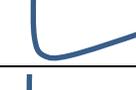
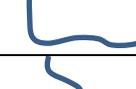
Опыт применения спектральной шумометрии и пакерного расходомера на месторождениях ПАО «НК «Роснефть»

В ряде случаев, когда традиционные методы ПГИ малоэффективны, к примеру, работа осевого расходомера ограничена порогом страгивания (~20 м³/сут в условиях хвостовика внутреннего диаметра 98 мм), при движении прибора от пятки к носку дебит жидкости снижается, и чем ниже общий дебит всех интервалов горизонтальной скважины, тем раньше наступит момент по стволу скважины, где показания расходомера будут не информативны, так как приток жидкости будет ниже величины порога страгивания). Поэтому рекомендуется применение спектральной шумометрии в качестве вспомогательного метода оценки работы портов (интервалов), выявления заколонных перетоков и негерметичности пакера в затрубном пространстве (в нецементируемых хвостовиках) в скважинах с МГРП.

Спектральная шумометрия позволяет определить природу звука, связав его происхождение с возможным источником, который может локализоваться в ближней зоне пласта, элементах конструкции скважины или непосредственно в скважине [17–19]. Однако полученные таким образом диапазоны частот описывают идеальные скважинные условия (однородная среда, жидкость, отсутствие механических примесей в потоке), для реальных скважинных условий данные диапазоны требуют научного обоснования.

Таблица 3. Вероятность прохождения прибора в стволе ГС при различных траекториях

Table 3. Probability of tool passage in the wellbore in a horizontal well for different trajectories

Траектория Trajectory		Длина, м Length, m	Средства доставки/Delivery means				
			ГНКТ Flexible tubing	ЖК Hard cable	Латераль Lateral	Трактор Tractor	Кабель Cable
Ниспадающая с углом более 65 градусов Drop-down angle greater than 65 degrees		<200	0,9	0,9	0,9	0,9	0,25
		200–800	0,9	0,5	0,5	0,9	0
		>800	0,9	0,1	0,1	0,9	0
Горизонтальная Horizontal		<200	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1
		200–800	0,9	0,25	0,25	0,9	0
		>800	0,9	0,1	0	0,9	0
Восходящая Ascending		<200	0,9	0,5	0,5	0,9	0,1
		200–800	0,7	0,1	0,1	0,9	0
		>800	0,5	0	0	0,9	0
Волнообразная Undulating		<200	0,9	0,5	0,5	0,9	0,1
		200–800	0,5	0,1	0,1	0,8	0
		>800	0,1	0	0	0,7	0
Наклонная с выходом на горизонт Inclined with access to the horizon		>500	0,9	0,1	0,5	0,9	0

Проведенный анализ данных спектральной шумометрии на качественном уровне показывает работу портов (трещин ГРП) в различных частях горизонтального ствола скважины (рисунок, характеристика приводится в виде цветной палитры, отображающей интенсивность возмущений в интервалах глубин и частот регистрируемого сигнала; палитра сигнала состоит из набора цветов в порядке уменьшения интенсивности возмущений: красный, желтый, зеленый, голубой, синий и белый, соответствующий уровню несущественных значений). По-

вышенный уровень интенсивности сигнала акустического шумомера (АШ) не только в области муфт ГРП, но и вне ее, может быть связан с несовпадением положений трещины ГРП и муфты в скважинах с незацементированным заколонным пространством. Таким образом, по результатам спектральной шумометрии можно оценивать положение трещины ГРП по длине ГС. При этом достоверность такой оценки существенно повышается, если пики интенсивности АШ совпадают с аномалиями метода термометрии.

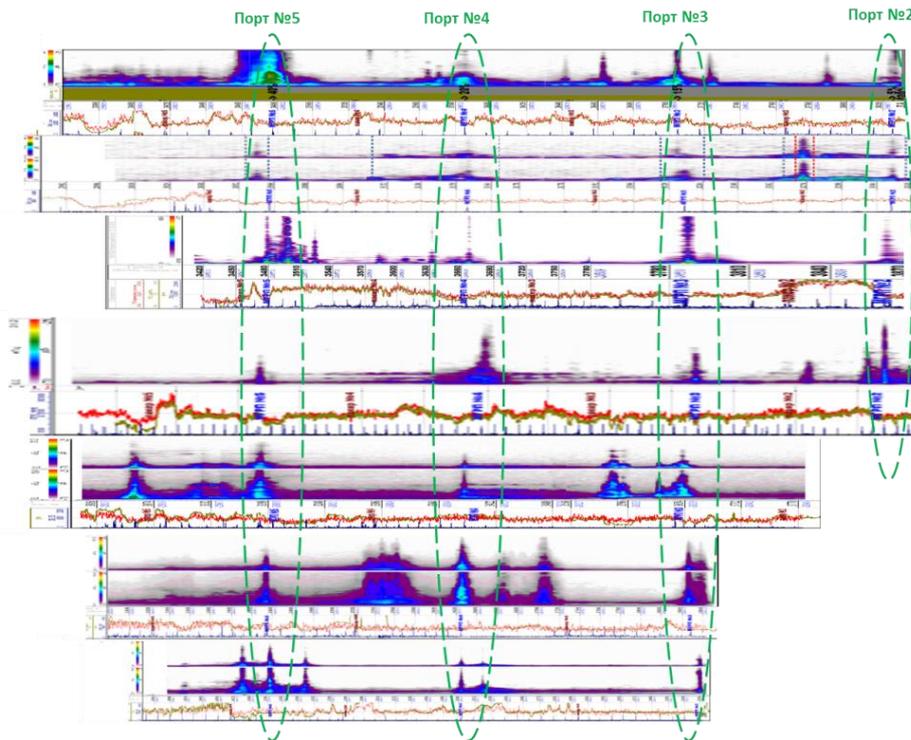


Рисунок. Акустические аномалии в интервалах портов МГРП с продольными трещинами

Figure. Acoustic anomalies in the intervals of ports of multi-stage hydraulic fracturing with longitudinal fractures

Применение классического метода расходомерии оправдано в высокодебитных скважинах (скорость потока флюида в большей части ствола скважины заведомо выше порога страгивания), когда режим течения турбулентный или смешанный и скорости фаз (воды и нефти) совпадают. В условиях расслоенного потока результат работы одиночной турбинки не обеспечивает возможность определения истинного расхода. Это обусловлено наличием «порога страгивания» турбинки – нижней границы применимости расходомера, которая зависит от вязкости флюида и диаметра ствола скважины. В этой связи распространено мнение о том, что в ГС с МГРП наибольший приток флюида поступает из пяточной части горизонтального ствола скважины, не является обоснованным [20]. Также данные микросейсмического мониторинга ГС с продольными трещинами ГРП с гидравлическими или набухающими пакерами показывают прорыв жидкости ГРП по заколонному пространству и создание гидродинамической связанности между заколонными пакерами [10].

В качестве альтернативы классическому методу расходомерии было рассмотрено применение одной из приоритетных технологий ПГИ – пакерной расходомерии. Нижний предел замера (порог страгивания) пакерных расходомеров достигает

$1 \text{ м}^3/\text{сут}$. В условиях гравитационного расслоения фаз жидкости в горизонтальных стволах устройство локализует весь поток через канал в приборе, что приводит к перемешиванию фаз и нивелированию негативного влияния расслоенного потока. Основные риски при использовании пакерных расходомеров связаны с «прихватом» прибора и созданием дополнительного перепада давления при больших скоростях потока.

Заключение

1. Основная причина низкой информативности результатов ПГИ в горизонтальных скважинах с МГРП связана с неудовлетворительной подготовкой скважин к проведению исследований, некорректным выбором технологии исследования и способа доставки приборного комплекса на забой скважины.
2. С учетом информативности отдельных методов разработана матрица выбора приборного комплекса для проведения геофизических исследований в ГС с МГРП.
3. Разработана матрица выбора способов доставки геофизических приборов в ГС с МГРП при различных траекториях скважины, режимах эксплуатации и технологических ограничениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидродинамические методы исследования скважин в рядной системе разработки на месторождении с низкопроницаемым коллектором / Г.Ф. Асалхузина, А.Я. Давлетбаев, Р.И. Абдуллин и др. // Нефтегазовое дело. – 2021. – Т. 19. – № 3. – С. 49–58.
2. Комплексные исследования трассерных технологий в пластовых условиях / М. Дулкарнаев, К. Овчинников, А. Гурьянов, А. Анопов, Е. Малявко // Ежегодная Каспийская техническая конференция и выставка SPE. – Астана, Казахстан, октябрь 2018. – SPE-192564-MS.
3. Implementation of tracer-based production logging technology for 3 phases inflow profiling in offshore extended reach drilled wells / K. Ovchinnikov, E. Malyavko, N. Husein, O. Gorbokonenko, P. Buzin, R. Gazizov // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 2020. – SPE-203030-MS.
4. Мухаметшин И.Р., Нухаев М.Т., Семикин Д.А. Исследования горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта при помощи химических индикаторов притока, установленных на элементах заканчивания // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 3. – С. 46–49.
5. Сопоставление промыслово-геофизических и трассерных методов исследований для контроля профиля притока в горизонтальных скважинах с многостадийным ГРП / З. Калуджер, К.В. Торопов, Р.Р. Муртазин, А.В. Сергейчев, А.Г. Климентьев, Р.М. Тугушев, Р.Г. Хадиев // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 38–41.
6. Advanced reservoir characterization in Vaca Muerta using chemical tracer technology / P. Panichelli, J.R. Martínez, P. Crespo, I.L. Noguera, M. Chatterjee // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 2017. – SPE-188923-MS.
7. Advanced reservoir characterization in antelope shale using chemical tracer technology / M.K. Lal, A.K. Singh, J. Ezernack, J. Spencer // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. – Texas, USA, January 2017. – SPE 184819-MS.
8. Яскевич С.В., Гречка В.Ю., Дучков А.А. Обработка данных микросейсмического мониторинга геодинамических событий с учетом сейсмической анизотропии массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 6. – С. 41–52.
9. Van der Baan M., Eaton D., Dusseault M. Microseismic monitoring developments in hydraulic fracture stimulation // ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing. – Brisbane, Australia, May 2013. – ISRM-ICHF-2013-003.
10. Микросейсмический мониторинг многостадийного гидроразрыва пласта в условиях сложнопостроенных коллекторов Волго-Уральского региона России / А. Конопелько, В. Суковатый, А. Митин, А. Рубцова // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE. – М., Россия, октябрь 2015. – SPE-176710-RU.
11. Downhole camera run validates limited entry fracturing technique and improves pay coverage in deep tight laminated gas reservoir of Western India / Vishal Ranjan, Sanjeev Vermani, Aman Goyal, Shashank Pathak, Rajat Goyal, Diego Camilo Casallas Gelvez, Atul Singh, Shreya Pandey, Glyn Roberts, Ruchir Mehta // International Petroleum Technology Conference. – Riyadh, Saudi Arabia, February 2022. – IPTC-22502-MS.

12. Кременецкий М.И., Ипатов А.И. Применение промыслово-геофизического контроля для оптимизации разработки месторождений нефти и газа. Т. 1. Основы гидродинамико-геофизического контроля разработки и мониторинга добычи. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2020. – 676 с.
13. Научно-методические подходы для повышения эффективности разработки низкопроницаемых нефтяных коллекторов с применением горизонтальных скважин с множественным ГРП на территории деятельности ООО «РН-Юганскнефтегаз» / А.В. Колонских, К.В. Торопов, А.В. Сергейчев, Р.Р. Муртазин, А.С. Топольников, М.С. Антонов, Р.Г. Хадиев // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE. – М., Россия, Октябрь 2019. – SPE-196755-RU.
14. Топольников А.С., Михайлов В.Г., Яруллин А.Р. Исследование многофазных течений в горизонтальной скважине с многостадийным гидроразрывом пласта // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 8. – С. 53–57.
15. New possibilities of well testing and production logging in horizontal wells with non-uniform inflow profile / M.I. Kremenetsky, S.I. Melnikov, A.I. Ipatov, A.A. Kolesnikova, A.A. Shorohov, A.V. Buyanov, K.Z. Musaleev // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, October 2017. – SPE-187752-MS.
16. Нагаева С.Н., Джабраилов Л.М. Доставка геофизической аппаратуры в горизонтальный участок с помощью скважинного трактора // Вестник Югорского государственного университета. – 2016. – Вып. 3 (42). – С. 77–81.
17. Evaluation of hydraulic fracturing effectiveness by combined analysis of spectral noise logging and high precision temperature logging data and subsequent numerical temperature modelling / R. Castiblanco, E.G. Ibrahim, A. Moiseenkov, I.H. Waili, F. Niyadi, Y. Al Ramidhi, I. Al Farei, Y. Nabhani, R.B. Lukmanov, M. Al-Hashemi, S. Aristov, S. Uralsky, R. Makhyanov, V. Skutin // SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. – Muscat, Oman, October 2018. – SPE-191446-18IHFT-MS.
18. Скважинная шумометрия как энергосберегающая инновационная технология / А.М. Асланян, И.Ю. Асланян, Р.Р. Кантюков, Р.Н. Минахметова, Р.С. Никитин, Д.К. Нургалиев, С.В. Сорока // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14. – № 2. – С. 8–12.
19. Informative value and interpretation reliability of wide frequency range acoustic noise technique in operating horizontal wells / R.K. Yarullin, R.A. Valiullin, A.R. Yarullin, V.V. Shako, M.M. Bikkulov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Virtual, October 2021. – SPE-206619-MS.
20. Искибаев Р.Э. Анализ профиля притока горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей XXX Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2019. – С. 8–12.

Информация об авторах

Андрей Сергеевич Топольников, кандидат физико-математических наук, эксперт отдела цифровой трансформации комплексного управления активом ООО «РН-БашНИПИнефть», Россия, 450006, г. Уфа, ул. Ленина, 86/1. TopolnikovAS@bnipi.rosneft.ru

Рашид Камилевич Яруллин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики физико-технического института, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. RK@geotek.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7949-3503>

Рамиль Равилевич Муртазин, кандидат физико-математических наук, эксперт отдела проектирования разработки АО «ИГиРГИ», Россия, 117312, г. Москва, ул. Вавилова, 25, к. 1; доцент кафедры разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. RR_Murtazin@igirgi.rosneft.ru

Константин Витальевич Торопов, главный специалист ПАО «НК «Роснефть», Россия, 117997, г. Москва, Софийская набережная, 26/1. k_toropov@rosneft.ru

Поступила в редакцию: 07.06.2023

Поступила после рецензирования: 15.09.2023

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Asalkhuzina G.F., Davletbaev A.Ya., Abdullin R.I., Gareev R.R., Shiman A.P., Loshak A.A., Filev M.O. Welltesting for a linear development system in low permeability formation. *Oil industry*, 2021, no. 3, pp. 49–58. (In Russ.)
2. Dulkarnaev M., Ovchinnikov K., Gurianov A., Anopov A., Malyavko E. The First Comprehensive Study of tracer-based technologies in reservoir conditions. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2019. 15 p. (In Russ.)
3. Ovchinnikov K., Malyavko E., Husein N., Gorbokonenko O., Buzin P., Gazizov R. Implementation of Tracer-Based Production Logging Technology for 3 Phases Inflow Profiling in Offshore Extended Reach Drilled Wells. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, 2020. 12 p.
4. Mukhametshin I.R., Nukhaev M.T., Semikin D.A. Monitoring lateral wells with multi-stage fracturing using the chemical markers embedded in completion equipment. *Oil industry*, 2018, no. 3, pp. 46–49. (In Russ.)
5. Kaludzher Z., Toropov K.V., Murtazin R.R., Sergeychev A.V., Klimentev A.G., Tugushev R.M., Hadiev R.G. Comparison of field-geophysical and tracer methods to control the inflow profile in horizontal wells with multistage hydraulic fracturing. *Oil industry*, 2019, no. 9, pp. 38–41. (In Russ.)
6. Panichelli P., Martínez J. R., Crespo P., Noguera I. L., Chatterjee M. Advanced Reservoir Characterization in Vaca Muerta using Chemical Tracer Technology. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, 2017. 12 p.

7. Lal M.K., Singh A.K., Ezernack J., Spencer J. Advanced reservoir characterization in antelope shale using chemical tracer technology. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*. Texas, USA, 2017. 12 p.
8. Yaskevich S.V., Grechka V.Yu., Duchko A.A. Processing microseismic monitoring data considering seismic anisotropy of rocks. *Journal of Mining Sciences*, 2014, no. 6, pp. 41–52. (In Russ.)
9. Van der Baan M., Eaton D., Dusseault M. Microseismic monitoring developments in hydraulic fracture stimulation. *ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*. Brisbane, Australia, 2013. pp. 439–466.
10. Gutman S., Arefyev S., Mitin A., Rubtsova A. Microseismic monitoring of multistage hydraulic fracturing in complex reservoirs of the Volgo-Urals region of Russia. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2015. 19 p. (In Russ.)
11. Vishal Ranjan, Sanjeev Vermani, Aman Goyal, Shashank Pathak, Rajat Goyal, Diego Camilo Casallas Gelvez, Atul Singh, Shreya Pandey, Glyn Roberts, Ruchir Mehta. Downhole camera run validates limited entry fracturing technique and improves pay coverage in deep tight laminated gas reservoir of Western India. *International Petroleum Technology Conference*, 2022.
12. Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I. *Application of production and geophysical control for optimization of oil and gas field development. Vol 1. Fundamentals of hydrodynamic and geophysical control of development and production monitoring*. Izhevsk, Institute for Computer Research Publ., 2020. 676 p. (In Russ.)
13. Kolonsky A., Toropov K., Sergeychev A., Murtazin R., Topolnikov A., Antonov M., Khadiyev R. Scientific and methodological approaches to improve the development of low-permeability oil reservoirs using horizontal wells with multiple hydraulic fracturing on the territory of LLC RN-Yuganskneftegaz activity. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2019. 8 p. (In Russ.)
14. Topolnikov A.S., Mikhaylov V.G., Yarullin A.R. The research of multiphase flow in a horizontal well with multiple hydraulic fracturing. *Oil industry*, 2021, no. 8, pp. 53–57. (In Russ.)
15. Kremenetskiy M.I., Melnikov S.I., Ipatov A.I., Kolesnikova A.A., Shorohov A.A., Buyanov A.V., Musaleev K.Z. New possibilities of well testing and production logging in horizontal wells with non-uniform inflow profile. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2017. 20 p.
16. Nagaeva S.N., Dgabrailov L.M. Delivery of geophysical equipment in the horizontal section by means of a down hole tractor. *Yugra State University Bulletin*, 2016, vol. 12, no. 3, pp. 77–81. (In Russ.)
17. Castiblanco R., Ibrahim E.G., Moiseenkov A., Waili I.H., Niyadi F., AL Ramidhi Y., Al Farei I., Nabhani Y., Lukmanov R.B., Al-Hashemi M., Aristov S., Uralsky S., Makhiyanov R., Skutin V. Evaluation of hydraulic fracturing effectiveness by combined analysis of spectral noise logging and high precision temperature logging data and subsequent numerical temperature modelling. *SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*. Muscat, Oman, 2018. 15 p.
18. Aslanyan M., Aslanyan I.Yu., Kanyukov R.R., Minakhmetova R.N., Nikitin R.S., Nurgaliyev D.K., Soroka S.V. Well noise logging as an energy saving innovation technology. *Oil and Gas Engineering*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 8–12. (In Russ.)
19. Yarullin, R.K., Valiullin, R.A., Yarullin, A.R., Shako, V.V., Bikkulov, M.M. Informative value and interpretation reliability of wide frequency range acoustic noise technique in operating horizontal wells. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, 2021. SPE-206619-MS.
20. Iskibaev R.E. Analysis of the profile of inflow of horizontal wells with multistage hydraulic fracturing. *Collection of articles of the XXX International scientific-practical conference. Modern technologies: current issues, achievements and innovations*. Penza, 2019. pp. 8–12. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey S. Topolnikov, Cand. Sc., Expert, LLC «RN-BashNIPIneft», 86/1, Lenin street, Ufa, 450006, Russian Federation. TopolnikovAS@bnipi.rosneft.ru

Rashid K. Yarullin, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. RK@geotek.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7949-3503>

Ramil R. Murtazin, Cand. Sc., Expert, JTC «IGiRGI», 25 bld. 1, Vavilov street, Moscow, 117312, Russian Federation; Associate Professor, Ufa State Oil Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russian Federation. RR_Murtazin@igirgi.rosneft.ru

Konstantin V. Toropov, Chief Specialist, PJSC «NK «Rosneft», 26/1, Sofiyskaya embankment, Moscow, 117997, Russian Federation. k_toropov@rosneft.ru

Received: 07.06.2023

Revised: 15.09.2023

Accepted: 10.04.2024

УДК 662.74
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4547
Шифр специальности ВАК: 01.04.14

Характеристики и условия воспламенения влажных угольных частиц при высокотемпературном нагреве

Ж.А. Косторева[✉], С.В. Сыродой, А.А. Омаров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]zhanna.kostoreva@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. На сегодняшний день всё большее внимание мирового сообщества уделяется проблемам экологии и глобального потепления. Возникают объективные предпосылки для более активного внедрения в цикл производства тепловой и электрической энергии возобновляемых источников энергии и энергоносителей. Но нетрадиционные источники энергии, такие как ветрогенераторы и солнечные панели, имеют ряд существенных недостатков, главный из которых – стабильность работы возобновляемых источников энергии существенно зависит от погодных условий и времени суток. По этой причине уже сейчас правительствами многих государств обсуждаются новые программы развития энергетического сектора экономики на основе масштабного строительства атомных и тепловых электрических станций. Решить эту глобальную проблему можно при переходе на более широкое использование угля как энергоносителя. Угольные ТЭС обеспечивают стабильное производство тепловой и электрической энергии, в отличие от возобновляемых источников энергии. Но уголь является «грязным» топливом – при его сжигании образуются значительные объемы антропогенных выбросов, таких как диоксида углерода, а также оксиды серы и азота. **Цель:** экспериментальные исследования условий и характеристик воспламенения (времен термической подготовки) увлажненного угля нескольких достаточно распространенных и широкого используемых марок и количество оксида азота в их продуктах сгорания. **Объект:** уголь увлажненный четырех марок (тощий, длиннопламенный, антрацит и бурый). **Метод.** Для установления основных характеристик и условий процесса зажигания и горения угольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева использовался специальный экспериментальный стенд. **Результаты** исследования обосновывают возможность использования в теплоэнергетике в качестве основного топлива увлажненных углей четырех марок. Установлено секвестирование оксида азота в продуктах сгорания последних в малой окрестности частицы увлажненного угля по сравнению с сухим углем, в условиях высоких температур. Также в экспериментальных исследованиях установлено незначительное (увеличение не более 11 %) влияние дополнительной влаги на времена термической подготовки одиночных угольных частиц для четырех исследуемых марок угля.

Ключевые слова: уголь, влажность, энергоэффективность, время термической подготовки, нагрев, тепло- и массоперенос, антропогенные оксиды

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 23-79-01067).

Для цитирования: Косторева Ж.А., Сыродой С.В., Омаров А.А. Характеристики и условия воспламенения влажных угольных частиц при высокотемпературном нагреве // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 85–94. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4547

UDC 662.74
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4547

Characteristics and conditions of ignition of wet coal particles during high-temperature heating

Zh.A. Kostoreva[✉], S.V. Syrodoy, A.A. Omarov

[✉]zhanna.kostoreva@yandex.ru

Abstract. Relevance. Today, increasing attention of the world community is being paid to the problems of ecology and global warming. Objective prerequisites are emerging for more active introduction of renewable energy sources and energy carriers into thermal and electrical energy production cycle. But non-traditional energy sources, such as wind generators and solar panels, have a number of significant disadvantages, the main one of which is that the stability of renewable energy sources depends significantly on weather conditions and time of day. For this reason, the governments of many countries are already discussing new programs for the development of the economy energy sector based on the large-scale construction of nuclear and thermal power plants. This global problem can be solved by switching to wider use of coal as an energy source. Coal thermal power plants provide stable production of thermal and electrical energy, unlike renewable energy sources. But coal is a “dirty” fuel – when it is burned, it produces significant amounts of anthropogenic emissions, such as carbon dioxide, as well as sulfur and nitrogen oxides. **Aim.** Experimental studies of the conditions and characteristics of ignition (thermal preparation times) of humidified coal of several fairly common and widely used brands and the amount of nitrogen oxide in their combustion products. **Object.** Humidified coal of four grades (lean, long-flame, anthracite and brown). **Method.** To establish the main characteristics and conditions of coal fuel ignition and combustion under high-temperature heating conditions, a special experimental stand was used. **Results.** The results of experimental studies are presented to substantiate the possibility of using four grades of humidified coal as the main fuel in thermal power engineering. The authors have established nitrogen oxide sequestration in the combustion products of the latter in a small vicinity of a humidified coal particle in comparison with dry coal under high temperature conditions. The experimental studies established as well an insignificant (increase of no more than 11%) influence of additional humidity on the thermal preparation times of single coal particles for the four studied grades of coal.

Keywords: coal, humidity, energy efficiency, thermal preparation time, heating, heat and mass transfer, anthropogenic oxides

Acknowledgements: The research was carried out due to the grant of the Russian Science foundation (project no. 23-79-01067).

For citation: Kostoreva Zh.A., Syrodoy S.V., Omarov A.A. Characteristics and conditions of ignition of wet coal particles during high-temperature heating. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 85–94. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4547

Введение

К настоящему времени установлено, что нетрадиционные возобновляемые источники энергии (ветрогенераторы [1–6] и солнечные электростанции [7–11]) не могут даже в среднесрочной перспективе заменить тепловые электростанции. Установлено, что необходимость использования угля в качестве одного из основных энергоносителей сохраниться не только в настоящем, но и в будущем (по крайней мере, до 2040–2050 гг., по оценкам экспертов различных фондов и энергетических компаний). Но уголь является самым, образно говоря, «грязным» топливом – при его сжигании образуется много антропогенных веществ (самыми вредными для живой природы являются оксиды серы, азота, углерода, а также летучая зола) [12–14]. Поэтому актуальнейшей задачей современности является кардинальное снижение негативного воздействия угольных электростанций на окружающую среду [15–20]. Пока эта задача не решена. Одним из перспективных вариантов существенного снижения выбросов антропогенных оксидов в атмосферу при горении углей является сжигание последних в составе водоугольных суспензий, которые принято называть водоугольным топливом (ВУТ) [21–26]. Установлено, что при сжигании таких топлив существенно снижаются выбросы антропогенных оксидов на единицу массы угля [27]. Сформулирована гипотеза о механизме снижения NO_x в результате взаимодействия паров воды с газообразными и твердыми продуктами

термического разложения углей. При взаимодействии оксидов азота, образующихся при пиролизе углей, с парами воды образуются пары азотной кислоты, которые взаимодействуют с оксидами металлов минеральной части углей [28]. В результате образуются сульфаты металлов, которые выпадают совместно с золой, – происходит существенное снижение доли оксидов азота в дымовых газах угольных электростанций. Но при сжигании водоугольных топлив теплотворная способность такого топлива существенно ниже теплотворной способности обычного угля [29]. Поэтому высокозначимой для науки и практики является задача перехода от водоугольных суспензий к влажным углям. В этом случае при влажности 10–15 % возможно достижение существенно более высокой теплотворной способности топлива по сравнению с ВУТ, при сохранении таким топливом способности подавлять антропогенные оксиды. Использование влажных углей вместо ВУТ также может существенно упростить технологический процесс сжигания топлив. Но для обоснования эффективности использования в качестве топлива угольных электростанций влажных углей необходимо решить группу важных задач. Одной из таких задач является определение характеристик и условий зажигания, но пока основные закономерности таких процессов не установлены. Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование возможности использования умеренно увлажненного угля в качестве основного топлива на объектах энерге-

тики с целью снижения вредного воздействия последних на окружающую среду. Реализация технологии снижения антропогенных выбросов с использованием водяного пара может быть реализован тремя способами. Первый – ввод в топку мелкодисперсного угля и распыленной воды через разные устройства для распыления. Угольная пыль вводится через обычные горелочные условия, а вода – через дополнительные форсунки, установленные так, чтобы сразу после ввода частиц угля они увлажнялись в результате взаимодействия на начальном участке топки с каплями воды. Второй, более сложный, – ввод через одно горелочное устройство и частиц угля, и капель воды аналогично вводу горючего и окислителя в жидкостных ракетных двигателях – вода вводится вблизи стенок горелки, а угольная пыль – в ядре потока. Третий – сжигание умеренно влажных углей с программируемой влажностью в поточном устройстве.

Методика экспериментальных исследований

В экспериментах исследовались угольные частицы четырех разных марок (бурый (2Б), длиннопламенный (Д), тощий (Т), антрацит (А)) сухие и увлажненные. На первом этапе процедуры подготовки экспериментальных образцов куски угля больших размеров измельчались с помощью щековой дробилки до характерного размера одиночных частиц $\delta=1,5\text{--}2$ мм, масса которых составляла $m=0,015\pm 0,005$ г. Далее часть частиц угля выдерживалась в дистиллированной воде в течение 24 часов. После чего влажность вымоченных (увлажненных) и сухих (с естественной влажностью) частиц угля разных марок определялась с помощью высокоточного анализатора влажности «Эвлас-2М», систематическая погрешность которого не превышала 0,2 %. Влажности топливных частиц, использовавшихся в экспериментах, приведены в таблице.

Таблица. Влажность частиц угля

Table. Humidity content of coal particles

Марка угля Coal grade	насыщенная влагой частица угля wet coal particle	сухая частица угля dry coal particle
	%	
Антрацит (А) Anthracite	3,82	0,07
Бурый (Б)/Brown	26,07	7,07
Длиннопламенный (Д) Long flame	12,36	4,12
Тощий (Т)/Lean	5,48	0,23

Для установления достоверных значений времен задержки зажигания число экспериментов составляло не менее 15 в идентичных условиях нагрева.

Обработка результатов проводилась с использованием современного аппарата статистической обработки результатов эксперимента. Значение случайной погрешности составляло менее 10 %. Обработка полученных результатов осуществлялась по аналогии [30].

Одной из основных характеристик угольного топлива является время термической подготовки (t_{ign}). Экспериментальный стенд для определения значений t_{ign} углей разных марок и влажностей, приведен на рис. 1. Обработка результатов проводилась с использованием метода статистической обработки. Значение относительной случайной погрешности составляло менее 12 %. Систематическая погрешность была менее 4 %. Число экспериментов могло варьироваться, но составляло не менее 15 для каждой серии экспериментов.

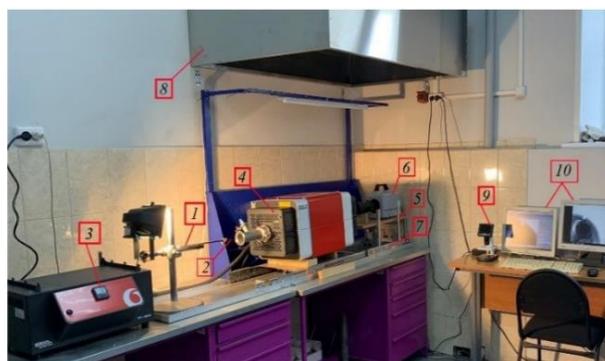


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования процессов воспламенения частиц угольного топлива [21, 22]: 1 – подставка для держателя; 2 – металлический держатель частицы топлива; 3 – панель управления; 4 – высокотемпературная печь; 5 – платформа; 6 – скоростная видеокамера; 7 – направляющие; 8 – система воздухообмена; 9 – микроскоп; 10 – компьютер

Fig. 1. Scheme of an experimental stand for studying ignition of coal fuel particles [21, 22]: 1 – stand for the holder; 2 – metal holder of fuel particles; 3 – control panel; 4 – high-temperature furnace; 5 – platform; 6 – high-speed video camera; 7 – guides; 8 – air exchange system; 9 – microscope; 10 – computer

Основная часть экспериментального стенда [21, 22] представляет собой полую цилиндрическую камеру сгорания, заполненную воздухом (диапазон температур окислителя $T_g=873\text{--}1273$ К), на внешнюю поверхность цилиндра крепился электрический нагреватель (нихромовая проволока). Последний представлял собой систему из трех автономных нагревательных секций. Температура в камере горения измерялась тремя хромель-алюмелевыми термопарами. Контроль и автоматизированное управление тепловым режимом камеры горения осуществлялись системой, состоящей из трех подси-

стем «нагреватель–регулятор–термопара», соединенных через пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор. Такая конструкция позволяет формировать по всему объему камеры сгорания в начальный период времени (перед проведением каждого отдельного эксперимента) стационарное и однородные температурное поле.

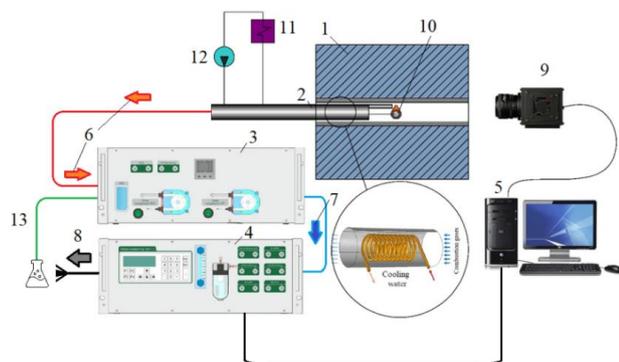


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для анализа компонентного состава газообразных продуктов сгорания частиц угля [22]: 1 – высокотемпературная печь; 2 – пробоотборник с водяным охлаждением; 3 – охладитель-осушитель пробы; 4 – газоанализатор; 5 – компьютер; 6 – проба, прошедшая первый этап охлаждения; 7 – высушенный образец; 8 – газоанализатор; 9 – высокоскоростная видеокамера; 10 – частица угля; 11 – внешний теплообменник; 12 – насос; 13 – канал отвода конденсата из блока «охладитель–осушитель» образца. Позиции 11, 12 представляют систему циркуляционного водяного охлаждения пробоотборника

Fig. 2. Scheme of the experimental stand for analyzing the component composition of gaseous combustion products of coal particles [22]: 1 – high-temperature furnace; 2 – water-cooled sampler; 3 – sample cooler-dryer; 4 – gas analyzer; 5 – computer; 6 – sample that has passed the first cooling stage; 7 – dried sample; 8 – gas analyzer; 9 – high-speed video camera; 10 – coal particle; 11 – external heat exchanger; 12 – pump; 13 – condensate drainage channel from the “cooler-dryer” block of the sample. Positions 11, 12 represent the circulating water cooling system of the sampler

Нагревательный комплекс совместно с камерой сгорания устанавливался в теплоизолированной кожухе. На оси симметрии цилиндра на расстоянии $\sim 0,5$ м от его торца на металлической подложке закреплялась частица угольного топлива. С другой стороны печи располагалась высокоскоростная видеокамера FASTCAM Phantom 5 (скорость видеосъемки 10000 кад/сек). В начальный момент времени вся нагревательно-регистрационная система начинала двигаться по направлению к частице топлива. Перед вводом последней в печь торцевые заслонки нагревательного цилиндра открывались.

При этом частицы топлива попадали в фокус объектива высокоскоростной видеокамеры. Момент попадания частицы угля в фокус видеокамеры считался началом теплового воздействия, появление первого пламени вблизи частицы считалось моментом зажигания.

На рис. 2 приведена принципиальная схема экспериментального стенда для анализа компонентного состава продуктов сгорания топлива. Основной частью экспериментальной установки является высокотемпературная печь, схема которой описана выше и показана на рис. 1. Отличие заключается в том, что экспериментальный стенд дополнен комплексом газового анализа газообразных продуктов сгорания ТЕСТ-1. Последний состоит из высокотемпературного пробоотборника с водяным охлаждением, отбирающего продукты сгорания из зоны прямой реакции топлива с окислителем. В пробоотборнике газы охлаждаются до температуры ≈ 300 К. После этого проба через специальный гибкий соединительный канал попадает в холодильник-сушилку, где проходит через систему теплообменников и охлаждается до температуры ≈ 278 К. В результате такого экстремального охлаждения образца конденсируются пары воды и кислоты (азотной и серной). Конденсат стекает в колбу. После осушителя охлажденные продукты сгорания поступают в газоанализатор, где определяется содержание оксидов азота (NO_x). Перед каждой серией экспериментов газоанализатор калибровали (по воздуху) и очищали тракт пробоотборника от осевших частиц золы и сажи.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3 приведены кадры типичных видеороликов процесса воспламенения сухих и увлажненных угольных частиц четырех марок при температуре окружающей среды $T_g = 1073$ К. Как показывают эксперименты, процесс термической подготовки, зажигания и горения сухих и увлажненных частиц бурого и длиннопламенного (рис. 3, *b, c*) углей характеризуется газофазным зажиганием. Скорее всего, это связано с большим количеством летучих, которые прогреваются быстрее, достигая температуры горения, и начинают гореть раньше углерода частицы. Можно отметить, что зона воспламенения локализована в верхней полусфере частицы, которая по своим размерам, как правило, превышает размер самой частицы. Для сухих частиц антрацита и тощего угля (рис. 3, *a, d*) характерно гетерогенное зажигание. Также стоит отметить, что увлажненные частицы антрацита и тощего угля (рис. 3, *b, III, c, III*) при высокотемпературном нагревании (при $T_g \geq 1073$ К) диспергируются на множество мелких фрагментов до момента зажигания, в отличие от сухих частиц угля той же марки.

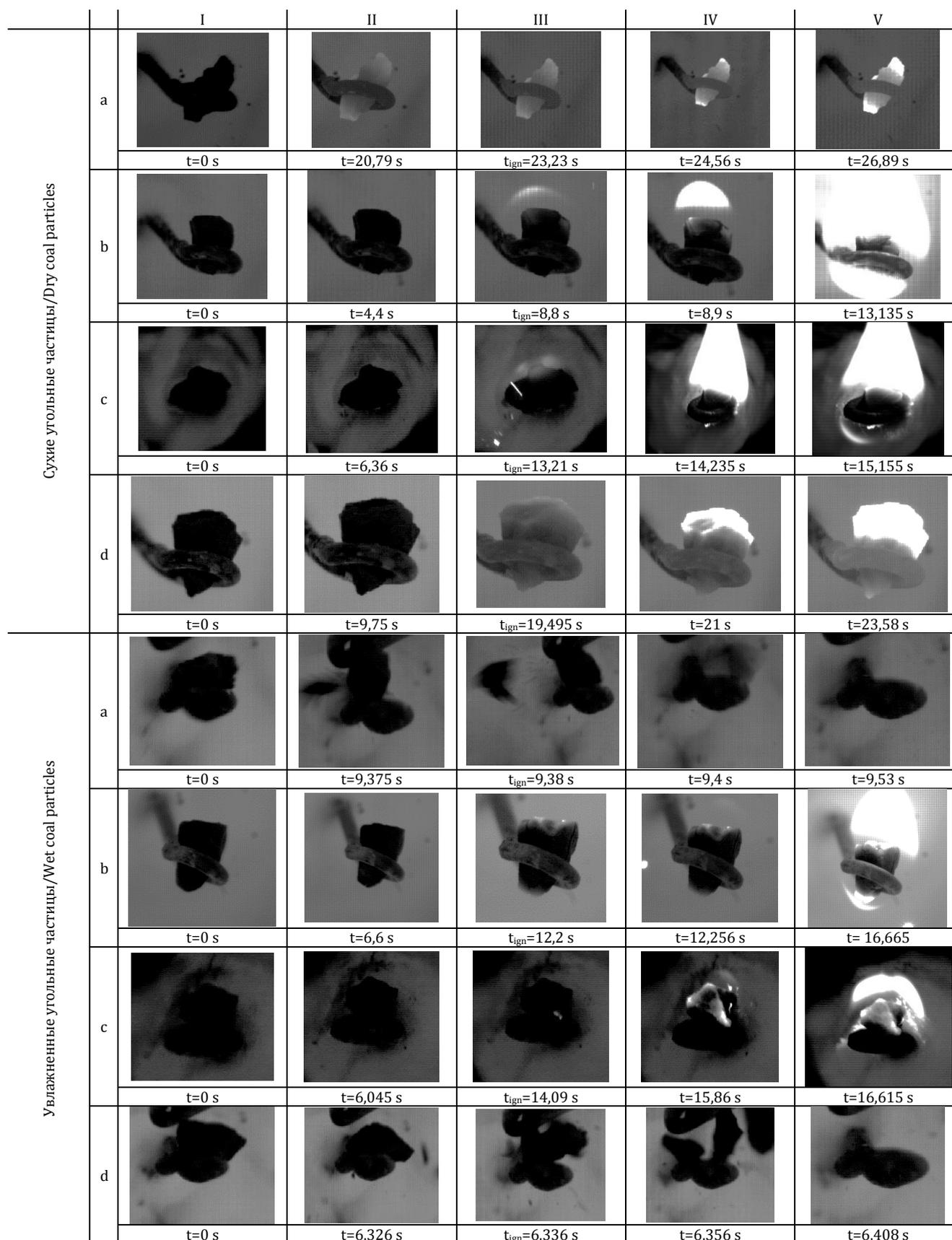


Рис. 3. Типичные кадры процесса воспламенения сухих и увлажненных топливных частиц угля при температуре внешней среды $T_g=1053$ K: а) антрацит; б) бурый; в) длиннопламенный; д) тощий

Fig. 3. Typical footage of ignition of dry and moistened coal fuel particles at an ambient temperature $T_g=1053$ K: а) anthracite; б) brown; в) long-flame; д) lean

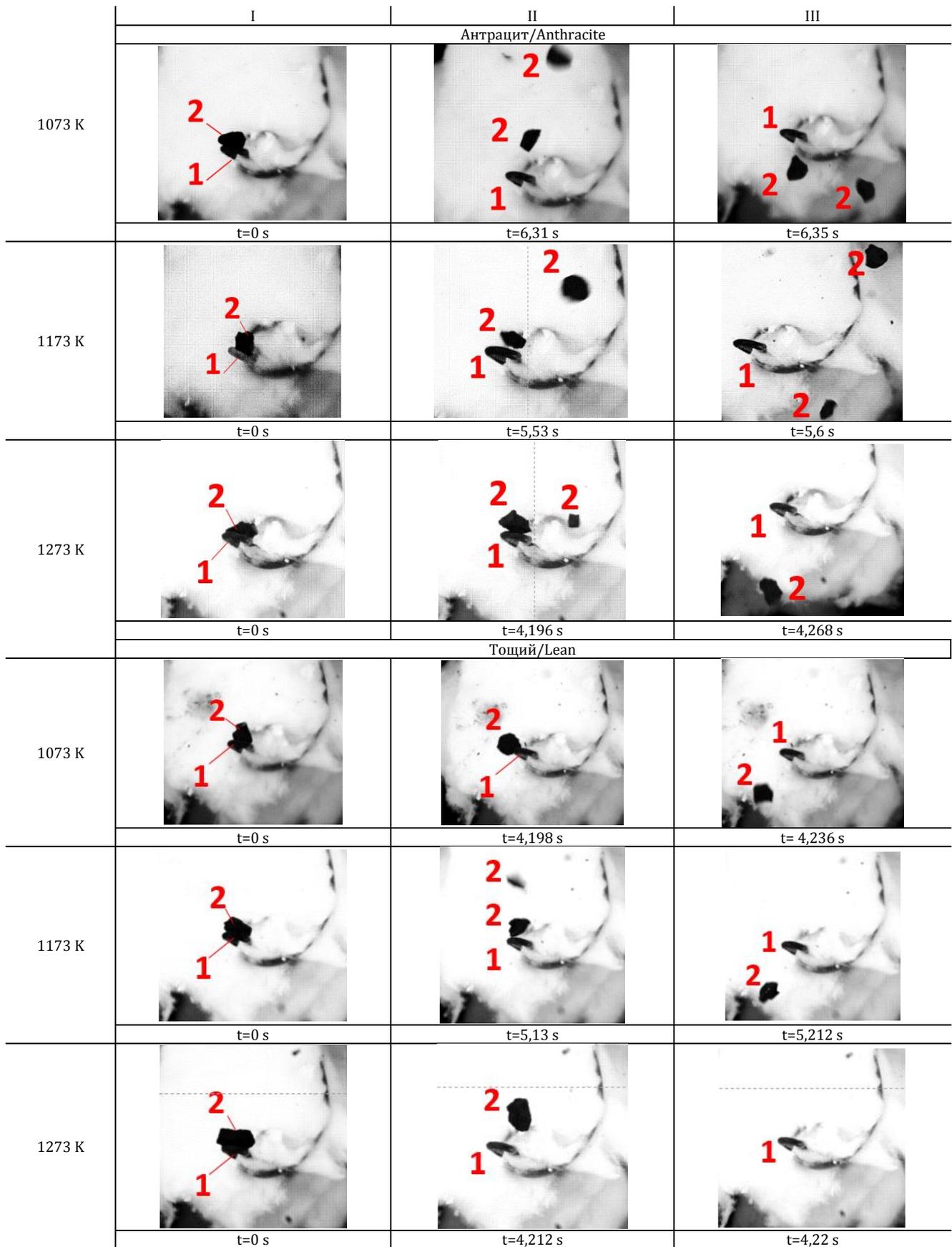


Рис. 4. Типичные кадры процесса диспергирования увлажнённых углей (тощего и антрацита): 1 – металлический держатель, 2 – частица угля

Fig. 4. Typical footage of dispersing humidified coals of two grades (lean and anthracite): 1 – metal holder, 2 – coal particle

Это можно объяснить тем, что вследствие интенсивного испарения воды, заполняющей поры угля в начальный момент времени, растёт давление паров в порах. Вследствие высоких фильтрационных напряжений, а также роста давления паров в замкнутых порах происходит разрушение приповерхностных слоёв частиц – диспергирование. Этот процесс благоприятно сказывается на условиях зажигания малых по размерам фрагментов, образовавшихся после разрушения приповерхностных слоёв частиц угля.

На рис. 4 приведены типичные кадры видеogramм процесса диспергирования увлажнённых частиц угля двух марок: тощего и антрацит, для трех температур окружающей среды: 1070, 1173 и 1273 К. На кадрах хорошо видно, что в определенный момент времени (рис. 4, II) угольная частица за счет летучих слетает с держателя и, как правило, разрушается на 2–3 неравные части. После этого частицы с характерным размером от 0,3 до 1 мм зажигаются вблизи нижней стенки камеры сгорания.

На рис. 5 приведены зависимости времен задержки зажигания сухих и увлажнённых частиц угля четырех марок в условиях высокотемпературного нагрева. На основании анализа рис. 5 можно сделать вывод, что марка угля существенно влияет на время задержки зажигания угольного топлива. Времена термической подготовки антрацита при температуре окислителя $T_g=1273$ К почти в 5 раза превышают t_{ign} топливных частиц длиннопламенного и бурого угля. Экспериментально установлено, что зажигание не происходит для тощего сухого угля при температуре окислителя $T_g < 973$ К, для тощего увлажнённого угля $T_g < 1073$ К и антрацита при $T_g < 1073$ К.

Можно отметить, что увлажнение (на $3,75 \div 19$ % в зависимости от марки) частиц угля несущественно влияет на времена термической подготовки угля (например, не более чем на 11 % для тощего угля) для всего исследуемого диапазона температур внешней среды (от 873 до 1273 К).

На рис. 6 приведена гистограмма, характеризующая среднее (по времени горения) значение концентраций одного из основных антропогенных газов – оксида азота (NO) – в продуктах сгорания одиночных частиц сухого и влажного длиннопламенного угля. Хорошо видно, что даже незначительное увлажнение сухой частицы длиннопламенного угля (таблица) – на 8,24 % – приводит к существенному снижению оксида азота в продуктах сгорания топливных частиц. Так, при температуре окислителя $T_g=973$ К концентрация NO_x в продуктах сгорания увлажнённой частицы меньше на 26 % по сравнению с сухой частицей длиннопламенного угля.

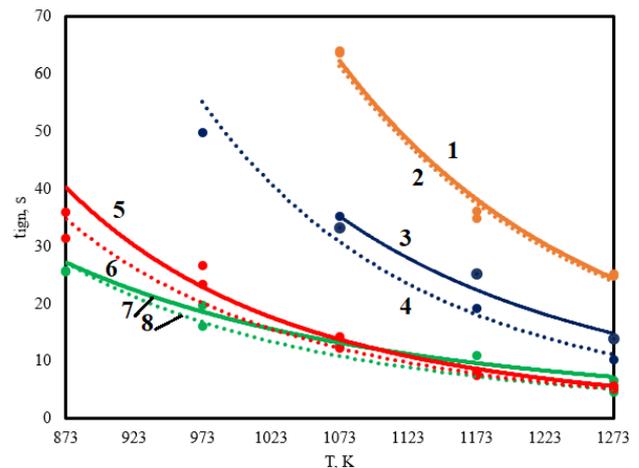


Рис. 5. Зависимости времен задержки зажигания частиц угля от температуры внешней среды: 1 – антрацит влажная частица; 2 – антрацит сухая частица; 3 – тощий влажная частица; 4 – тощий сухая частица; 5 – длиннопламенный влажная частица; 6 – длиннопламенный сухая частица; 7 – бурый влажная частица; 8 – бурый сухая частица

Fig. 5. Dependence of the ignition delay times of coal particles on the ambient temperature: 1 – anthracite wet particle; 2 – anthracite dry particle; 3 – lean wet particle; 4 – lean dry particle; 5 – long-flame wet particle; 6 – long-flame dry particle; 7 – brown wet particle; 8 – brown dry particle

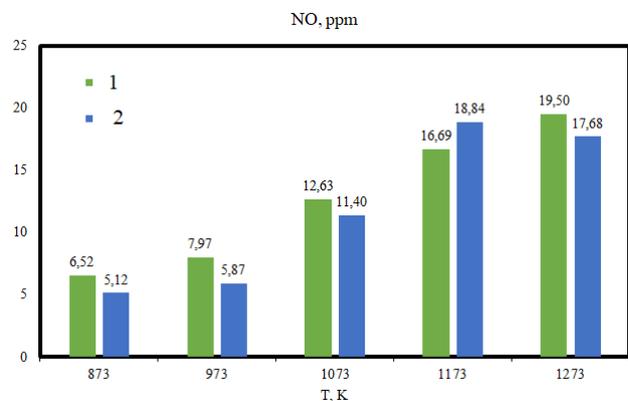


Рис. 6. Средние по времени концентрации оксидов азота в газообразных продуктах горения в малой окрестности частиц длиннопламенного угля: 1 – сухая угольная частица; 2 – влажная угольная частица

Fig. 6. Time-average concentrations of nitrogen oxides in gaseous combustion products in a small vicinity of long-flame coal particles: 1 – dry coal particle; 2 – wet coal particle

На рис. 6 хорошо видно, что при горении частиц влажного угля формируется меньше оксидов азота. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что водяные пары, формирующиеся при испарении внутрипоровой влаги, выступают в роли компонента, свя-

зывающего NO_x . Образуется азотная кислота, которая вступает в термохимическое взаимодействие с железом минеральной части топлива. Необходимо отметить, что при зажигании влажного угля водяных паров образуется больше, чем при зажигании частиц сухого угля. Источником воды при горении сухого угля является только адсорбционно-связанная влага и продукты реакций горения углеводородсодержащих (C_nH_m) соединений в составе газообразных продуктов пиролиза. Соответственно, можно обоснованно предположить, что взаимодействие паров азотной кислоты с оксидами железа минеральной части угля при воспламенении влажного угля протекает интенсивнее, чем при зажигании сухого угля, вследствие более высокой концентрации окислителя (паров азотной кислоты).

Заключение

Результаты экспериментов показали, что сжигание умеренно (влажность от 3,82 до 26,7 %) увлаж-

ненных углей приводит к существенному (до 26 %) секвестированию оксидов азота, образующихся при горении угля. При этом установлено, что время термической подготовки увлажненных углей увеличивается незначительно (не более 11 %) по сравнению с подготовкой сухих частиц угля в идентичных условиях. Можно сделать вывод, что использование умеренно влажного угля в качестве топлива на объектах теплоэнергетики может привести к снижению выбросов оксида азота, времена задержки зажигания угля при этом увеличиваются незначительно. Установленные при проведении экспериментов закономерности иллюстрируют возможность реализации технологии сжигания умеренно увлажненных углей с меньшим выходом антропогенных оксидов в продуктах сгорания по сравнению с процессом сжигания сухих углей и более высокой теплотой сгорания топлива по сравнению с водоугольной суспензией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azadani L.N. Vertical axis wind turbines in cluster configurations // *Ocean Engineering*. – 2023. – Vol. 272. – P. 113855.
2. Chu Y., Gao J., Li H. Wind power expansion and regional allocative efficiency among fossil-fuel electricity generator // *International Journal of Industrial Organization*. – 2023. – Vol. 91. – P. 103035.
3. Kinnares V., Sawetsakulanond B. Characteristic requirements of a small scale squirrel cage induction generator for effective electricity generation from wind energy // *Energy Procedia*. – 2013. – Vol. 34. – P. 26–49.
4. Reliability analysis of floating offshore wind turbine generator based on failure prediction and preventive maintenance / C. Zhao, H. Liu, X. Qu, M. Liu, R. Tang, A. Xie // *Ocean Engineering*. – 2023. – Vol. 288. – P. 116089.
5. Getting more from the wind: recent advancements and challenges in generators development for wind turbines / C.C. Chang, T.J. Ding, T.J. Ping, K.C. Chao, M.A. Bhuiyan // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2022. – Vol. 53. – P. 102731.
6. A review of wind turbines in complex terrain / M. Elgend, I. Al Mallahi, A. Abdelkhalig, M.Y. Selim // *International Journal of Thermofluids*. – 2023. – Vol. 17. – P. 100289.
7. Yang H., Wang H. Numerical simulation of the dust particles deposition on solar photovoltaic panels and its effect on power generation efficiency // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 201. – P. 1111–1126.
8. Study on the dynamic characteristics, control strategies and load variation rates of the concentrated solar power plant / G. Li, G. Du, G. Liu, J. Yan // *Applied Energy*. – 2024. – Vol. 357. – P. 122538.
9. A comprehensive analysis of time-dependent performance of a solar chimney power plant equipped with a thermal energy storage system / A. Arefian, R. Hosseini-Abardeh, M.R. Larki, A. Torkfar, H. Sarlak // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2024. – Vol. 189. – P. 114051.
10. Couto A., Estanqueiro A. Wind power plants hybridised with solar power: a generation forecast perspective // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 423. – P. 138793.
11. Energy, exergy and economics study of a solar/thermal panel cooled by nanofluid / M. Tian, Y. Khetib, S. Yan, M. Rawa, M. Sharifpur, G. Cheraghian, A.A. Melaibari // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 28. – P. 101481.
12. Kok M.V., Yildirim B. Gasification profiles of Thrace region coal under CO_2 , N_2/CO_2 , and N_2/DRY air environments // *J Pet Sci Eng*. – 2019. – Vol. 175. – P. 237–245.
13. Munawer M.E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes // *J Sustain Min*. – 2018. – Vol. 17. – P. 87–96.
14. Identifying coal plants for early retirement in India: a multidimensional analysis of technical, economic, and environmental factors / N. Maamoun, P. Chitkara, J. Yang, G. Shrimali, J. Busby, S. Shidore, Y. Jin, J. Urpelainen // *Appl Energy*. – 2022. – Vol. 312. – P. 118644.
15. Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO_2 capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts / S. Kim, Y. Lim, D. Lee, W. Cho, M. W. Seo, J.G. Lee // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 273. – P. 116361.
16. Heat pump-driven adsorption CO_2 capture for simple and cost-effective retrofits of coal power plants / S. Cloete, A. Giuffrida, M.C. Romano, A. Zaabout // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 236. – P. 121456.
17. Enhancing the flexibility and stability of coal-fired power plants by optimizing control schemes of throttling high-pressure extraction steam / Z. Liu, C. Wang, J. Fan, M. Liu, Y. Xing, J. Yan // *Energy*. – 2024. – Vol. 288. – P. 129756.
18. Kumar A., Tiwari A.K. Solar-assisted post-combustion carbon-capturing system retrofitted with coal-fired power plant towards net-zero future: a review // *Journal of CO_2 Utilization*. – 2022. – Vol. 65. – P. 102241.

19. Parametric study and optimization of MEA-based carbon capture for a coal and biomass co-firing power plant / Q. Zhang, Y. Liu, Y. Cao, Z. Li, J. Hou, X. Gou // *Renewable Energy*. – 2023. – Vol. 205. – P. 838–850.
20. Distribution and emission characteristics of filterable and condensable particulate matter in the flue gas emitted from an ultra-low emission coal-fired power plant / Z. Xu, Y. Wu, S. Liu, M. Tang, S. Lu // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – P. 107667.
21. Ignition of water-coal fuel droplets during radiative-convective-conductive heating in relation to boilers operating on the technology of circulating fluidized bed / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, D.Yu. Malyshev, M.V. Purin // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2022. – Vol. 33. – P. 101363.
22. Ignition and combustion characteristics of coal-water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // *Combustion and Flame*. – 2022. – Vol. 246. – P. 112430.
23. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // *Energy*. – 2022. – Vol. 257. – P. 124813.
24. Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals // *Sci Total Environ*. – 2019. – Vol. 671. – P. 568–577.
25. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state / K. Verzhinina, G. Nyashina, V. Dorokhov, N. Shlegel // *Appl Therm Eng*. – 2019. – Vol. 156. – P. 51–62.
26. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions // *Fuel*. – 2011. – Vol. 90. – P. 865–877.
27. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions / S.V. Alekseenko, A.A. Dekterev, L.I. Maltsev, V.A. Kuznetsov // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2023. – Vol. 169. – P. 313–327.
28. Mechanism of sulfur and nitrogen oxides suppression in combustion products of mixed fuels based on coal and wood / G.V. Kuznetsov, S.A. Jankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov // *Combustion Science and Technology*. – 2019. – Vol. 191. – P. 2071–2081.
29. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание органоводоугольных топливных композиций. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), 2017. – 460 с.
30. Борисов Б.В., Крайнов А.В., Юхнов В.Е. Практикум по технической термодинамике и тепломассообмену. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 141 с.

Информация об авторах

Жанна Андреевна Косторева, кандидат технических наук, ассистент Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. zhanna.kostoreva@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0545-9211>

Семен Владимирович Сыродой, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ssyrodoy@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6924-8552>

Азимхан Адилханович Омаров, аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. aao35@tpu.ru

Потупила в редакцию: 25.01.2024

Поступила после рецензирования: 13.02.2024

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Azadani L.N. Vertical axis wind turbines in cluster configurations. *Ocean Engineering*, 2023, vol. 272, pp. 113855.
2. Chu Y., Gao J., Li H. Wind power expansion and regional allocative efficiency among fossil-fuel electricity generator. *International Journal of Industrial Organization*, 2023, vol. 91, pp. 103035.
3. Kinnares V., Sawetsakulanond B. Characteristic requirements of a small scale squirrel cage induction generator for effective electricity generation from wind energy. *Energy Procedia*, 2013, vol. 34, pp. 26–49.
4. Zhao C., Liu H., Qu X., Liu M., Tang R., Xie A. Reliability analysis of floating offshore wind turbine generator based on failure prediction and preventive maintenance. *Ocean Engineering*, 2023, vol. 288, pp. 116089.
5. Chang C.C., Ding T.J., Ping T.J., Chao K.C., Bhuiyan M.A. Getting more from the wind: Recent advancements and challenges in generators development for wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, pp. 102731.
6. Elgend M., Al Mallahi I., Abdelkhalig A., Selim M.Y. A review of wind turbines in complex terrain. *International Journal of Thermofluids*, 2023, vol. 17, pp. 100289.
7. Yang H., Wang H. Numerical simulation of the dust particles deposition on solar photovoltaic panels and its effect on power generation efficiency. *Renewable Energy*, 2022, vol. 201, pp. 1111–1126.
8. Li G., Du G., Liu G., Yan J. Study on the dynamic characteristics, control strategies and load variation rates of the concentrated solar power plant. *Applied Energy*, 2024, vol. 357, pp. 122538.
9. Arefian A., Hosseini-Abardeh R., Larki M.R., Torkfar A., Sarlak H. A comprehensive analysis of time-dependent performance of a solar chimney power plant equipped with a thermal energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, vol. 189, pp. 114051.

10. Couto A., Estanqueiro A. Wind power plants hybridised with solar power: A generation forecast perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 10, pp. 138793.
11. Tian M., Khetib Y., Yan S., Rawa M., Sharifpur M., Cheraghian G., Melaibari A. Energy, exergy and economics study of a solar/thermal panel cooled by nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, vol. 28, pp. 101481.
12. Kok M.V., Yildirim B. Gasification profiles of Thrace region coal under CO₂, N₂/CO₂, and N₂/DRY air environments. *J Pet Sci Eng*, 2019, vol. 175, pp. 237–245.
13. Munawer M.E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes. *J Sustain Min*, 2018, vol. 17, pp. 87–96.
14. Maamoun N., Chitkara P., Yang J., Shrimali G., Busby J., Shidore S., Jin Y., Urpelainen J. Identifying coal plants for early retirement in India: a multidimensional analysis of technical, economic, and environmental factors. *Appl Energy*, 2022, vol. 312, pp. 118644.
15. Kim S., Lim Y., Lee D., Cho W., Seo M.W., Lee J.G. Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 273, pp. 116361.
16. Cloete S., Giuffrida A., Romano M.C., Zaabout A. Heat pump-driven adsorption CO₂ capture for simple and cost-effective retrofits of coal power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 236, pp. 121456.
17. Liu Z., Wang C., Fan J., Liu M., Xing Y., Yan J. Enhancing the flexibility and stability of coal-fired power plants by optimizing control schemes of throttling high-pressure extraction steam. *Energy*, 2024, vol. 288, pp. 129756.
18. Kumar A., Tiwari A.K. Solar-assisted post-combustion carbon-capturing system retrofitted with coal-fired power plant towards net-zero future: a review. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, vol. 65, pp. 102241.
19. Zhang Q., Liu Y., Cao Y., Li Z., Hou J., Gou X. Parametric study and optimization of MEA-based carbon capture for a coal and biomass co-firing power plant. *Renewable Energy*, 2023, vol. 205, pp. 838–850.
20. Xu Z., Wu Y., Liu S., Tang M., Lu S. Distribution and emission characteristics of filterable and condensable particulate matter in the flue gas emitted from an ultra-low emission coal-fired power plant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, pp. 107667.
21. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Kostoreva Zh.A., Malyshev D.Yu., Purin M.V. Ignition of water-coal fuel droplets during radiative-convective- conductive heating in relation to boilers operating on the technology of circulating fluidized bed. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, vol. 33, pp. 101363.
22. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Kostoreva Zh.A., Malyshev D.Yu., Purin M.V. Ignition and combustion characteristics of coal-water fuels based on coal & semi-coke. *Combustion and Flame*, 2022, vol. 246, pp. 112430.
23. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*, 2022, vol. 257, pp. 124813.
24. Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals. *Sci Total Environ*, 2019, vol. 671, pp. 568–577.
25. Vershinina K., Nyashina G., Dorokhov V., Shlegel N. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state. *Appl Therm Eng*, 2019, vol. 156, pp. 51–62.
26. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions. *Fuel*, 2011, vol. 90, pp. 865–877.
27. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NO_x emissions. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 169, pp. 313–327.
28. Kuznetsov G.V., Jankovsky S.A., Tolokolnikov A.A., Zenkov A.V. Mechanism of sulfur and nitrogen oxides suppression in combustion products of mixed fuels based on coal and wood. *Combustion Science and Technology*, 2019, vol. 191, pp. 2071–2081.
29. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. *Ignition of organo-coal fuel compositions*. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2017. 460 p. (In Russ.)
30. Borisov B.V. *Workshop on technical thermodynamics and heat and mass transfer*. Tomsk, TPU Publ., 2010. 141 p. (In Russ.)

Information about the authors

Zhanna A. Kostoreva, Cand. Sc., Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. zhanna.kostoreva@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0545-9211>

Semen V. Syrodoy, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ssyrodoy@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6924-8552>

Azimkhan A. Omarov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. aao35@tpu.ru

Received: 25.01.2024

Revised: 13.02.2024

Accepted: 19.04.2024

УДК 631.453:631.445.41:632.122.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4337
Шифр специальности ВАК: 1.5.15

Интегральная фитотоксичность нефтезагрязненного чернозема после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом

Т.В. Минникова[✉], С.И. Колесников, Н.С. Минин

Южный федеральный университет, Россия, г. Ростов-на-Дону

[✉]loko261008@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность.* Загрязнение почв нефтью оказывает значительное влияние на их плодородие и продуктивность при выращивании сельскохозяйственных культур. При ремедиации почвы недостаточное внимание уделяют оценке их фитотоксичности согласно показателям интенсивности начального роста и развития растений. Приведены результаты исследования оценки фитотоксичности чернозема обыкновенного на примере ячменя озимого (*Hordeum vulgare* L.) после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом, содержащим штаммы *Bacillus* и *Paenibacillus*. *Цель:* оценить интегральную фитотоксичность чернозема обыкновенного после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом, содержащим штаммы *Bacillus* и *Paenibacillus*. *Объекты:* чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый, в модельных условиях загрязненный нефтью на 5 % от массы почвы. Для ремедиации почвы от нефтяного загрязнения вносили биочар и бактериальный препарат со штаммами *Bacillus* и *Paenibacillus* в различных сочетаниях: самостоятельное внесение ремедиантов, совместное внесение, инокуляция *Bacillus* и *Paenibacillus* на биочаре. Период инкубации почвы с биочаром и бактериальным препаратом длится 30 суток. *Методы.* Остаточное содержание нефти определяли методом экстракции четыреххлористым углеродом с детекцией на инфракрасном анализаторе. Фитотоксичность почвы после ремедиации оценивали по показателям интенсивности начального роста и развития ячменя озимого (*Hordeum vulgare* L.): всхожесть, скорость прорастания, энергия прорастания, дружность прорастания, длина побега, длина корня, фитомасса побега, фитомасса корня. В результате определения этих показателей рассчитывали комплексный интегральный показатель фитотоксичности почвы. *Результаты.* Совместное применение биочара с бактериальным препаратом в нефтезагрязненной почве приводит к наиболее эффективному снижению содержания нефти, чем при самостоятельном внесении и инокуляции бактериального препарата на биочаре в рекомендуемой и 100 кратной дозе с эффективностью 33 и 58 % соответственно. На основании анализа фитотоксичности установлена наибольшая чувствительность показателей интенсивности начального роста ячменя: всхожесть, дружность и скорость прорастания. При самостоятельном внесении биочара и бактериального препарата наиболее информативные показатели – фитомасса побегов, всхожесть и дружность прорастания, при совместном внесении биочара и бактериального препарата – энергия прорастания, длина побега и фитомасса побегов, при инокуляции бактериального препарата на биочаре – длина корней, фитомасса побегов и корней. Исследование фитотоксичности нефтезагрязненного чернозема после ремедиации позволило установить экологическую эффективность и целесообразность применения самостоятельно биочара и биочара, инокулированного штаммами *Bacillus* и *Paenibacillus*.

Ключевые слова: почва, ремедиация, ячмень, всхожесть, скорость прорастания, энергия прорастания, дружность прорастания, длина побега, длина корня, фитомасса побега, фитомасса корня, интегральная фитотоксичность

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») по созданию молодежной лаборатории эковиотехнологий диагностики и охраны здоровья почв (№ СП-12-23-01), Министерства науки и высшего образования РФ, лаборатории «Здоровье почвы» Южного федерального университета (соглашение № 075-15-2022-1122), проекта Минобрнауки России «Лаборатория молодых ученых» в рамках Межрегионального научно-образовательного центра Юга России (№ ЛабНОЦ-21-01АБ, FENW-2021-0014).

Для цитирования: Минникова Т.В., Колесников С.И., Минин Н.С. Интегральная фитотоксичность нефтезагрязненного чернозема после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 95–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4337

UDC 631.453:631.445.41:632.122.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4337

Integral phytotoxicity of oil-contaminated chernozem after remediation with biochar and bacterial preparation

T.V. Minnikova[✉], S.I. Kolesnikov, N.S. Minin

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[✉]loko261008@yandex.ru

Abstract. Relevance. Soil pollution with oil has a significant impact on soil fertility and productivity when growing crops. During soil remediation, insufficient attention is paid to soil phytotoxicity assessment in terms of the intensity of the initial growth and development of plants. The results of the study of ordinary chernozem phytotoxicity evaluation on the example of winter barley (*Hordeum vulgare* L.) after remediation with biochar and a bacterial preparation, containing strains of *Bacillus* & *Paenibacillus*, are presented. **Aim.** To evaluate ordinary chernozem integral phytotoxicity after remediation with biochar and a bacterial preparation, containing strains of *Bacillus* and *Paenibacillus*. **Objects.** Ordinary heavy loamy chernozem, under model conditions, which 5% of the soil mass are oil-contaminated. For soil remediation from oil pollution, biochar and a bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus* strains were applied in various combinations: independent application of ameliorants, joint application, inoculation of bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus* on biochar. The period of soil incubation with biochar and bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus* is 30 days. **Methods.** The residual oil content was determined by the method of extraction with carbon tetrachloride with detection on an infrared analyzer. Soil phytotoxicity after remediation was assessed by indicators of the intensity of initial growth and development of winter barley (*Hordeum vulgare* L.): germination, germination rate, germination energy, germination friendliness, shoot length, root length, shoot phytomass, root phytomass. As a result of determining these indicators, a complex integral indicator of soil phytotoxicity (IIPht) was calculated. **Results.** The combined use of biochar with of bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus* in oil-contaminated soil leads to the most effective reduction in oil content than when self-introduced and inoculated with of bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus* on biochar at the recommended and 100-fold dose, the efficiency is 33 and 58%, respectively. Based on the analysis of phytotoxicity, the highest sensitivity of indicators of barley initial growth intensity was established: germination, friendliness and germination rate. With the independent application of biochar and of bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus*, the most informative indicators are shoot phytomass, germination and germination rate; with the combined application of biochar and of bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus*, germination energy, shoot length and shoot phytomass; with inoculation of of bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus* on a biochar, root length, phytomass of shoots and roots. The study of the phytotoxicity of oil-contaminated Haplic Chernozem after remediation made it possible to establish the ecological efficiency and expediency of using only biochar and biochar inoculated with of bacterial preparation with *Bacillus* & *Paenibacillus*.

Keywords: soil, remediation, barley, germination, germination rate, germination energy, germination friendliness, shoot length, root length, shoot phytomass, root phytomass, integral phytotoxicity

Acknowledgements: The study was financially supported by the project of the Strategic Academic Leadership Program of the Southern Federal University ("Priority 2030") for the creation of a youth laboratory of ecobiotechnologies for diagnosing and protecting soil health (No. SP-12-23-01), the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the Soil Health laboratory of the Southern Federal University (agreement No. 075-15-2022-1122), project of the Ministry of Science and Higher Education of Russia on the Young Scientist Laboratory within the framework of the Interregional scientific and educational center of the South of Russia (no. LabNOTs-21-01AB, FENW-2021-0014).

For citation: Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Minin N.S. Integral phytotoxicity of oil-contaminated chernozem after remediation with biochar and bacterial preparation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 95–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4337

Введение

Нефтяные разливы оказывают непосредственное воздействие на физико-химические (окислительно-восстановительный потенциал, гидрофобность, проницаемость и пористость почвы) и агрохимические (содержание органического вещества, соотношение C:N, C:P, содержание легкораствори-

мых солей, pH и др.) показатели почвы [1–7]. В нефти содержатся соединения тяжелых металлов (никель и ванадий) и другие неорганические соединения, повышающие содержание легкорастворимых солей в почве [8–10]. Содержание в нефти высокой концентрации углерода и соединений азота изменяет соотношение C:N в почве, что влияет

на состояние почвенной биоты. Загрязнение почв нефтью оказывает воздействие на дикорастущие и сельскохозяйственные растения [11]. В нефтезагрязненных почвах снижается доступность для растений элементов минерального питания: азота, фосфора и калия. С учетом изменения пористости и аэрации почв, структуры и температуры почвы, а также нарушения жизнедеятельности биоты рост и развитие сельскохозяйственных растений ухудшается [12, 13].

Загрязнение почв нефтью снижает оптимальный рост сельскохозяйственных культур, влияя на показатели интенсивности начального роста и развития семян, а также на продуктивность растений и устойчивость к различным возбудителям и болезням [14–17]. Как следствие нефтяного загрязнения почвы происходит нарушение соотношения между углеродом, азотом и фосфором, что влияет на усвоение микроэлементов и в итоге на жизнедеятельность растений [18–20].

При биоремедиации нефтезагрязненных почв самым чувствительным показателем состояния почвы после внесения ремедиантов является фитотоксичность почв [21, 22]. К растениям, наиболее чувствительным к нефтяному загрязнению, относят редис (*Raphanus sativus* L.), салат (*Lactuca sativum* L.), кукурузу (*Zea mays* L.), горчицу (*Sinapis Cibum* L.), лук (*Allium cepa* L.) [23], ячмень (*Hordeum vulgare* L.) и клевер (*Trifolium pratense* L.) [24–27]. Поэтому одним из направлений очистки почв от нефти и нефтепродуктов является посадка различных сельскохозяйственных культур или их сочетания с микробными препаратами [28, 29]. Также для ремедиации нефтезагрязненных почв эффективно внесение таких углеродистых сорбентов, как биочар [30–32]. Биочар оказывает стимулирующее воздействие на ферменты азотного цикла (уреаза, протеаза и др.) и бактерии-аммонификаторы [33]. Внесение биочара с *Enterobacter* sp. MN17 увеличило содержание хлорофилла *a* и *b*, скорости транспирации, устьичной и подустьичной проводимости и скорости фотосинтеза маша (*Vigna radiata* L.) сорта AZRI-2006, выращенного на почве, загрязненной дизельным топливом [34].

Цель – оценить интегральную фитотоксичность нефтезагрязненного чернозема после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом, содержащим штаммы *Bacillus* и *Paenibacillus*. Для реализации цели были поставлены следующие задачи: 1) проанализировать остаточное содержание нефти чернозема по истечении 30 суток эксперимента; 2) измерить показатели интенсивности начального роста и развития семян ячменя, выращенного на нефтезагрязненном черноземе; 3) сравнить интегральную фитотоксичность нефтезагрязненного чернозема после ремедиации при самостоятельном,

совместном и инокулированном внесении биочара; 4) оценить информативность и чувствительность биологических показателей после ремедиации.

Материалы и методы

Для оценки фитотоксичности почв при загрязнении нефтью после внесения биочара и бактериального препарата, содержащего штаммы *Bacillus* и *Paenibacillus* в виде раствора, анализировали самую плодородную почву в мире – чернозем обыкновенный, или Naplic Chernozem Loamic [35]. Для закладки модельного эксперимента почву отбирали с верхнего слоя ($A_{\text{пах}}$) пашни Ботанического сада Южного федерального университета ($47^{\circ}14'17.54''\text{N}$; $39^{\circ}38'33.22''\text{E}$). Почва обладает следующими физико-химическими свойствами: $\text{pH}_{\text{акт.}}=8,2$, плотность почвы – $1,29 \text{ г/см}^3$, порозность – 51 %, содержание органического вещества – 4,0 %, ЕКО – $38,0 \text{ мг} \times \text{экв}/100 \text{ г}$ почвы, тяжелосуглинистый гранулометрический состав: содержание песка – 29,8 %, ила – 17,7 %, глины – 52,5 %.

Для эксперимента использовали нефть, предоставленную Новошахтинским нефтеперерабатывающим заводом. В почву вносили нефть в концентрации 5 % от массы почвы. Именно такой уровень загрязнения почв нефтью характеризует среднюю степень загрязнения почв [36].

Для очистки нефтезагрязненной почвы от нефти и восстановления ее экологического состояния, пригодного для выращивания сельскохозяйственных культур, в нефтезагрязненную почву вносили биочар и бактериальный препарат, содержащий штаммы *Bacillus* и *Paenibacillus* в виде раствора. Бактериальный препарат с биофунгицидным действием в отношении грибов рода *Fusarium* на основе консорциума штаммов аэробных спорообразующих бактерий *B. amyloliquefaciens* V3.14 и R4.6, *P. polymyxa* R5.31, а также *P. peoriae* O1.27, O2.11, R3.13, R4.5 и R6.14, и *P. jamiclae* K1.14, R4.24 был разработан в лаборатории новых биопрепаратов Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета. Биопрепарат основан на технологии жидкофазной ферментации культурами бактерий жидкой питательной среды на основе 2,5 % свекловичной мелассы от объема и комплекса солей (Азофоска) в концентрации 1,95 г/л, что соответствует 1:25 по соотношению N (азот):C (углерод) [37]. Концентрация жизнеспособных спор бактерий в получаемом биопреparate не менее $1 \cdot 10^9$ КОЕ/мл. В данном исследовании бактериальный препарат (БП) вносили в рекомендуемой концентрации 20 мл/га, или 7500 КОЕ/кг почвы. Такая доза применяется на сельскохозяйственных полях для подавления грибов р. *Fusarium* при обработке растений по листу. В связи с этим дополнительно была исследована в 100 раз большая концентрация

препарата (БП×100). Исследовали самостоятельное и совместное внесение биочара и БП, а также инокуляцию БП на биочаре.

В рамках модельного эксперимента почву в вегетационных сосудах увлажняли и загрязняли нефтью в концентрации 5 % от массы почвы. В загрязненную почву вносили биочар (1 % от массы почвы), бактериальный препарат, содержащий штаммы *Bacillus* и *Paenibacillus* (в рекомендуемой и в 100 раз увеличенной дозе). Экспозицию вегетационных сосудов проводили в течение 30 суток при поддержании постоянной влажности почвы и температуры воздуха в климатической камере Binder KBW. Через 30 суток от начала эксперимента в образцах почвы определяли остаточное содержание нефти и фитотоксические показатели почвы. При оценке остаточного содержания нефти проводили сравнение с нефтезагрязненной почвой без ремедиантов (нефтезагрязненный фон).

Для оценки фитотоксичности почвы в полученных вариантах почвы выращивали озимый ячмень (*Hordeum vulgare* L.). Длительность выращивания ячменя составляла 7 дней. В течение этого периода фиксировали показатели интенсивности начального роста семян ячменя: всхожесть, скорость, энергию и дружность прорастания [38]. Через 7 суток каждое растение измеряли по показателям: длина побега и корня, фитомасса побега и корня. Анализ данных проводили по сравнению с контролем с нефтезагрязненной почвой без ремедиантов (нефтезагрязненный фон).

Дружность прорастания семян ячменя определяли по формуле (1):

$$Д = \frac{В}{n}, \quad (1)$$

где В – полная всхожесть; n – число дней прорастания семян.

Энергию прорастания семян ячменя определяли по формуле (2):

$$Э = В_3 \times С(\%), \quad (2)$$

где В₃ – число семян, проросших на третьи сутки; С (%) – процент от общего количества семян, взятых для проращивания.

Скорость прорастания семян ячменя определяли как сумму средних семян, прорастающих ежедневно (формула (3)).

$$С = \frac{А}{1} + \frac{Б}{2} + \frac{В}{3} + \frac{Г}{4} + \frac{Д}{5} + \frac{Е}{6} + \frac{Ж}{7}, \quad (3)$$

где А – число семян, проросших за первые сутки; Б – число семян, проросших за вторые сутки; В – число семян, проросших за третьи сутки; Г – число семян, проросших за четвертые сутки; Д – число семян, проросших за пятые сутки; Е – число семян, проросших за шестые сутки; Ж – число семян, проросших за седьмые сутки.

Расчет комплексного интегрального показателя фитотоксичности почвы (ИПФт) проводили по всем проанализированным фитотоксическим показателям по формуле (4):

$$ИПФт = \frac{Б_n}{Б_{контр}} \times 100, \quad (4)$$

где Б₁...Б_n – значение каждого фитотоксического показателя относительно контроля; Б_{контр} – контрольное значение.

Далее по значениям ИПФт для каждого фитотоксического показателя находят среднее значение ИПФт, которое служит индикатором состояния почвы при самостоятельном, совместном внесении ремедиантов, а также инокуляции БП на биочаре.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программного пакета Statistica 12.0. Статистические данные (средние значения, дисперсия) были определены, а надежность различных образцов была установлена с использованием дисперсионного анализа (Student t-test).

Результаты и обсуждение

Остаточное содержание нефти

Содержание нефти в почве после внесения биочара и БП представлено в табл. 1. Установлено, что без внесения ремедиантов за 30 суток нефть разлагается на 25 %. Аналогичную эффективность разложения нефти наблюдали после самостоятельного внесения БП. При внесении в почву только биочара эффективность разложения нефти составила на 19 % выше, чем в нефтезагрязненной почве без ремедиантов.

Таблица 1. Остаточное содержание нефти через 30 суток после внесения биочара и *Bacillus* и *Paenibacillus*, % от исходного содержания нефти (на первые сутки эксперимента) (n=6)

Table 1. Residual oil content in 30 days after introduction of biochar and *Bacillus* & *Paenibacillus*, % of the initial oil content (on the 1st day of the experiment) (n=6)

Варианты Variants	Без ремедиантов Without ameliorants	Самостоятельное внесение ремедиантов Self-applied applica- tion of ameliorants	Совместное внесение ремедиантов Joint application of ameliorants	Инокуляция ремедиантов Inoculation of ameliorants
нефть/oil	75	-	-	-
биочар (Б) biochar (B)	-	56	-	-
<i>Bacillus</i> и <i>Paenibacillus</i> (БП)/(BP)	-	72	16	50
БП×100 BP×100	-	73	48	31

При совместном применении биочара с БП и биочара с БП×100 установлена эффективность разложения нефти на 59 и 27 % выше, чем в нефтезагрязненной почве без ремедиантов. При инокуляции БП и БП×100 на биочаре установлена эффективность 25 и 44 % соответственно.

Таким образом, совместное применение биочара со БП в нефтезагрязненной почве приводит более эффективному снижению содержания нефти, чем при самостоятельном внесении и инокуляции БП на биочаре в рекомендуемой и стократной дозе.

Показатели интенсивности начального роста ячменя

В нефтезагрязненной почве без ремедиантов показатели интенсивности начального роста такие, как всхожесть, энергия, дружность и скорость прорастания, были снижены на 17–28 % относительно контроля (рис. 1). Самостоятельное внесение биочара и БП простиимулировало все фитотоксические показатели в среднем на 9–39 % относительно нефтезагрязнения.

При внесении биочара и БП установлено максимальное значение энергии и скорости прорастания ячменя. При совместном внесении биочара с БП только при стократной дозе (БП×100) установлена стимуляция всхожести и дружности прораста-

ния на 26 и 27 % от нефтезагрязнения. При инокуляции биочара БП установлено повышение всех показателей интенсивности начального роста на 65–75 % при рекомендуемой дозе БП и на 22–34 % при дозе БП×100 относительно нефтезагрязненного фона соответственно.

Показатели интенсивности роста и развития ячменя

Нефть снижает длину побегов и корней, фитомассу побегов и корней на 17–42 % относительно контроля (рис. 2). При этом длина корней и фитомасса побегов ячменя изменяются в меньшей степени, чем остальные показатели – на 32 и 17 % соответственно. После самостоятельного внесения только биочара установлено повышение длины корней, массы побегов и корней на 9–15 %. Внесение БП во всех дозах не привело к статистически значимому изменению показателей.

Совместное применение биочара и БП вызвало повышение длины побегов и корней (только при биочар+БП×100) на 14–68 % относительно нефтезагрязненного фона. Инокуляция на биочаре БП привела к повышению длины и массы побегов на 40–103 %, длины и массы корней – на 11–66 % относительно нефтезагрязнения.

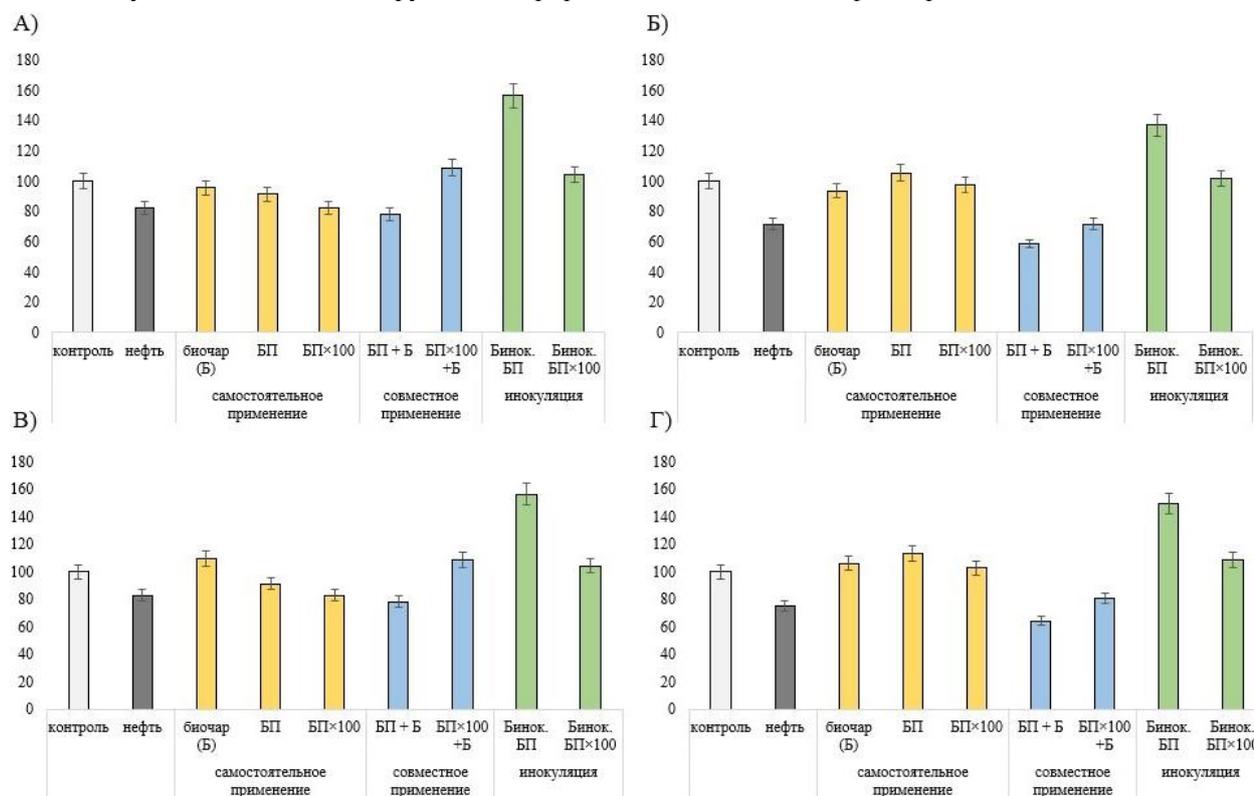


Рис. 1. Изменение интенсивности начального роста ячменя на нефтезагрязненном черноземе обыкновенном после внесения биочара и *Bacillus* и *Paenibacillus* (n=6), % от контроля: А) всхожесть; Б) энергия прорастания; В) дружность прорастания; Г) скорость прорастания

Fig. 1. Change in barley initial growth intensity on oil contaminated Haplic Chernozem after introduction of biochar and *Bacillus* & *Paenibacillus* (n=6), % of the control: А) germination; Б) germination energy; В) friendly germination; Г) growth rate

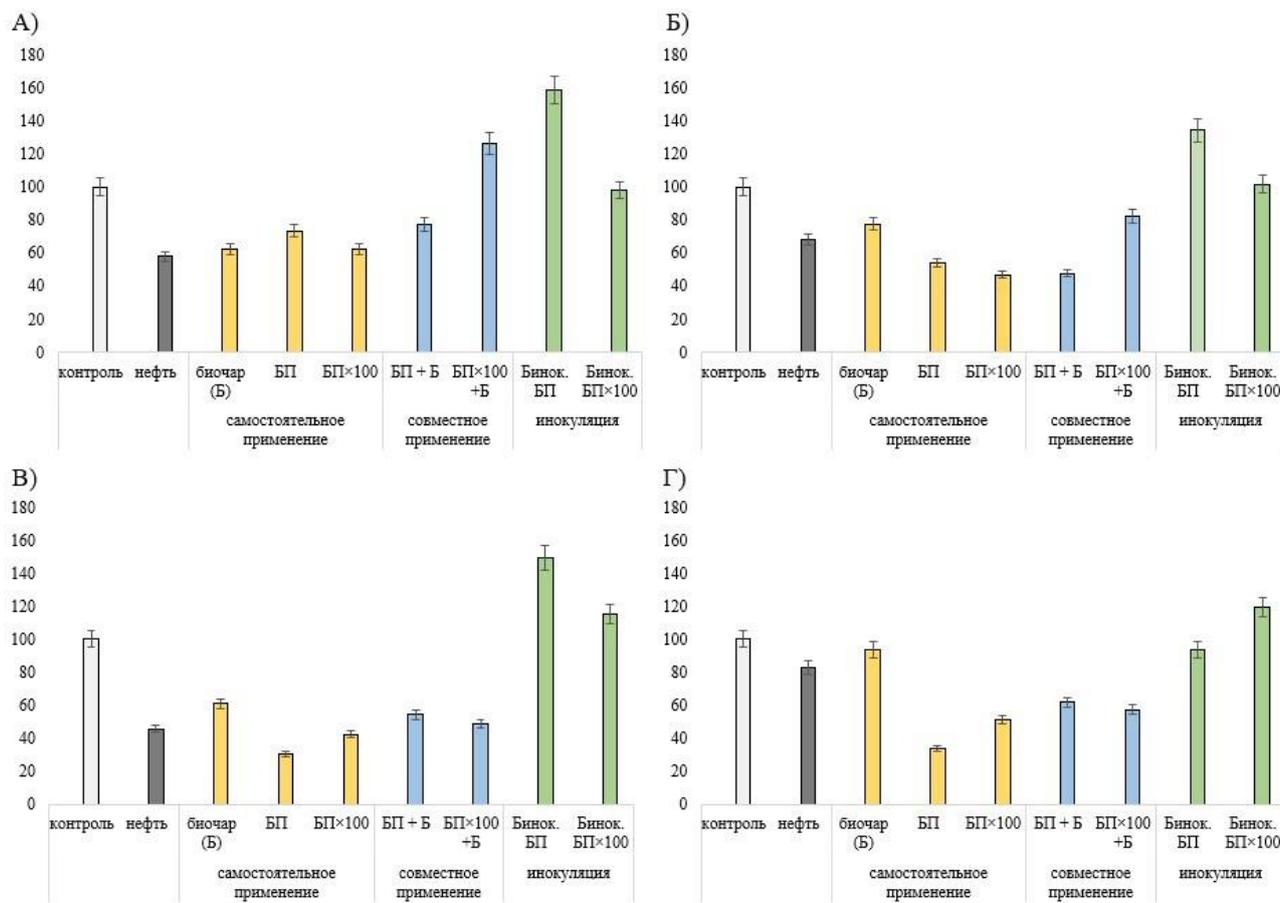


Рис. 2. Изменение интенсивности развития семян ячменя на нефтезагрязненном черноземе обыкновенном после внесения биочара и *Bacillus* и *Paenibacillus* ($n=6$), % от контроля: А) длина побегов; Б) длина корней; В) фитомасса побегов; Г) фитомасса корней

Fig. 2. Change in the intensity of development of barley seeds on oil contaminated Haplic Chernozem after introduction of biochar and *Bacillus* & *Paenibacillus* ($n=6$), % of the control: А) length of shoots; Б) length of roots; В) phytomass of shoots; Г) phytomass of roots

Интегральный показатель фитотоксичности

Все полученные в данном исследовании фитотоксические показатели использовали для расчета интегрального показателя фитотоксичности (ИПФт) нефтезагрязненного чернозема после ремедиации (рис. 3). В результате расчета ИПФт установлено, что только внесение биочара, инокулированного БП и БП×100, стимулирует показатели на 42 и 7 % соответственно относительно контроля, на 100 и 50 % относительно нефтезагрязненного фона.

Внесение биочара самостоятельно стимулирует ИПФт на 23 % относительно нефтезагрязненного фона, но не достигает контрольного значения, а внесение БП и БП×100 не оказывает статистически достоверного воздействия на ИПФт. При совместном применении биочара с БП×100 установлена стимуляция ИПФт на 21 % относительно нефтезагрязненного фона.

Таким образом, самостоятельное внесение биочара стимулирует показатели интенсивности начального роста ячменя, но снижает фитомассу побегов, длину побегов и корней ячменя. Внесение БП стимулирует все показатели интенсивности начального роста. При кратном увеличении дозы БП×100 всхожесть и дружность прорастания снижаются. При совместном применении биочара с БП установлено только повышение показателей интенсивности начального роста, показатели развития семян были снижены относительно нефтезагрязненного фона. Инокуляция БП на биочаре вызвала стимуляцию как показателей интенсивности начального роста, так и показателей развития семян ячменя. На основании анализа фитотоксичности установлена наибольшая чувствительность показателей развития семян ячменя: длина корней, фитомасса корней и побегов.

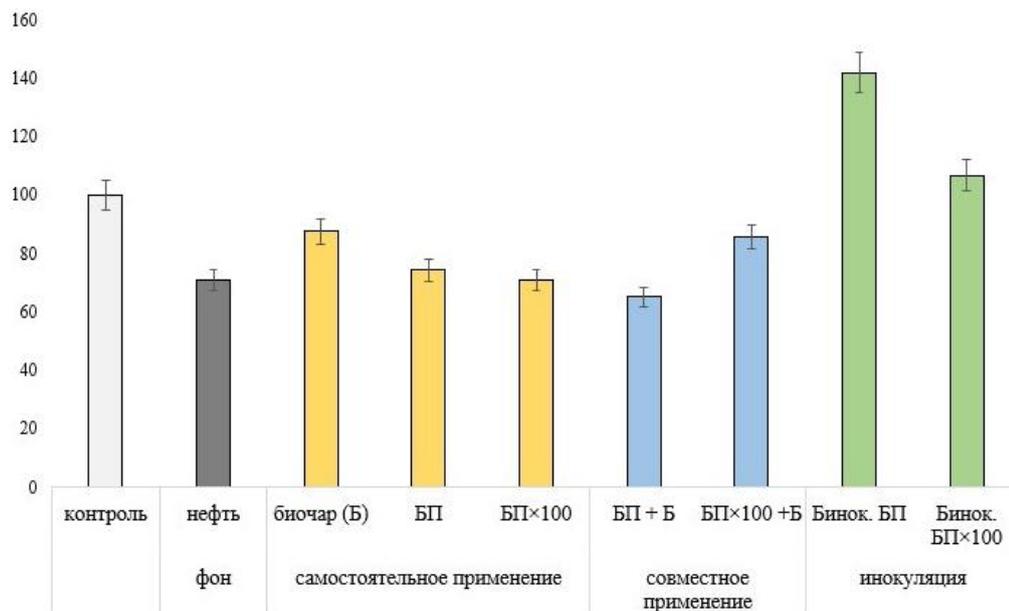


Рис. 3. Интегральный показатель фитотоксичности ячменя на нефтезагрязненном черноземе после внесения биочара и *Bacillus* и *Paenibacillus*, % от контроля

Fig. 3. Integral indicator of phytotoxicity (IIPht) of barley on oil-contaminated chernozem after introduction of biochar and *Bacillus* & *Paenibacillus*, % of control

Были рассчитаны коэффициенты корреляции между остаточным содержанием нефти и откликом показателей интенсивности начального роста и развития семян ячменя (табл. 2). Установлена тесная отрицательная корреляция при самостоятельном внесении биочара и БП между остаточным содержанием нефти и всхожестью ($r = -0,84$), дружностью прорастания ($r = -0,97$), длиной корней ($r = -0,68$) и фитомассой корней ($r = -0,56$) ячменя. При этом корреляция с ИПФт составила $r = -0,99$. При совместном применении биочара с БП наблюдали тесную корреляцию только с фитомассой побегов ячменя ($r = -1,00$). Корреляция остаточного содержания нефти с ИПФт составила $r = 0,33$. При инокуляции

БП на биочаре установлена тесная отрицательная корреляция с энергией прорастания ($r = -0,53$), скоростью ($r = -0,52$), длиной побегов ($r = -0,47$), длиной корней ($r = -0,57$), фитомассой побегов ($r = -0,72$), фитомассой корней ($r = -0,95$). Корреляция остаточного содержания нефти с ИПФт составила $r = -0,57$.

Самыми информативными показателями при самостоятельном внесении биочара и БП являются фитомасса побегов, всхожесть и дружность прорастания; при совместном внесении биочара и БП – энергия прорастания, длина побега и фитомасса побегов; при инокуляции БП на биочаре – длина корней, фитомасса побегов и корней.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (r) между остаточным содержанием нефти и откликом фитотоксических показателей при самостоятельном, совместном применении биочара с *Bacillus* и *Paenibacillus*, инокуляции *Bacillus* и *Paenibacillus* на биочаре ($n=6$)

Table 2. Correlation coefficients (r) between the residual oil content and the response of phytotoxic parameters in the case of independent, combined application of biochar with *Bacillus* & *Paenibacillus*, and inoculation of *Bacillus* & *Paenibacillus* on biochar ($n=6$)

Всхожесть Germination	Энергия прорастания Germination energy	Дружность прорастания Germination friendliness	Скорость прорастания Germination rate	Длина побегов Length of shoots	Длина корней Length of roots	Фитомасса побегов Phytomass of shoots	Фитомасса корней Phytomass of roots	ИПФт IIPht
Самостоятельное внесение ремедиантов/Self-applied application of ameliorants								
-0,84**	-0,21	-0,97**	-0,41	0,03	-0,68**	-0,78*	-0,56*	-0,99**
Совместное внесение ремедиантов/Joint application of ameliorants								
0,19	0,89	0,19	0,67	-0,22	0,64	-1,00**	0,74	0,33
Инокуляция ремедиантов/Inoculation of ameliorants								
-0,36	-0,53**	-0,36	-0,52**	-0,47*	-0,57**	-0,72**	-0,95**	-0,57**

Примечание: статистическая значимость разницы от контроля: * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$.

Note: statistical significance of control difference: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$.

По результатам анализа табл. 2 установлены ряды информативности фитотоксических показателей (от наименее информативного к наиболее **информативному**):

- при самостоятельном внесении биочара и БП:
длина побега < энергия прорастания < скорость прорастания < фитомасса корней < длина корней < фитомасса побегов < всхожесть < дружность прорастания
- при совместном внесении биочара и БП:
всхожесть = дружность прорастания < длина корней < скорость прорастания < фитомасса корней < энергия прорастания < длина побега < фитомасса побегов
- при инокуляции БП на биочаре:
всхожесть = дружность прорастания < длина побега < скорость прорастания < энергия прорастания < длина корней < фитомасса побегов < фитомасса корней.

Таким образом, при ремедиации нефтезагрязненной почвы биочаром и БП при самостоятельном внесении наиболее информативны фитомасса побегов, всхожесть и дружность прорастания, при совместном внесении – энергия прорастания, длина побега и фитомасса побегов, при инокуляции – длина корней, фитомасса побегов и корней.

При снижении содержания нефти в почве в результате ремедиации ферментативная активность может снижаться, что обусловлено накоплением органами растений нефти и ее метаболитов [39]. При моделировании загрязнения чернозема обыкновенного бензо[а]пиреном было установлено, что активность оксидоредуктаз (каталазы и дегидрогеназы) чернозема была ингибирована с ростом концентрации бензо[а]пирена в почве. Кроме того, тенденции выраженной фитотоксичности почв были установлены по энергии прорастания, длине побегов, фитомассе ячменя и длине колоса. Количественные уровни поглощения бензо[а]пирена корнями ярового ячменя превышали уровни поглощения в вегетативной части более чем в 2,5 раза во всех загрязненных вариантах [40]. Ранее в работе [41] было установлено, что максимальное накопление бензапирена в результате многолетних выбросов Новочеркасской ГРЭС обнаружено в типчаке обыкновенном (*Festuca valesiaca* L.) и составило 36,4 нг/г, а в озимой пшенице (*Triticum*

aestivum L.) содержание бензо[а]пирена установлено в 5 раз меньше (7,1 нг/г) по сравнению с типчаком обыкновенным. Л. Панченко с соавторами [28] при технической фиторемедиации сообщают, что, включая обработку почвы, посадку и полив люцерны посевной (*Medicago sativa* L.), плевела многолетнего (*Lolium perenne* L.), годовая степень очистки почвы от нефтяных углеводородов достигает 72–90 %. Эффективность биочара, как ремедианта, была оценена ранее по остаточному содержанию нефти и стимуляции ферментативной активности трех типов почв [31]. Установлено, что ферментативная активность в бурой лесной почве (Haplic Cambisols) после применения биочара восстанавливается быстрее, чем в черноземе обыкновенном (Haplic Chernozem) или серопесках (Haplic Arenosols). Ремедиационный потенциал биочара для восстановления нефтезагрязненной почвы зависит от его физических и химических свойств, на которые значительное влияние оказывают качество сырья и условия проведения пиролиза [42]. Биочар, инокулированный различными штаммами грамположительных бактерий, актиномицетов и арбускулярных микоризных грибов, способствовал восстановлению микробного сообщества почвы после загрязнения сырой нефтью [43].

Заключение

Установлено, что наибольшей чувствительностью среди показателей развития семян ячменя обладают длина корней, фитомасса корней и побегов. При самостоятельном внесении биочара и бактериальным препаратом наиболее информативны фитомасса побегов, всхожесть и дружность прорастания, при совместном внесении – энергия прорастания, длина побега и фитомасса побегов, при инокуляции – длина корней, фитомасса побегов и корней. Исследование и оценка фитотоксичности нефтезагрязненного чернозема после ремедиации позволили установить экологическую эффективность и целесообразность применения самостоятельно биочара и биочара, инокулированного штаммами *Bacillus* и *Paenibacillus*. Результаты исследования можно использовать при оценке экологического состояния и здоровья нефтезагрязненных почв после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом со штаммами *Bacillus* и *Paenibacillus*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) / А.Н. Геннадиев, Ю.И. Пиковский, А.С. Цибарт, М.А. Смирнова // Почвоведение. – 2015. – № 10. – С. 1195–1209.
2. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А. Углеводородное состояние почв в ландшафтах: генезис, типизация // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2018. – № 6. – С. 3–9.
3. Влияние нефти на почвенный покров и проблема создания нормативной базы по влиянию нефтезагрязнения на почвы / С.Я. Трофимов, Я.М. Аммосова, Д.С. Орлов, Н.И. Суханова, Н.Н. Осипова // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2000. – № 2. – С. 30–34.
4. Сангаджиева Л.Х., Даваева Ц.Д., Булуктаев А.А. Влияние нефтяного загрязнения на фитотоксичность светлокаштановых почв Калмыкии // Вестник Калмыцкого университета. – 2013. – № 1 (17). – С. 44–47.

5. Современные вопросы технологической безопасности в нефтегазовой отрасли Калмыкии / М.М. Сангаджиев, Г.Э. Настинова, Л.Х. Сангаджиева, С.Л. Бочкаев // Геология, география и глобальная энергия. – 2022. – № 3 (86). – С. 28–36. DOI: 10.54398/20776322_2022_3_28
6. Цомбуева Б.В. Техногенное загрязнение почв в зоне влияния нефтедобывающего комплекса республики Калмыкия // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 1038. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21163475_35372598.pdf (дата обращения 15.07.2023).
7. Цомбуева Б.В., Горяшкиева З.В., Щербакова Л.Ф. Метод очистки почвы от нефтяного загрязнения с помощью природных сорбентов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 19–25.
8. Комплексная переработка тяжелых высоковязких нефтей и нефтяных остатков с извлечением ванадия, никеля и молибдена / М.Я. Висалиев, М.Я. Шпирт, Х.М. Кадиев, В.И. Дворкин, Э.Э. Магоматов, С.Н. Хаджиев // Химия твердого топлива. – 2012. – № 2. – С. 32. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17679648_23045937.pdf (дата обращения 15.07.2023).
9. Мустафина Э.А., Полетаева О.Ю., Мовсумзаде Э.М. Тяжелые металлоносные нефти и их деметаллизация // НефтеГазоХимия. – 2014. – № 4. – С. 15–18.
10. Study on phytoremediation of soils polluted with heavy metals and oil pollutants in agricultural lands affected by Persian Gulf War / S. Saadat, R. Mirkhani, A. Mohebi, S. Pozesh, M. Morteza, R. Gholam, B.R. Chakerolhosseini, M.H. Mosaviefazl, Y.R. Bagjeri, S. Tabbakhiyan, N. Mabodi, K. Saghafi, H. Rezaei, H. Khodaverdiloo. – Karaj, Iran: Soil and Water Research Institute, 2014. – 130 p.
11. Effects of oil contamination on plant growth and development: a review / H. Silva Correa, C.T. Blum, F. Galvão, L.T. Maranhão // Environ Sci Pollut Res Int. – 2022. – V. 29 (29). – P. 43501–43515. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19939-9> (дата обращения 15.07.2023).
12. Динамика загрязнения почв полициклическими ароматическими углеводородами и индикация состояния почвенных экосистем / А.Н. Геннадиев, И.С. Козин, Е.И. Шурубор, Т.А. Теплицкая // Почвоведение – 1990. – № 10. – С. 75–85.
13. Назаров А.В. Влияние нефтяного загрязнения почвы на растения // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2007. – № 5. – С. 134–141.
14. Оценка воздействия антропогенно трансформированных почв на рост и биопродуктивность сельхозкультур / В.П. Воронина, А.Ю. Бирюков, Р.В. Ведилин, А.В. Инякин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 2 (42). – С. 49–56.
15. Бородулина Т.С., Полонский В.И. Влияние нефтезагрязнения почвы на физиологические характеристики растений пшеницы // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2010. – № 5. – С. 50–55.
16. Мязин В.А., Редькина В.В. Влияние загрязнения почвы нефтепродуктами на рост *Secale Cereale* L. и перспективы ее использования при фиторемедиации // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2016. – № 19 (1–2). – С. 217–221.
17. Особенности органоминерального состава ценопопуляций лекарственных растений прикаспийской низменности / Л.Х. Сангаджиева, Е.Н. Бамбаева, О.С. Сангаджиева, Ц.Д. Даваева, З.В. Сохорова, А.В. Манжикова // Медико-фармацевтический журнал Пульс. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 35–46. URL: <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2022-24-2-35-46> (дата обращения 15.07.2023).
18. Байчоров Р.А. Действие нефти и нефтепродуктов на свойства почв и продуктивность растений // E-Scio. – 2020. – № 2 (41). – С. 143–148.
19. Назарюк В.М., Кленова М.И., Калимуллина Ф.Р. Роль минерального питания в повышении продуктивности растений и регулировании пищевого режима почвы, загрязненной нефтью // Агрохимия. – 2007. – № 7. – С. 64–73.
20. Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р. Роль удобрений в азотном питании растений при загрязнении почвы нефтью // Агрохимия. – 2020. – № 4. – С. 76–84. URL: <https://doi.org/10.31857/S0002188120040092> (дата обращения 15.07.2023).
21. Оценка эффективности ремедиации нефтезагрязнённых почв сорбционно-биологическими методами в лабораторных условиях / Д.М. Успанова, О.В. Нечаева, О.В. Абросимова, Е.В. Глинская, Е.И. Тихомирова, Н.В. Беспалова // Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – № 4. – С. 172–179. URL: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-172-179> (дата обращения 15.07.2023).
22. Sivkov Y.V., Nikiforov A.S. Study of oil-contaminated soils phytotoxicity during bioremediation activities // Journal of Ecological Engineering. – 2021. – Vol. 22 (3). – P. 67–72. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/132435> (дата обращения 15.07.2023).
23. Тишин А.С. Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 12-2 (102). – С. 78–83. URL: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048> (дата обращения 15.07.2023).
24. Булуктаев А.А. Фитотоксичность нефтезагрязненных почв аридных территорий (в условиях модельного эксперимента) // Журнал экологии экосистем. – 2019. – № 3. – С. 59–68.
25. ISO 11269-1:2012. Soil quality – determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth. 2012. – 16 p.
26. The application of bioassays as indicators of petroleum-contaminated soil remediation / G. Płaza, G. Nałecz-Jawecki, K. Ulfig, R.L. Brigmon // Chemosphere. – 2005. – Vol. 59. – P. 289–296.
27. Илларионов С.А., Назаров А.В., Калачникова И.Г. Роль микромицетов в фитотоксичности нефтезагрязненных почв // Экология. – 2003. – № 5. – С. 341–346.
28. Natural and technical phytoremediation of oil-contaminated soil / L. Panchenko, A. Muratova, E. Dubrovskaya, S. Golubev, O. Turkovskaya // Life. – 2023. – № 13. – P. 177. URL: <https://doi.org/10.3390/life13010177> (дата обращения 15.07.2023).

29. Effect of crude oil on growth, oxidative stress and response of antioxidative system of two rye (*Secale cereale* L.) varieties / L. Skrypnik, P. Maslennikov, A. Novikova, M. Kozhikin // *Plants*. – 2021. – № 10 (1). – P. 157. URL: <https://doi.org/10.3390/plants10010157> (дата обращения 15.07.2023).
30. Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils? / C.C. Dike, E. Shahsavari, A. Surapaneni, K. Shah, A.S. Ball // *Environ Int*. – 2021. – № 154. – P. 106553. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106553> (дата обращения 15.07.2023).
31. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the south of Russia after bioremediation / T. Minnikova, S. Kolesnikov, S. Revina, A. Ruseva, V. Gaivoronsky // *Toxics*. – 2023. – Vol. 11. – P. 355. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics11040355> (дата обращения 15.07.2023).
32. Rhamnolipid-modified biochar-enhanced bioremediation of crude oil-contaminated soil and mediated regulation of greenhouse gas emission in soil / M. Zhen, J. Tang, C. Li, H. Sun // *J Soils Sediments*. – 2021. – № 21. – P. 123–133. URL: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02746-5> (дата обращения 15.07.2023).
33. Biochar-mediated remediation impacts on nitrogen cycling bacteria and ammonia monoxygenase activity in crude oil polluted soil / A.U. Osadebe, I.W. Davis, C.J. Ogbue, G.C. Okpokwasili // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 14. – № 3. – P. 466–489. URL: <https://doi.org/10.4314/jfas.1217> (дата обращения 15.07.2023).
34. Enhanced growth of mungbean and remediation of petroleum hydrocarbons by enterobacter sp. MN17 and biochar addition in diesel contaminated soil / M.H. Ali, M.T. Sattar, M.I. Khan, M. Naveed, M. Rafique, S. Alamri, M.H. Siddiqui // *Applied Sciences*. – 2020. – № 10 (23). – P. 8548. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238548> (дата обращения 15.07.2023).
35. World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. – Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. – 234 p.
36. Быкова М.В., Пашкевич М.А. Оценка нефтезагрязненности почв производственных объектов различных почвенно-климатических зон Российской Федерации // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. – 2020. – № 1. – С. 46–59.
37. Patent № 2751487 C1 Russia, IPC: A01N 63/22; Method for producing liquid nutrition medium and method for obtaining liquid microbiological agent based on strains mixture of spore-forming bacteria antagonists of phytopathogenic fungi of g. *Fusarium*: № 2020122106: priority 03.07.2020; publication 14.07.2021. – 6 p
38. Звягинцев А.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Изд-во Московского университета, 2005. – 448 с.
39. The effect of petroleum-derived substances and their bioremediation on soil enzymatic activity and soil invertebrates / J. Gospodarek, M. Rusin, G. Barczyk, A. Nadgórska-Socha // *Agronomy*. – 2021. – № 11 (1). – P. 80. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010080> (дата обращения 15.07.2023).
40. Оценка влияния бенз(а)пирена на биологическую активность чернозема Ростовской области / Т.В. Минникова, С.Н. Сушкова, С.С. Манджиева, Т.М. Минкина, С.И. Колесников // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 91–102. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2396> (дата обращения 15.07.2023).
41. Накопление бенз[а]пирена в растениях разных видов и органогенном горизонте почв степных фитоценозов при техногенном загрязнении / С.Н. Сушкова, Е.В. Яковлева, Т.М. Минкина, Д.Н. Габов, Е.М. Антоненко, Т.С. Дудникова, А.И. Барбашев, Т.В. Минникова, С.И. Колесников, В.Д. Раджпут // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 200–214. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2953> (дата обращения 15.07.2023).
42. Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil / M.A. Zahed, S. Salehi, R. Madadi, F. Hejabi // *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. – 2021. – № 4. – P. 100055. URL: <https://doi.org/10.1016/J.CRGSC.2021.100055> (дата обращения 15.07.2023).
43. Potential use of biochar and rhamnolipid biosurfactant for remediation of crude oil-contaminated coastal wetland soil: ecotoxicity assessment / Z. Wei, J.J. Wang, Y. Meng, J. Li, L.A. Gaston, L.M. Fultz, R.D. DeLaune // *Chemosphere*. – 2020. – № 253. – P. 126617. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126617> (дата обращения 15.07.2023).

Информация об авторах

Татьяна Владимировна Минникова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1. loko261008@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137>

Сергей Ильич Колесников, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1. kolesnikov@sfedu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2124-6328>

Никита Степанович Минин, аспирант кафедры экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1. minin@sfedu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1187-4291>

Поступила в редакцию: 20.07.2023

Поступила после рецензирования: 15.02.2024

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Gennadiev A.N., Pikovskii Y.I., Tsibart A.S., Smirnova M.A. Hydrocarbons in soils: origin, composition, and behavior (review). *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, no. 10, pp. 1076–1089. (In Russ.)
2. Gennadiev A.N., Pikovskiy Yu.I., Smirnova M.A. Hydrocarbon status of soils in landscapes: genesis and typification. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2018, no. (6), pp. 3–9. (In Russ.)
3. Trofimov S.Ya., Ammosova Ya.M., Orlov D.S., Sukhanova N.I., Osipova N.N. Influence of oil on the soil cover and the problem of creating a regulatory framework for the impact of oil pollution on soils. *Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil science*, 2000, no. 2, pp. 30–34. (In Russ.)
4. Sangadzhieva L.Kh., Davaeva Ts.D., Buluktaev A.A. Influence of oil pollution on the phytotoxicity of light chestnut soils of Kalmykia. *Bulletin of the Kalmyk University*, 2013, no. 1 (17), pp. 44–47. (In Russ.)
5. Sangadzhiev M.M., Nastinova G.E., Sangadzhieva L.Kh., Bochkayev S.L. Modern issues of technological safety in the oil and gas industry of Kalmykia. *Geology, geography and global energy*, 2022, no. 3 (86), pp. 28–36. (In Russ.) DOI: 10.54398/20776322_2022_3_28
6. Tsombueva B.V. Technogenic pollution of soils in the zone of influence of the oil-producing complex of the Republic of Kalmykia. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, pp. 1038 (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21163475_35372598.pdf (accessed 15 July 2023).
7. Tsombueva B.V., Goryashkueva Z.V., Shcherbakova L.F. The method of cleaning the soil from oil pollution using natural sorbents. *Bulletin of the Volgograd State University. Series 11: Natural Sciences*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 19–25. (In Russ.)
8. Visaliev M.Ya., Shpirt M.Ya., Kadiev Kh.M., Dvorkin V.I., Magomadov E.E., Khadzhiyev S.N. Complex processing of heavy high-viscosity oils and oil residues with the extraction of vanadium, nickel and molybdenum. *Chemistry of Solid Fuels*, 2012, no. 2, pp. 32. (In Russ.) Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17679648_23045937.pdf (accessed 15 July 2023).
9. Mustafina E.A., Poletaeva O.Yu., Movsumzade E.M. Heavy metal-bearing oils and their demetallization. *NefteGazoKimiya*, 2014, no. 4, pp. 15–18. (In Russ.)
10. Saadat S., Mirkhani R., Mohebi A., Pozesh S., Morteza M., Gholam R., Chakerolhosseini B.R., Mosaviefazl M.H., Bagjeri Y.R., Tabbakhiyan S., Mabodi N., Saghafi K., Rezaei H., Khodaverdiloo H. *Study on phytoremediation of soils polluted with heavy metals and oil pollutants in agricultural lands affected by Persian Gulf War*. Karaj, Iran, Soil and Water Research Institute, 2014. 130 p.
11. Silva Correa H., Blum C.T., Galvão F., Maranhão L.T. Effects of oil contamination on plant growth and development: a review. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2022, no. 29 (29), pp. 43501–43515. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19939-9> (accessed 15 July 2023).
12. Gennadiev A.N., Kozin I.S., Shurubor E.I., Teplitskaya T.A. Dynamics of soil pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons and indication of the state of soil ecosystems. *Soil Science*, 1990, no. 10, pp. 75–85. (In Russ.)
13. Nazarov A.V. Influence of oil pollution of the soil on plants. *Bulletin of the Perm University. Series: Biology*, 2007, no. 5, pp. 134–141. (In Russ.)
14. Voronina V.P., Biryukov A.Yu., Vedilin R.V., Inyakin A.V. Assessment of the impact of anthropogenically transformed soils on the growth and bioproductivity of agricultural crops. *Izvestiya of the Nizhnevolzhsky agrouniversity complex: science and higher professional education*, 2016, no. 2 (42), pp. 49–56. (In Russ.)
15. Borodulina T.S., Polonsky V.I. Influence of soil oil pollution on the physiological characteristics of wheat plants. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2010, no. 5, pp. 50–55. (In Russ.)
16. Myazin V.A., Redkina V.V. Influence of soil pollution with oil products on the growth of *Secale Cereale* L. and prospects for its use in phytoremediation. *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 2016, no. 19 (1–2), pp. 217–221. (In Russ.)
17. Sangadzhieva L.Kh., Bambaeva E.N., Sangadzhieva O.S., Davaeva Ts.D., Sohorova Z.V., Manzhikova A.V. Features of the organomineral composition of cenopopulations of medicinal plants of the Caspian lowland. *Medico-pharmaceutical journal Pulse*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 35–46. Available at: <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2022-24-2-35-46> (accessed 15 July 2023). (In Russ.)
18. Baichorov R.A. Effect of oil and oil products on soil properties and plant productivity. *E-Scio*, 2020, no. 2 (41), pp. 143–148. (In Russ.)
19. Nazaryuk V.M., Klenova M.I., Kalimullina F.R. The role of mineral nutrition in increasing plant productivity and regulating the nutritional regime of soil contaminated with oil. *Agrochemistry*, 2007, no. 7, pp. 64–73. (In Russ.)
20. Nazaryuk V.M., Kalimullina F.R. The role of fertilizers in nitrogen nutrition of plants when soil is contaminated with oil. *Agrochemistry*, 2020, no. 4, pp. 76–84 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.31857/S0002188120040092> (accessed 15 July 2023).
21. Uspanova D.M., Nechaeva O.V., Abrosimova O.V., Glinskaya E.V., Tikhomirova E.I., Bepalova N.V. Evaluation of the effectiveness of remediation of oil-contaminated soils by sorption-biological methods in laboratory conditions. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2022, no. 4, pp. 172–179 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-172-179> (accessed 15 July 2023).
22. Sivkov Y.V., Nikiforov A.S. Study of oil-contaminated soils phytotoxicity during bioremediation activities. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, no. 22 (3), pp. 67–72 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.12911/22998993/132435> (accessed 15 July 2023).
23. Tishin A.S. Phytotesting of soils contaminated with oil products. *International Scientific Research Journal*, 2020, no. 12-2 (102), pp. 78–83 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048> (accessed 15 July 2023).
24. Buluktaev A.A. Phytotoxicity of oil-contaminated soils of arid territories (under the conditions of a model experiment). *Journal of Ecosystem Ecology*, 2019, no. 3, pp. 59–68. (In Russ.)
25. ISO 11269-1:2012. *Soil quality – determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth*. 2012. 16 p.

26. Plaza G., Nalecz-Jawecki G., Ulfig K., Brigmon R.L. The application of bioassays as indicators of petroleum-contaminated soil remediation. *Chemosphere*, 2005, no. 59, pp. 289–296.
27. Illarionov S.A., Nazarov A.V., Kalachnikova I.G. The role of micromycetes in the phytotoxicity of oil-contaminated soils. *Ecology*, 2003, no. 5, pp. 341–346. (In Russ.)
28. Panchenko L., Muratova A., Dubrovskaya E., Golubev S., Turkovskaya O. Natural and Technical Phytoremediation of Oil-Contaminated Soil. *Life*, 2023, no. 13, pp. 177. Available at: <https://doi.org/10.3390/life13010177> (accessed 15 July 2023).
29. Skrypnik L., Maslennikov P., Novikova A., Kozhikin M. Effect of crude oil on growth, oxidative stress and response of antioxidative system of two rye (*Secale cereale* L.) varieties. *Plants*, 2021, no. 10 (1), pp. 157. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants10010157> (accessed 15 July 2023).
30. Dike C.C., Shahsavari E., Surapaneni A., Shah K., Ball A.S. Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils? *Environ Int*, 2021, no. 154, pp. 106553. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106553> (accessed 15 July 2023).
31. Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Ruseva A., Gaivoronsky V. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the south of Russia after bioremediation. *Toxics*, 2023, no. 11, pp. 355. Available at: <https://doi.org/10.3390/toxics11040355> (accessed 15 July 2023).
32. Zhen M., Tang J., Li C., Sun H. Rhamnolipid-modified biochar-enhanced bioremediation of crude oil-contaminated soil and mediated regulation of greenhouse gas emission in soil. *J Soils Sediments*, 2021, no. 21, pp. 123–133. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02746-5> (accessed 15 July 2023).
33. Osadebe A.U., Davis I.W., Ogugbue C.J., Okpokwasili, G.C. Biochar-mediated remediation impacts on nitrogen cycling bacteria and ammonia monooxygenase activity in crude oil polluted soil. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 466–489. Available at: <https://doi.org/10.4314/jfas.1217> (accessed 15 July 2023).
34. Ali M.H., Sattar M.T., Khan M.I., Naveed M., Rafique M., Alamri S., Siddiqui M.H. Enhanced growth of mungbean and remediation of petroleum hydrocarbons by *Enterobacter* sp. MN17 and biochar addition in diesel contaminated soil. *Applied Sciences*, 2020, no. 10 (23), pp. 8548. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10238548> (accessed 15 July 2023).
35. *World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th ed. Vienna, Austria, International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
36. Bykova M.V., Pashkevich M.A. Estimation of oil pollution of soils of production facilities in various soil-climatic zones of the Russian Federation. *Bulletin of the Tula State University. Earth sciences*, 2020, no. 1, pp. 46–59. (In Russ.)
37. Chistyakov V.A., Gorovtsov A.V., Usatov A.V., Prazdnova E.V., Mazanko M.S., Bren A.B., Usatova O.A., Vasilchenko N.G. *Method for producing liquid nutrition medium and method for obtaining liquid microbiological agent based on strains mixture of spore-forming bacteria antagonists of phytopathogenic fungi of g. Fusarium*. Patent RF no. 2751487, 2021. (In Russ.)
38. Zvyagintsev A.G., Babieva I.P., Zenova G.M. *Soil biology*. 3rd ed. Moscow, Moscow University Publ. House, 2005. 448 p. (In Russ.)
39. Gospodarek J., Rusin M., Barczyk G., Nadgórska-Socha A. The effect of petroleum-derived substances and their bioremediation on soil enzymatic activity and soil invertebrates. *Agronomy*, 2021, no. 11 (1), pp. 80. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010080> (accessed 15 July 2023).
40. Minnikova T.V., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S., Minkina T.M., Kolesnikov S.I. Evaluation of the influence of benzo(a)pyrene on the biological activity of the chernozem of the Rostov region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 91–102. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2396> (accessed 15 July 2023).
41. Sushkova S.N., Yakovleva E.V., Minkina T.M., Gabov D.N., Antonenko E.M., Dudnikova T.S., Barbashev A.I., Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Rajput V.D. Accumulation of benzo[a]pyrene in plants of different species and in the organogenic horizon of soils of steppe phytocenoses under technogenic pollution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 200–214. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2953> (accessed 15 July 2023).
42. Zahed M.A., Salehi S., Madadi R., Hejabi F. Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, no. 4, pp. 100055. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CRGSC.2021.100055> (accessed 15 July 2023).
43. Wei Z., Wang J.J., Meng Y., Li J., Gaston L.A., Fultz L.M., DeLaune R.D. Potential use of biochar and rhamnolipid biosurfactant for remediation of crude oil-contaminated coastal wetland soil: Ecotoxicity assessment. *Chemosphere*, 2020, no. 253, pp. 126617. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126617> (accessed 15 July 2023).

Information about the authors

Tatiana V. Minnikova, Cand. Sc., Leading Researcher, Southern Federal University, 194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. loko261008@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137>

Sergey I. Kolesnikov, Dr. Sc., Professor, Head of the Department, Southern Federal University, 194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. kolesnikov@sfedu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2124-63287>

Nikita S. Minin, Postgraduate Student, Southern Federal University, 194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. minin@sfedu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1187-4291>

Received: 20.07.2023

Revised: 15.02.2024

Accepted: 10.04.2024

УДК 339.976.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246
Шифр специальности ВАК: 5.2.3, 5.2.5

Оценка влияния различных факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира

И.В. Проворная^{1✉}, И.В. Филимонова¹, А.Д. Крутилина²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

✉ provornayaiv@gmail.com

Аннотация. Актуальность. При своевременном перестроении экономики в углеродно-нейтральную сторону негативное антропогенное воздействие можно будет ослабить. Целесообразно будет провести комплексный анализ воздействия различных факторов на климатическую политику страны. Более того, исследование опыта развитых государств даст возможность применить их достижения в области климатической политики в России, усовершенствовав и модернизировав политику исходя из национальной особенности экономики. **Цель** исследования заключается в оценке степени влияния эколого-климатических и макроэкономических факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира. **Объектом** исследования являются параметры климатической политики стран мира в области регулирования выбросов углекислого газа, предметом исследования – взаимосвязи эколого-климатических и макроэкономических факторов с углеродоемкостью экономик стран мира. **Методы:** эконометрический метод анализа панельных данных. **Научная новизна.** Подтверждена гипотеза отрицательного влияния одного из основных инструментов климатической политики стран мира (цены на углерод) на углеродоемкость экономики. **Результаты.** Обоснован набор факторов, которые влияют на углеродоемкость стран мира, дополненный таким показателем, как цена на углерод, который является одним из главных показателей развития климатической политики в стране. Все факторы были разделены на две группы (макроэкономические и эколого-климатические), и сформирована база данных для 23 стран. С использованием метода панельных данных построено уравнение зависимости углеродоемкости экономик стран от макроэкономических и эколого-климатических факторов и проверена гипотеза отрицательного влияния цены на углерод на углеродоемкость ВВП стран мира. Оценка различных спецификаций моделей позволила подтвердить данную гипотезу, что свидетельствует о важности развития климатической политики внутри каждой страны и целесообразности введения новых инструментов по регулированию эмиссии углекислого газа. Также было определено, что ВВП, как общий показатель развития всей экономики, имеет наибольшее влияние на сокращение углеродоемкости. При этом для сокращения отношения выбросов углекислого газа к валовому внутреннему продукту необходимо проводить политику замещения ископаемых на низкоуглеродные источники энергии, но только с учётом сырьевых возможностей страны и отраслевой специфики экономики.

Ключевые слова: углеродоемкость экономики, факторы, выбросы углекислого газа, панельные данные, страны мира

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-28-02056.

Для цитирования: Проворная И.В., Филимонова И.В., Крутилина А.Д. Оценка влияния различных факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 107–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246

UDC 339.976.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246

Assessment of the impact of different factors on changes in carbon intensity of the world economies

I.V. Provornaya^{1✉}, I.V. Filimonova¹, A.D. Krutilina²

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

✉ provornayaiv@gmail.com

Abstract. Relevance. With the restructuring of the economy in the carbon-neutral side, the negative anthropogenic impact can be weakened. It is very likely that there will be a comprehensive analysis of the impact of various climatic accidents in the country and its action to eliminate the risk of carbon dioxide. Moreover, studies in the experience of the peoples of the states make it possible to use their achievements in the field of climate policy in Russia, improve and modernize their advantages from the characteristics of the national economy. **Aim.** To assess the degree of impact of environmental, climatic and macroeconomic factors on the change in the carbon intensity of the economies of the world. **Objects.** The parameters of the climate policy of the countries of the world in the field of regulation of carbon dioxide emissions. The subject of the study is the relationship of environmental, climatic and macroeconomic factors with the carbon intensity of the economies of the world. **Methods.** Econometric method of panel data analysis. **Scientific novelty.** The paper confirms the hypothesis of the negative impact of one of the main climate policy instruments of the countries of the world (carbon prices) on the carbon intensity of the economy using the construction of the original panel data model. **Results.** The authors have substantiated a set of factors that affect the carbon intensity of the countries of the world, supplemented by such an indicator as the carbon price, which is one of the main indicators of climate policy development in the country. All factors were divided into two groups (macroeconomic and ecological-climatic) and a database was formed for 24 countries. Using the panel data method, the authors constructed the equation of the dependence of the carbon intensity of the economies of countries on macroeconomic and ecological and climatic factors. The authors tested the hypothesis of the carbon price negative impact on the carbon intensity of the economies of countries. Evaluation of various model specifications allowed us to confirm this hypothesis, which indicates the importance of the climate policy development within each country and the feasibility of introducing new tools to regulate carbon dioxide emissions. It was also determined that GDP, as a general indicator of the development of the entire economy, has the greatest impact on reducing carbon intensity. At the same time, in order to reduce the ratio of carbon dioxide emissions to gross domestic product, it is necessary to pursue a policy of replacing fossil fuels with low-carbon energy sources, but only taking into account the country raw material capabilities and the industry specifics of the economy.

Keywords: carbon intensity of the economy, factors, carbon dioxide emissions, panel data, countries of the world

Acknowledgements: The research was financially supported by the RSF grant no. 22-28-02056.

For citation: Provornaya I.V., Filimonova I.V., Krutilina A.D. Assessment of the impact of different factors on changes in carbon intensity of the world economies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 107–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4246

Введение

Одной из первых крупных работ по анализу влияния политики государства на выбросы парниковых газов в атмосферу стала статья [1], где были рассмотрены два основных вопроса: должны ли выбросы в экономике подвергаться квотам, тем самым ограничивая количество загрязняющих производств, и должно ли государство вводить экологический налог, фискально ограничивая негативное воздействие человека на природу.

Предположение о том, что влияние государственного регулирования на цену на углерод слишком неопределенно, подтвердилось на практике в

2008 г., когда цены в европейской системе торговли квотами на выбросы (EU Emissions Trading System, EU ETS) обрушились после мирового кризиса на финансовом рынке. Вейцман предложил теорию, согласно которой при такой неопределенности необходимо сравнивать кривые предельных выгод и издержек, тем самым рассматривая не размер наступающей проблемы, а скорость ее изменения.

О неопределенности говорит и Уильям Пайзер в [2], где приводится сравнение влияния двух «прямых» инструментов воздействия на цену на углерод. В статье отмечена неопределенность в из-

держках применения данных инструментов при анализе их эффективности, при этом отмечается, что в условиях текущего уровня загрязнения воздуха и повышения среднегодовой температуры, как ценовое, так и количественное ограничение выбросов дают большой прирост благосостояния человечества по сравнению с отсутствием какой-либо климатической политики.

В работе [3] авторы отмечают, что многие преимущества углеродного налога, или ETS (Emissions Trading System), проистекают из экзогенности цен на разрешенные выбросы. Во-первых, углеродные налоги и ETS предотвращают волатильность цены аукционов на выбросы парниковых газов. Во-вторых, они предполагают меньшие ожидаемые ошибки при планировании такой политики в условиях неопределенности предельных издержек и выгод. А также они позволяют избежать потенциальной передачи богатств странам-экспортерам нефти.

«Продолжающиеся дебаты насчет эффективности той или иной политики еще будут идти, но у всех есть преимущество в виде гибких и постоянных стимулов для сокращения выбросов, которые отсутствуют в других формах регулирования» [4].

Из российских исследований по эффективности политик по борьбе с выбросами парниковых газов стоит упомянуть работу И.А. Башмакова, в которой был проанализирован опыт стран, использующих углеродный налог как экономический инструмент по сокращению выбросов парниковых газов [5]. Автор отмечает, что при оценке эффективности механизма с ценой на углерод необходимо развивать системы отчетности, мониторинга и верификации проектов по сокращению выбросов. Такая система присутствует, например, в США, где все крупные компании обязаны ежегодно отчитываться о выбросах парниковых газов. Чтобы оценить эффективность налога на углерод необходимо обеспечить формирование статистической базы.

Помимо цены на углерод на динамику выбросов углекислого газа влияют и другие факторы: макроэкономические, отраслевые, экологические. В этой связи исследований, оценивающих влияние эффекта от внедрения цены на углерод на энерго- или углеродоёмкость, не так много. В представленной работе будет проведена оценка влияния различных эколого-климатических и макроэкономических факторов на изменение углеродоемкости экономик стран мира.

Материалы и методы

В качестве методики исследования авторами предложен инструмент анализа панельных данных. Панельные данные можно оценивать с помощью трех разных моделей: линейная модель, модель с фикси-

рованными индивидуальными эффектами, модель со случайными индивидуальными эффектами.

Базовая модель (модель сквозной регрессии) зависимости углеродоемкости страны от регрессоров может быть описана следующим образом:

$$CI_{it} = \alpha + \beta_1 CP_{it} + \beta_2 REC_{it} + \beta_3 GDP_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 FA_{it} + \varepsilon_{it},$$

где α и β_n – коэффициенты модели; i – индекс страны; t – показатель года; ε_{it} – ошибка.

Модель с фиксированными индивидуальными эффектами выглядит следующим образом:

$$CI_{it} = i\mu_i + \beta_1 CP_{it} + \beta_2 REC_{it} + \beta_3 GDP_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 FA_{it} + \vartheta_{it},$$

где i – индекс объекта; t – индекс момента времени; β – вектор коэффициентов регрессии; μ_i – региональные эффекты (фиксированные неизвестные параметры); ϑ_{it} – ошибка с нормальным распределением с параметрами $(0, \sigma_\vartheta^2)$.

Модель со случайными эффектами имеет форму:

$$CI_{it} = \alpha + \delta_i + \beta_1 CP_{it} + \beta_2 REC_{it} + \beta_3 GDP_{it} + \beta_4 PC_{it} + \beta_5 FA_{it} + \lambda_{it},$$

где i – индекс объекта; t – индекс момента времени; β – вектор коэффициентов регрессии; δ_i – региональные эффекты, имеющие нормальное распределение с параметрами $(0, \sigma_\delta^2)$; α – константа; λ_{it} – ошибка с нормальным распределением с параметрами $(0, \sigma_\lambda^2)$.

Для выбора между моделью сквозной регрессии и моделью с фиксированными эффектами (Fixed Effect, FE) необходим стандартный F-тест, так как МНК модель – это частный случай FE модели, где эффекты равны 0. То есть проверяется гипотеза о том, что $f_1=f_2=f_3=\dots=f_n=0$.

Для сравнения модели с фиксированными эффектами и модели со случайными эффектами (Random Effect, RE) применяется тест Броша–Пэгана, где гипотеза состоит в том, что дисперсия случайных эффектов равна нулю ($\sigma_\delta^2 = 0$).

Статистика Хаусмана, в которой проверяется отсутствие корреляции между индивидуальными эффектами и регрессорами, используется для выбора между моделями RE и FE. Проверяется нулевая гипотеза о том, что мы должны выбрать модель со случайными эффектами, и альтернативная гипотеза о том, что стоит использовать модель с фиксированными эффектами.

Сформирована сбалансированная панель данных на основе статистических показателей из источников: WorldBank, OECD и официальных сайтов федеральных служб государственной статистики стран. В качестве объекта исследования рас-

смотрены следующие страны: Великобритания, Дания, Ирландия, Исландия, Испания, Канада, Китай, Колумбия, Корея, Латвия, Мексика, Новая Зеландия, Норвегия, Польша, Португалия, Словения, США, Финляндия, Франция, Швейцария, Швеция, Эстония, Япония.

Для удобства всем переменным были присвоены следующие условные обозначения:

- углеродоемкость – *CI (Carbon Intensity)*;
- цена на углерод – *CP (Carbon Price)*;
- инфляция – *Inf (Inflation)*;
- доля ВИЭ в потреблении – *REC (Renewable Energy Consumption)*;
- ВВП по ППС – *GDP (Gross Domestic Product)*;
- численность населения – *Pop (Population)*;
- потребление бензина на транспорте – *PC (Petrol Consumption)*;
- доля нефтегазовых доходов в бюджете страны – *OS (Oil Share)*;
- площадь лесов – *FA (Forest Area)*;
- количество крупного рогатого скота – *BA (Beef Amount)*;
- энергоёмкость – *EI (Energy Intensity)*;
- производство цемента – *Cem (Cement Production)*.

Результаты исследования

Для анализа в данной работе были отобраны 23 страны, которые входят в состав ОЭСР и имели данные по налоговым поступлениям по конкрет-

ным видам налогов. Период наблюдения – с 1995 г. (как ближайший год с наибольшим количеством стран с доступными данными) по 2019 г. (2020 г. исключается из анализа ввиду пандемии и связанного с ней падения выбросов и сокращения торговых квотами на выбросы). Полученная модель включает 575 наблюдений по 12 переменным.

Зависимой переменной была выбрана углеродоемкость экономики страны. Углеродоемкость – это объем выбросов диоксида углерода (CO₂) на единицу валового внутреннего продукта, рассчитанного по паритету покупательской способности. Эта переменная была взята как регрессирующая, так как наиболее точно определяет взаимосвязь развития экономики и выбросов в атмосферу. Углеродоемкость экономики важна для государственного планирования, так как ее высокие значения свидетельствуют об уязвимости страны перед климатическими вызовами, и оказывает сильное влияние на конкурентоспособность продукции и экономическую безопасность (МГЭИК, 2018). На примере стран G-20 наибольший за 2019 г. уровень углеродоемкости ВВП наблюдается у ЮАР, России и Китая, но при этом у стран разный уровень экономического развития (рис. 1).

При отборе факторов был проведен детальный анализ литературы, в которой авторы рассматривали влияние выбранных показателей на углеродоемкость экономики страны или выбросы парниковых газов (табл. 1).

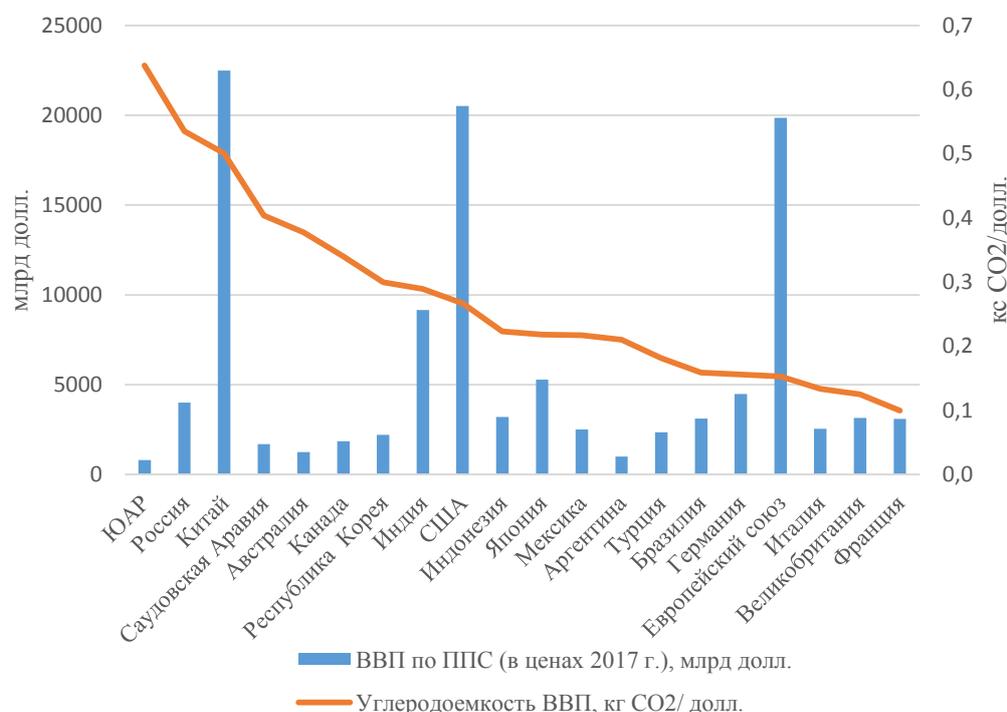


Рисунок. Зависимость углеродоемкости ВВП и ВВП по ППС (паритет покупательной способности) (в ценах 2017 г.)
Figure. Relationship between carbon intensity of GDP and GDP at PPP (purchasing power parity) (in 2017 prices)

Таблица 1. Отбор факторов для построения модели панельных данных

Table 1. Selection of factors for building a panel data model

Фактор Factor	Источник Source
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	[6–9]
Среднегодовая инфляция/Average annual inflation	[10, 11]
Энергоемкость/Energy intensity	[12, 13]
Численность населения/Population	[14, 15]
Цена на углерод/Carbon price	[16, 17]
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	[18, 19]
Доля нефтегазовых доходов в бюджете страны Share of oil and gas revenues in the country budget	[20]
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	[16, 21]
Площадь лесов/Forest area	[22, 23]
Количество крупного рогатого скота/Beef amount	[24, 25]
Производство цемента/Cement production	[26]

Источник: составлено авторами на основе [6–26].
Source: compiled by the authors based on [6–26].

Все предложенные факторы были разделены на две группы: макроэкономические и эколого-климатические (табл. 2). Макроэкономические оказывают косвенное влияние на деятельность отраслей с высокими выбросами парниковых газов в атмосферу и отражают общее социально-экономическое положение страны в определенный период. Эколого-климатические имеют тесную связь с выбросами углекислого газа от той или иной сферы деятельности.

Отдельного внимания требует такой фактор, как цена на углерод, который перешел из макроэкономической категории в эколого-климатическую, позволяющий определить склонность страны к снижению выбросов и ограничить негативное антропогенное воздействие на климат.

Цена на углерод – это стоимость единицы эмиссии парниковых газов, которая побуждает загрязнителей сократить количество выбросов парниковых газов в атмосферу. Иначе можно охарактеризовать как отрицательный внешний эффект – вредный продукт, который никак не оценивается никаким рынком [27]. Цена на углерод может быть оценена через прямое углеродное регулирование (система торговли выбросами (ETS) и углеродный налог) и косвенное регулирование (энергетические налоги) [16].

Отбор факторов. До построения модели панельных данных необходимо провести отбор факторов, чтобы исключить незначимые и избежать возможной мультиколлинеарности, которая будет влиять на оценку регрессии.

Первичным отбором факторов в работе был анализ корреляционной матрицы между объясняемой переменной и регрессорами. Все переменные,

имеющие корреляцию выше 0,6 [28], в дальнейший анализ не включаются. В результате были исключены следующие факторы: доля нефтегазовых доходов в бюджете страны, численность населения, инфляция, производство цемента.

Таблица 2. Разделение факторов по группам на макроэкономические и эколого-климатические

Table 2. Separation of factors by groups into macroeconomic and ecological and climatic

Группа факторов Group of factors	Наименование фактора Factor name	Единицы измерения Units
Макроэкономические Macroeconomic	Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	Доллары США US dollars
	Среднегодовая инфляция Average annual inflation	%
	Энергоемкость Energy intensity	Кг н.э./ доллар США Kg OE/USD
	Численность населения Population	Тысяч человек Thousands of people
Эколого-климатические Ecological and climatic	Цена на углерод Carbon price	Доллар США/т CO ₂ USD /ton CO ₂
	Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	%
	Доля нефтегазовых доходов в бюджете страны Share of oil and gas revenues in the country budget	
	Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	Тысячи тонн Thousand tons
	Площадь лесов Forest area	км ² km ²
	Количество крупного рогатого скота Beef amount	шт./amount
	Производство цемента Cement production	Тысячи тонн Thousand tons

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

Следующим шагом при отборе факторов была процедура Stepwise (метод последовательного отбора). Расчеты для данной процедуры и все дальнейшие статистические вычисления проводились в среде R-Studio.

В итоге осталось пять регрессоров: цена на углерод, доля ВИЭ в первичном потреблении энергии, ВВП, потребление бензина и площадь лесов. По данному набору факторов видно, что влияние на углеродоемкость имеют не только эколого-климатические, но и макроэкономические факторы, что может свидетельствовать о целесообразности комплексного подхода к управлению выбросами в

атмосферу. Реальные социально-экономические процессы не всегда могут быть описаны линейной моделью. В нашем случае для получения более обоснованных оценок ряд был сглажен, то есть был осуществлен переход к более сопоставимым значениям с использованием вместо исходных переменных логарифмов их показателей. Функция логарифма может быть использована, так как все значения положительны.

Для анализа влияния различных факторов на углеродоемкость с помощью эконометрического пакета R были построены три модели панельных данных для всех рассматриваемых стран. Первой была построена модель сквозной регрессии, результаты которой представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчетов модели сквозной регрессии

Table 3. Calculation results of the end-to-end regression model

Показатель Indicator	Значение Value	Стандартное отклонение Standard deviation
Константа/Constant	5,391***	0,326
Цена на углерод/Carbon price	-0,172***	0,003
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	-0,307***	0,023
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	-0,428***	0,026
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	0,187***	0,031
Площадь лесов/Forest area	0,187***	0,015
R ²		0,533
Adj. R ²		0,528

*** $p < 0,01$

Источник: составлено авторами.
 Source: compiled by the authors.

Расчеты показали, что все переменные, входящие в данную модель, значимы (p -value меньше 0,01). Значение R^2 и скорректированного R^2 невысокое, что свидетельствует о недостоверности модели. Перейдем к анализу моделей с индивидуальными эффектами.

Модель с фиксированными индивидуальными эффектами была оценена, результаты представлены в табл. 4.

В модели с фиксированными индивидуальными эффектами также все факторы оказались значимы, а высокий R^2 может показывать, что данная модель достоверна и в нее включены все значимые факторы.

Результаты оценивания модели со случайными индивидуальными эффектами представлены в табл. 5.

Таблица 4. Результаты расчетов FE модели

Table 4. FE model calculation results

Показатель Indicator	Значение Value	Стандартное отклонение Standard deviation
Цена на углерод/Carbon price	-0,156***	0,001
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	-0,169***	0,013
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	-0,826***	0,019
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	0,379***	0,068
Площадь лесов/Forest area	0,266***	0,013
R ²		0,949
Adj. R ²		0,948

*** $p < 0,01$

Источник: составлено авторами.
 Source: compiled by the authors.

Таблица 5. Результаты расчетов RE модели

Table 5. RE model calculation results

Показатель Indicator	Значение Value	Стандартное отклонение Standard deviation
Константа/Constant	2,563***	0,403
Цена на углерод/Carbon price	-0,153***	0,010
Доля ВИЭ в потреблении Share of renewable energy in consumption	-0,170***	0,014
Валовый внутренний продукт (по ППС) Gross Domestic Product (PPP)	-0,814***	0,012
Потребление бензина на транспорте Gasoline consumption in transport	0,393***	0,019
Площадь лесов/Forest area	0,276***	0,039
R ²		0,949
Adj. R ²		0,945

*** $p < 0,01$

Источник: составлено авторами.
 Source: compiled by the authors.

По итогам оценивания модели со случайными индивидуальными эффектами были получены коэффициенты, схожие с коэффициентами FE модели. Значение коэффициента детерминации также не отличается.

Проверка качества и тестирование моделей углеродоемкости экономик стран мира. Преимущества анализа панельных данных заключаются в том, что при их использовании снижается вероятность возникновения высоких стандартных ошибок, а использование моделей в логарифмах помогает бороться с гетероскедастичностью.

Для выбора наилучшей модели среди трех исходных были проведены три теста, результаты которых представлены в табл. 6.

Таблица 6. Тестирование моделей углеродоемкости
Table 6. Testing carbon intensity models

F-тест F-test	Тест Хаусмана Houseman test	Тест Броша- Пэгана Brosh-Pagan test
H0: $f_1 = f_2 = f_3 = \dots = f_n = 0$.	H0: $corr(f_i; x_i) = 0$	H0: $\sigma_i^2 = 0$
F=4,26	Chisq=27,85	BP=51,062
p-value=1,051e-05	p-value<2,2e-16	p-value<2,2e-16

Источник: составлено авторами.
 Source: compiled by the authors.

F-тест показал, что гипотеза отвергается, то есть присутствуют индивидуальные эффекты и между моделью сквозной регрессии и моделью с фиксированными эффектами лучше выбрать последнюю. Тест Броша–Пэгана отвергает гипотезу о том, что дисперсия случайных эффектов равна нулю. Это свидетельствует о том, что индивидуальные особенности стран существуют и модель со случайными эффектами лучше подходит для оценки параметров, чем модель сквозной регрессии. В то же время тест Хаусмана отвергает нулевую гипотезу, которая состоит в том, что оценки модели со случайными эффектами состоятельны. Следовательно, оценки модели с фиксированными эффектами являются наилучшими.

Анализ и интерпретация результатов построения модели. Исходя из результатов тестов, наилучшей моделью оказалась модель с фиксированными индивидуальными эффектами, следовательно, итоговые коэффициенты зависимости выглядят следующим образом:

$$CI_{it} = -0,156CP_{it} - 0,169REC_{it} - 0,826GDP_{it} + 0,379PC_{it} + 0,266FA_{it}.$$

При разработке качественной модели были отброшены незначимые факторы, но при этом в итоговом уравнении регрессии остались как макроэкономические, так и эколого-климатические регрессоры, также важным пунктом оказалась значимость фиксированных индивидуальных эффектов каждой страны, что может объясняться разницей в институциональном развитии и климатическом налогообложении.

Цена на углерод, как один из основных показателей развитости климатической политики в стране, имеет очевидное отрицательное влияние на углеродоемкость страны. Даже при малом коэффициенте данный показатель имеет влияние на объем выбросов CO₂ на единицу ВВП и отражает уровень развитости углеродного налога и ETS в конкретной стране.

Наибольшее влияние среди всех факторов имеет ВВП страны, что свидетельствует о важности развития всей экономики для расширения финансовой системы и привлечения дополнительных инвести-

ций в реализацию новых программ по сокращению выбросов углерода. Так как ВВП стоит в знаменателе при расчете углеродоемкости, то данная взаимосвязь может быть очевидной, но при этом нельзя однозначно сказать, что при росте ВВП сокращается углеродоемкость.

Особое внимание стоит уделить коэффициенту регрессии перед фактором «площадь лесов». С логической точки зрения данный коэффициент должен быть отрицательным, так как чем больше лесов в стране, тем больше углекислого газа они депонируют, а следовательно, меньше углеродоемкость. После эконометрических расчетов оказалось, что ситуация противоположная. Это связано с недостаточным контролем над лесными массивами, из-за чего каждый год происходят масштабные пожары как в США, так и на территории Европы и высвобождается громадные объемы углекислого газа. Также нельзя не упомянуть незаконную вырубку деревьев и загрязнение лесополосы радиоактивным мусором, за счет чего деревья снижают свой секвестрационный потенциал.

При более детальном анализе выявлено, что такой выброс дают данные по Канаде, у которой наибольший положительный коэффициент при FA (156,7). Такое отрицательное влияние лесов на углеродоемкость Канады вызвано ежегодными крупными пожарами, площадь которых превышает 3 млн гектар в год, при этом в 44 % случаев причина возникновения огня – молния, а человеческий фактор составляет всего 2 %, что говорит об эффективной борьбе с лесными пожарами в местах пребывания людей. Второй по значимости причиной снижения секвестрационного потенциала лесов Канады является негативное влияние насекомых-вредителей.

Исходя из анализа полученного уравнения регрессии можно сказать, что лишь комплексный подход к изменению экономик мира сможет глобально изменить динамику негативного воздействия человека на природу. Стоит развивать не только отраслевые компоненты, такие как повышение доли возобновляемых источников энергии в общем производстве энергии, но и глобальную экономику страны, финансовую систему, производство «зеленых» автомобилей и иных устройств, которые не будут загрязнять природу. При должном внимании каждой отдельной отрасли и осознанном потреблении энергоресурсов удастся сохранить не только большое количество лесов, но и улучшить состояние воздуха на территории многих стран.

Обсуждение и заключение

Длительный процесс антропогенного воздействия на экологию и климат Земли привели к суще-

ственному ухудшению состояния воздуха, воды и почвы в местах проживания большого количества людей. Общественное давление и ряд научных исследований послужили побудительными мотивами для государств активно проводить климатическую политику и разрабатывать инструменты климатического регулирования.

Экономические инструменты уже на протяжении долгого времени являются главной составляющей климатической и экологической политики большинства стран. Основываясь на опыте других стран, многие государства продолжают предпринимать меры по введению инициатив по ограничению выбросов парниковых газов от сжигания ископаемых топлив, даже с учётом текущей геополитической ситуации. Со временем инициативы приведут к сокращению негативного влияния «грязных» производств на экологию и климат, а также позволят возобновляемым источникам энергии заместить ископаемое топливо в отраслях и видах экономической деятельности, где это технологически и экономически оправдано.

В настоящей работе была проверена гипотеза об отрицательном влиянии цены на углерод на углеродоемкость экономики стран с использованием метода панельных данных. Оценка различных спецификаций моделей показала, что данная гипотеза подтвердилась, что говорит о важности развития климатической политики внутри каждой страны и благоприятной перспективе введения новых инструментов по регулированию выбросов. Также было определено, что ВВП, как общий показатель развития всей экономики, имеет наибольшее влияние на сокращение углеродоемкости. При этом для сокращения отношения выбросов углекислого газа к валовому внутреннему продукту можно наращивать долю энергии, полученной от возобновляемых источников энергии, в потреблении, сокращать или замещать низкоуглеродными источниками энергии потребление бензина на транспорте, а также сохранять площадь лесов и своевременно предотвращать лесные пожары. Учитывая, что возобновляемые источники энергии в России развиваются по принципу энергообеспечения регионов, преимущественно удалённых от энергетической и транспортной инфраструктуры, их дальнейшее развитие представляется авторам целесообразным и экономически важным.

Россия не была включена в расчётную базу, так как в настоящее время климатическое регулирование и правовое ограничение выбросов углекислых газов ещё недостаточно развито. Так как Россия находится в пятерке стран по выбросам парниковых газов, важно проводить мягкую климатическую политику, при этом учитывая особенности структуры потребления энергетических ресурсов с

преобладающей долей ископаемых источников энергии. Это влияет не только на углеродоемкость государства, но и на конкурентоспособность отечественных товаров на мировых рынках.

Одним из шагов по развитию климатической политики в России можно считать «сахалинский эксперимент», целью которого стало достижение углеродной нейтральности на территории острова Сахалин к концу 2025 г. Объем выбросов парниковых газов в регионе в 2021 г. составил 12,3 млн т CO₂, поглощения – 11,1 млн т. Эта разница в 10 % и должна сократиться за время эксперимента. Для этого региону придется перевести 145 котельных с угля на газ (что сократит в 1,5 раза количество выбрасываемого углекислого газа в атмосферу), повысить долю экологичного транспорта до 50 %, а также увеличить долю электроэнергии от ВИЭ в потреблении.

Еще одним показателем, отражающим процесс развития мероприятий в области климатической политики в России, является увеличение доли электрической энергии, произведённой из возобновляемых источников энергии, в общем объеме производства электрической энергии. Правительство РФ планирует нарастить долю ВИЭ в энергобалансе страны с 1 до 10 % к 2040 г., что можно сделать в большей степени вследствие сокращения доли угольных энергогенераций с 15 до 7 %, а объем капитальных вложений в развитие «зеленых» энергоустановок может составить 1 трлн р. до 2035 г.

Ввиду высокого значения для климата и экологии количества высаженных деревьев многие отечественные компании и учреждения устраивают совместные акции по высадке саженцев. После массивных лесных пожаров летом 2010 г. был введен всероссийский день посадки леса с целью привлечения внимания населения к проблеме исчезновения леса и к посадке новых растений. За несколько лет количество ежегодно высаживаемых деревьев возросло с 150 тысяч до 4,5 млн саженцев. Похожая акция была у авиакомпании «Сибирь» в 2020 г., когда чуть более чем за месяц авиапассажиры и другие неравнодушные граждане собрали средства на посадку миллиона деревьев. Только за последние 20 лет, благодаря таким акциям и не только, количество лесной площади увеличилось на 100 тыс. кв. км.

Рассмотрением различных экологических проблем занимаются специализированные министерства и комиссии, такие как Госкомэкология России, Росгидромет, Минсельхоз РФ и др. Помимо общероссийских ведомств, в каждой отрасли функционируют организации, которые распространяют «зеленый» образ жизни, устраивают публичные экоакции и способствуют улучшению состояния окружающей среды. С 2014 г. действует государ-

ственная программа «Охрана окружающей среды», целью которой является улучшение состояние воздуха в городах, снижение выбросов вредных веществ в атмосферу и биосферу страны, создание новых особо охраняемых природных территорий.

Одно из первых обществ по защите природы появилось в России в 1924 г. – Всероссийское общество охраны природы. Именно эта организация занималась озеленением территорий после Второй мировой войны. В настоящее время принимает непосредственное участие в защите водоемов от загрязняющей деятельности фабрик и заводов. Помимо государственных организаций, на территории России присутствуют и международные экологические организации.

В связи с текущей геополитической обстановкой многие экологические и климатические проекты могут быть заморожены на неопределенный срок, что даст дополнительное время на подготовку необходимых нормативно-правовых документов, осуществление их внедрения на территории страны и проведение ряда пилотных климатических проектов.

Сформировать кардинально новую систему эколого-климатического регулирования и разработать соответствующую политику, вводя новые инструменты по ограничению выбросов парниковых газов

и загрязняющих веществ в атмосферу (которое постепенно приведет к изменению межтопливной конкуренции в сторону снижения доли углеводородов), не представляется возможным без детального анализа действующего базиса фискального регулирования топливно-энергетического комплекса.

Отдельно стоит рассмотреть возможность поэтапного изменения существующих ценовых сигналов путем повышения их эколого-климатической эффективности взамен введения отдельных инструментов, которые будут дополнительным грузом для уже устоявшейся эффективной налоговой конструкции в стране. Один из вариантов модификации заключается в изменении налоговой базы по углеродному налогу с количества использованной энергии на объем углерода, содержащегося в топливе, или на объем углерода, который выделяется при сжигании ископаемого топлива.

Такой метод позволит избежать высоких издержек администрирования системы торговли выбросами и издержек по внедрению нового углеродного налога, а также не создаст коррупционных стимулов для продажи углерода по заниженным ценам. Тем не менее необходимо дальнейшее развитие этого направления исследования с учетом всех экономических рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weitzman M.L. Prices vs. quantities // *The review of economic studies*. – 1974. – Vol. 41. – № 4. – P. 477–491.
2. Pizer W.A. Combining price and quantity controls to mitigate global climate change // *Journal of public economics*. – 2002. – Vol. 85. – № 3. – P. 409–434.
3. Goulder L.H., Parry I.W. Instrument choice in environmental policy // *Review of environmental economics and policy*. – 2008. – Vol. 2 (2). – P. 152–174.
4. Goulder L.H., Schein A.R. Carbon taxes versus cap and trade: a critical review // *Climate Change Economics*. – 2013. – Vol. 4. – № 03. – P. 1350010.
5. Башмаков И.А. Налог на углерод в системе налогов на энергию и экологических налогов // *Экологический вестник России*. – 2018. – № 3. – С. 1–13.
6. Бразовская В.В., Гутман С.С. Возобновляемая энергетика как фактор достижения устойчивого развития стран мира // *Цифровая экономика, умные инновации и технологии: Сборник трудов Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции с зарубежным участием*. – СПб, 18–20 апреля 2021. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 26–28.
7. Изменение климата и неравенство: потенциал для совместного решения проблем / Л.М. Григорьев, И.А. Макаров, А.К. Соколова, В.А. Павлюшина, И.А. Степанов // *Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика*. – 2020. – Т. 15. – № 1. – С. 7–30.
8. Lin B., Benjamin N.I. Influencing factors on carbon emissions in China transport industry. A new evidence from quantile regression analysis // *Journal of cleaner production*. – 2017. – Vol. 150. – P. 175–187.
9. Provincial carbon intensity abatement potential estimation in China: a PSO-GA-optimized multi-factor environmental learning curve method / S. Yu, J. Zhang, S. Zheng, H. Sun // *Energy Policy*. – 2015. – Vol. 77. – P. 46–55.
10. Shao Y. Does FDI affect carbon intensity? New evidence from dynamic panel analysis // *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. – 2017. – Vol. 10. – № 1. – P. 27–42.
11. Low-carbon transition of iron and steel industry in China: carbon intensity, economic growth and policy intervention / B. Yu, X. Li, Y. Qiao, L. Shi // *Journal of Environmental Sciences*. – 2015. – Vol. 28. – P. 137–147.
12. Arlinghaus J. Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? // *Geosystem Engineering*. – 2014. – Vol. 17. – Iss. 1. – P. 1–10.
13. Макаров И.А., Соколова А.К. Оценка углеродоемкости внешней торговли России // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. – 2014. – Т. 18. – № 3. – С. 477–507.
14. Contributions to sector-level carbon intensity change: an integrated decomposition analysis / Q. Wang, Y. Hang, B. Su, P. Zhou // *Energy Economics*. – 2018. – Vol. 70. – P. 12–25.
15. The reformed EU ETS-intertemporal emission trading with restricted banking / J. Bocklet, M. Hintermayer, L. Schmidt, T. Wildgrube // *Energy Economics*. – 2019. – Vol. 84. – P. 104486.

16. Степанов И.А. Налоги в энергетике и их роль в сокращении выбросов парниковых газов // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 290–313.
17. R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870–2014 / S. Churchill, J. Inekwe, R. Smyth, X. Zhang // Energy Economics. – 2019. – Vol. 80. – P. 30–37.
18. Вольников Р.М., Мурашова Н.А. Инструменты регулирования выбросов парниковых газов в ЕС // Актуальные вопросы экономики, менеджмента и инноваций: Материалы Международной научно-практической конференции ученых, специалистов, преподавателей вузов, аспирантов, студентов. – Нижний Новгород, 17 ноября 2021. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 360–364.
19. Кузовкин А.И. Углеродоемкость природного газа и электроэнергии, развитие ВИЭ в России и за рубежом // Микроэкономика. – 2021. – № 3. – С. 57–64.
20. Маликова О.И., Кирюшин П.А., Николаева А.В. Технологические детерминанты трансформации возобновляемой энергетики и государственной поддержки развития энергетической отрасли // Управленческие науки. – 2021. – № 1. – С. 35–50.
21. Восстановительный рост экономики России и выбросы парниковых газов / А.А. Голуб, М.Г. Колосницына, Д.В. Дякин, Д.А. Шапошников // Экономическая политика. – 2007. – № 2. – С. 179–195.
22. Коробова О.С., Михина Т.В. Влияние экономических и природных факторов на углеродоемкость страны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – Т. 16. – № 1. – С. 243–252.
23. Пакина А.А., Тульская Н.И. Оценка углеродоемкости экономики Татарстана в целях управления природопользованием // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2021. – № 2. – С. 110–115.
24. Озерова М.Г., Филимонова Н.Г. Декарбонизация сельского хозяйства России: основные аспекты // Научно-практические аспекты развития АПК: Материалы национальной научной конференции. – Красноярск, 12 ноября 2021. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2021. – С. 135–137.
25. Lean I.J., Moate P.J. Cattle, climate and complexity: food security, quality and sustainability of the Australian cattle industries // Australian veterinary journal. – 2021. – Vol. 99. – Iss. 7. P. 293–308.
26. Применение концепции наилучших доступных технологий в различных системах зеленого финансирования: международный опыт и перспективы использования в государствах-членах Евразийского экономического союза / Д.О. Скобелев, А.А. Волосатова, Т.В. Гусева, С.В. Панова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 36–55.
27. Hagmann D., Ho E., Loewenstein G. Nudging out support for a carbon tax // Nature Climate Change. – 2019. – Vol. 9. – № 6. – P. 484–489.
28. Эконометрия / В.И. Сулов, Н.М. Ибрагимов, Л.П. Талышева, А.А. Цыплаков. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета, 2005. – 742 с.

Информация об авторах

Ирина Викторовна Проворная, кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории «Центр экономики недропользования нефти и газа» Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. provornayaiv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6581-2921>

Ирина Викторовна Филимонова, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Центр экономики недропользования нефти и газа» Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. filimonovaiv@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4447-6425>

Арина Денисовна Крутилина, студент, Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова 1. a.krutilina@g.nsu.ru

Поступила в редакцию: 11.07.2023

Поступила после рецензирования: 07.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Weitzman M.L. Prices vs. quantities. *The review of economic studies*, 1974, vol. 41 (4), pp. 477–491.
2. Pizer W.A. Combining price and quantity controls to mitigate global climate change. *Journal of public economics*, 2002, vol. 85 (3), pp. 409–434.
3. Goulder L.H., Schein A. Carbon taxes versus cap and trade: a critical review. *Climate Change Economics*, 2013, vol. 4, no. 03, pp. C. 1350010 (1–28).
4. Goulder L.H., Parry I.W. Instrument choice in environmental policy. *Review of environmental economics and policy*, 2008, vol. 2 (2), pp. 152–174.
5. Bashmakov I.A. Carbon tax in the system of taxes on energy and environmental taxes. *Ecological Bulletin of Russia*, 2018, no. 3. pp. 1–13. (In Russ.)
6. Brazovskaya V.V., Gutman S.S. Renewable energy as a factor in achieving sustainable development of the countries of the world. *Digital economy, smart innovations and technologies technologies. Proceedings of the National (All-Russian) scientific and practical conference with foreign participation*. St. Petersburg, April 18–20, 2021. St. Petersburg, Polytech Press, 2021. pp. 26–28. (In Russ.)

7. Grigoriev L.M., Makarov I.A., Sokolova A.K., Pavlyushina V.A., Stepanov I.A. Climate change and inequality: potential for joint problem solving. *Bulletin of international organizations: education, science, new economy*, 2020, vol. 15, no. 1, pp. 7–30. (In Russ.)
8. Lin B., Benjamin N.I. Influencing factors on carbon emissions in China transport industry. A new evidence from quantile regression analysis. *Journal of cleaner production*, 2017, vol. 150, pp. 175–187.
9. Yu S., Zhang J., Zheng S., Sun H. Provincial carbon intensity abatement potential estimation in China: a PSO–GA-optimized multi-factor environmental learning curve method. *Energy Policy*, 2015, vol. 77, pp. 46–55.
10. Shao Y. Does FDI affect carbon intensity? New evidence from dynamic panel analysis // *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 27–42.
11. Yu B., Li X., Qiao Y., Shi L. Low-carbon transition of iron and steel industry in China: carbon intensity, economic growth and policy intervention. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, vol. 28, pp. 137–147.
12. Arlinghaus J. Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? *Geosystem Engineering*, 2014, vol. 17, Iss. 1, pp. 1–10.
13. Makarov I.A., Sokolova A.K. Assessing the carbon intensity of Russia's foreign trade *Economic Journal of the Higher School of Economics*, 2014, vol. 18, no. 3, pp. 477–507. (In Russ.)
14. Wang Q., Hang Y., Su B., Zhou P. Contributions to sector-level carbon intensity change: an integrated decomposition analysis. *Energy Economics*, 2018, vol. 70, pp. 12–25.
15. Bocklet J., Hintermayer M., Schmidt L., Wildgrube T. The reformed EU ETS-intertemporal emission trading with restricted banking. *Energy Economics*, 2019, vol. 84, pp. 104486.
16. Stepanov I.A. Taxes in the energy sector and their role in reducing greenhouse gas emissions. *Economic Journal of the Higher School of Economics*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 290–313. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17323/1813-8691-2019-23-2-290-313>.
17. Churchill S., Inekwe J., Smyth R., Zhang X. R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870–2014. *Energy Economics*, 2019, vol. 80, pp. 30–37.
18. Volnikov R.M., Murashova N.A. Instruments for regulating greenhouse gas emissions in the EU. *Topical issues of economics, management and innovation: Materials of the International Scientific and Practical Conference of Scientists, specialists, university professors, graduate students, students*. Nizhny Novgorod, November 17, 2021. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev Publ., 2021. pp. 360–364. (In Russ.)
19. Kuzovkin A.I. Carbon intensity of natural gas and electricity, development of renewable energy sources in Russia and abroad. *Microeconomics*, 2021, no. 3, pp. 57–64. (In Russ.)
20. Malikova O.I., Kiryushin P.A., Nikolaeva A.V. Technological determinants of the transformation of renewable energy and state support for the development of the energy industry. *Management Sciences*, 2021, no. 1, pp. 35–50. (In Russ.)
21. Golub A.A., Kolosnitsyna M.G., Dyakin D.V., Shaposhnikov D.A. Recovery growth of the Russian economy and greenhouse gas emissions. *Economic Policy*, 2007, no. 2, pp. 179–195. (In Russ.)
22. Korobova O.S., Mikhina T.V. Influence of economic and natural factors on the carbon intensity of the country. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2008, vol. 16, no. 1, pp. 243–252. (In Russ.)
23. Pakina A.A., Tulskeya N.I. Estimation of the carbon intensity of the economy of Tatarstan for the purpose of environmental management. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2021, no. 2, pp. 110–115. (In Russ.)
24. Ozerova M.G., Filimonova N.G. Decarbonization of agriculture in Russia: main aspects. *Scientific and practical aspects of the development of the agro-industrial complex. Materials of the national scientific conference*. Krasnoyarsk, November 12, 2021. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University Publ., 2021. pp. 135–137. (In Russ.)
25. Lean I.J., Moate P.J. Cattle, climate and complexity: food security, quality and sustainability of the Australian cattle industries. *Australian veterinary journal*, 2021, vol. 99, Iss. 7, pp. 293–308.
26. Skobelev D.O., Volosatova A.A., Guseva T.V., Panova S.V. Application of the concept of the best available technologies in various green finance systems: international experience and prospects for use in the member states of the Eurasian Economic Union. *Bulletin of Eurasian Science*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 36–55.
27. Haggmann D., Ho E.H., Loewenstein G. Nudging out support for a carbon tax. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 484–489.
28. Suslov V.I., Ibragimov N.M., Talysheva L.P., Tsyplakov A.A. *Econometrics*. Novosibirsk, Novosibirsk University Publ. House, 2005. 742 p.

Information about the authors

Irina V. Provornaya, Cand. Sc., Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. provornayaiv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6581-2921>

Irina V. Filimonova, Dr. Sc., Professor, Leading Researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. filimonovaiv@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4447-6425>

Arina D. Krutilina, Student, Novosibirsk State University, 1, Pirogov avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. a.krutilina@g.nsu.ru

Received: 11.07.2023

Revised: 07.09.2023

Accepted: 19.04.2024

УДК 622.32(004.85)
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4553
Шифр специальности ВАК: 1.6.11; 2.3.1

Прогнозирование дебита горизонтальных скважин с применением модели машинного обучения

С.А. Пискунов✉, Ш. Давуди

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉piskynovsa@hw.tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования связана с необходимостью точно и быстро прогнозировать дебиты горизонтальных скважин. Это позволит оптимизировать составление графиков бурения, программ увеличения нефтеотдачи, стратегии разработки месторождения, а также сделать экономическую модель более точной и предсказуемой. В настоящее время для прогнозирования дебитов скважин используются аналитические расчеты и численные методы моделирования. Данные методы имеют ограничения как по точности, так и по времени. Для решений данной задачи предлагается использовать машинное обучение, которое за счет своей точности, адаптивности и скорости позволяет исключить недостатки ранее перечисленных методов. *Цель:* создание модели машинного обучения для количественной оценки дебита газовых скважин на основе геологических свойств на различных временных шагах. *Объект:* фонд горизонтальных скважин газоконденсатного месторождения Западной Сибири. *Методы:* математическое моделирование, машинное обучение и статистические методы. *Результаты.* Проведено 300 итераций гидродинамического моделирования в симуляторе. Собран исходный набор данных со следующими параметрами: временной шаг, пористость, проницаемость, исходная водонасыщенность, толщина пласта, давление в зоне забоя на различных расстояниях от ствола скважины, дебит газа. Созданы модели машинного обучения на основе алгоритмов случайного леса и градиентного бустинга с различными соотношениями тестовой выборки к тренировочной. Модели машинного обучения позволяли точно прогнозировать дебит газа горизонтальной скважины. Градиентный бустинг показал лучшие результаты прогнозирования по сравнению со случайным лесом: квадрат средней квадратичной ошибки равен 8440 ст. м³/сут., средняя абсолютная процентная ошибка равна 3,95 %, коэффициент детерминации (R^2)=0,991.

Ключевые слова: машинное обучение, градиентный бустинг, случайный лес, прогнозирования дебита горизонтальной скважины, закон Дарси, гидродинамическое моделирование пласта

Для цитирования: Пискунов С.А., Давуди Ш. Прогнозирование дебита горизонтальных скважин с применением модели машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 118–130. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4553

UDC 622.32(004.85)
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4553

Horizontal well flow rate prediction applying machine-learning model

S.A. Piskunov✉, Sh. Davoodi

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉piskynovsa@hw.tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to accurately and quickly predict flow rates of horizontal wells. This allows optimizing drilling schedules, enhanced oil recovery programs, and field development strategy, as well as making the economic model more accurate and predictable. Currently, analytical calculations and numerical modeling methods are used to predict well production rates. These methods have limitations in both accuracy and time. To solve this problem, it is proposed to use machine learning, which due to its accuracy, adaptability, and speed, allows excluding the disadvantages of the above-mentioned methods. *Aim.* To create a machine-learning model to quantify gas well flow rates based on geological properties at different

time steps. **Object.** Stock of horizontal wells in a gas condensate field in Western Siberia. **Methods.** Mathematical modelling, machine learning and statistical methods. **Results.** The authors have carried out 300 iterations of hydrodynamic modeling in a simulator. They collected an initial data set with the following parameters: time step, porosity, permeability, initial water saturation, reservoir thickness, bottom hole pressure at different distances from the wellbore, and gas flow rate. Machine learning models based on random forest and gradient boosting algorithms were created with different ratios of testing/training samples. The machine learning models were able to accurately predict the gas flow rate of a horizontal well. Gradient boosting showed better prediction results compared to random forest: root mean square error is equal to 8440 std. m³/day, mean absolute percentage error is equal to 3.95%, and coefficient of determination (R^2)=0.991.

Keywords: machine learning, gradient boosting, random forest, horizontal well flow rate prediction, Darcy's law, reservoir simulation

For citation: Piskunov S.A., Davoodi Sh. Horizontal well flow rate prediction applying machine-learning model. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 118–130. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4553

Введение

Важным условием успешной разработки месторождений является прогнозирование параметров работы скважин. Точный прогноз добычи газа необходим для составления планов бурения, программ повышения нефтегазоотдачи и стратегий разработки пластов. Знание этих параметров значительно повышает шансы на успешную и эффективную добычу. Кроме того, это помогает сделать экономическую модель более точной и предсказуемой.

Наиболее распространенным в мире подходом к определению дебита скважин является закон Дарси. Инженеры нефтегазовой сферы обычно используют уравнение Дюпюи [1]. Оно представляет собой интегральную форму закона Дарси для случая плоскорадиального установившегося притока несжимаемой жидкости в вертикальную скважину. Уравнение Дюпюи связывает продуктивные характеристики скважины и фильтрационные свойства пласта. Согласно этому уравнению, основными факторами, влияющими на приток жидкости, являются: проницаемость, толщина пласта, скин-фактор, радиус скважины, забойное давление и пластовое давление. Также необходимо учитывать конструкцию скважины [2]. Оценивать все перечисленные факторы в процессе разработки месторождения становится сложной задачей, так как происходит постоянное изменение энергетики пласта (давление, аквифер), ухудшение призабойной зоны (скин-фактор), уменьшение фазовой проницаемости в связи с заводнением околоскважинной зоны, свойств пластовых флюидов (Pressure-Volume-Temperature – PVT), неоднородность коллектора в целом.

Существуют различные способы прогнозирования добычи скважин. Но они имеют разную точность и требуют разное количество времени. Аналитический подход является наиболее быстрым, но, с другой стороны, он имеет самый низкий уровень точности и ряд допущений [3]. Эмпирический подход помогает прогнозировать дальнейший дебит скважины, основываясь на стартовых значениях

дебита в скважине и анализе тенденции дальнейшего падения дебита. В частности, этот метод называется кривой падения добычи [4]. Аналитические методы прогнозируют поведение скважины при помощи установления закономерности между физическими свойствами в пласте. В основе расчетов материального баланса лежит закон сохранения массы. Материальный баланс – это учет поступления и извлечения массы из системы [5, 6]. Применение материального баланса может быть затруднительным, особенно в системах с давлением ниже давления насыщения, а также в присутствии других источников энергии (газовая шапка, аквифер) [7].

Метод использования симуляторов является более точным, чем аналитический, но в то же время требует больших временных затрат и большого количества информации о месторождении, что вносит свою неопределенность в итоговое прогнозирование. Суть метода заключается в использовании программных комплексов, которые позволяют, используя закон материального баланса и закона Дарси, итерационным путем рассчитывать показатели работы скважины. Данный подход позволяет заменить сложные аналитические формулы численными расчетами: решение на основе упрощения (аппроксимации) более явными зависимостями [8].

Симуляторы являются наиболее точным способом прогнозирования работы скважин и оценивания профиля добычи (P10, P50, P90). Они позволяют оценить неопределенность и риски дальнейшей разработки. Данные дебиты строятся на основе итерации различных вариантов геологии. Этот подход называется методом Монте Карло [9]. Но в то же время для создания данных профилей необходимо множество расчетов и большое количество времени на их осуществление. Для обеспечения точности симулятора и скорости математических расчетов предлагается использовать машинное обучение (МО) [10].

В последние годы предпринимались попытки применить алгоритмы МО и искусственный интеллект (ИИ) для прогнозирования работы скважин.

Например, в бурении [11, 12], геофизике [13, 14], инжиниринге резервуаров [15, 16]. Этот метод не только прост в реализации, но и позволяет отразить сложную взаимосвязь между входными и выходными наборами данных. В частности, он основан на анализе данных, взаимодействии и корреляции параметров системы, а не на физических процессах. В частности, популярность приобрели ИНС (искусственная нейронная сеть) и метод опорных векторов. Модель, основанная на ИНС [17], показала среднюю абсолютную ошибку в 7,9 % при прогнозировании дебита. В данной статье оценивался средний дебит после запуска горизонтальных скважин определенной длины и был получен довольно точный результат. Однако применялся только один геологический параметр – проницаемость, что не позволяет полноценно оценить возможную добычу в дальнейшем [18]. Также подобный метод применялся для прогнозирования добычи горизонтальных скважин на основе данных геологии, анизотропии, размеров скважин, и ошибка составила 7 % [10]. Но данная модель не позволяет ввести прогноз на определенный временной шаг, а дает лишь представление об ожидаемом дебите скважины. Также нейронные сети применяли на месторождении «Volve» в Норвегии [19]. В работе применяли нейронные сети прямого распространения, рекуррентную нейронную сеть, а также использовался метод роя частиц в качестве оптимизатора. Коэффициент детерминации превысил показать 94 % [19]. В данной работе в основе лежат входные параметры, основанные на забойном давлении и размере штуцера, что не позволяет вовлечь в оценку геологию.

В этой работе были разработаны две модели машинного обучения – градиентный бустинг (ГБ) и случайный лес – для прогнозирования дебита газа горизонтальных скважин. Использование петрофизической информации позволит сделать данную модель более универсальной, физичной. Также будет учитываться временной шаг, что позволит не только сделать прогноз стартового показателя дебита, но и оценить его дальнейшее изменение. Для поиска оптимальных гиперпараметров применялся половинчатый поиск по сетке (Halving Search) с использованием перекрестной проверки. Набор данных включает в себя такие геологические параметры, как: проницаемость пласта, эффективная толщина пласта, пористость, водонасыщенность вдоль ствола скважины, а также данные по падению давления на забое скважины и вблизи ствола. Часть данных используется для разработки модели (тренировочная выборка), а оставшаяся часть – в качестве проверки прогнозной способности модели (тестовая выборка). Лучший алгоритм был выбран путем сравнения поведения на тестовых и тренировочных данных.

В статье даются краткие пояснения по теории машинного обучения, ГБ, случайного леса и половинчатого поиска по сетке. Также рассматривается методология и объясняется, как имеющиеся данные были получены, обработаны и использованы при разработке этих моделей. Описывается процедура разработки модели. Затем приводятся результаты, следует их обсуждение и составляются выводы, которые обобщают полученные результаты. В заключении подводятся основные итоги работы.

Получение и анализ данных

В работе использовались данные, сгенерированные через коммерческий гидродинамический симулятор. Было проведено 300 итераций расчета. На основе геологических неопределенностей (стандартного отклонения и среднего значения) сгенерированы различные варианты петрофизики, а также сняты средние значения входных параметров вдоль стволов скважины. Этот подход позволяет создать достаточное количество данных для обучения модели машинного обучения и дальнейшего прогнозирования дебитов на исследуемом месторождении без применения симуляторов. Система разработки представляет лучевую систему с горизонтальными скважинами, коллектор – одиночный пласт с вертикальной анизотропией проницаемости.

Набор данных включает следующие параметры: временной шаг, пористость, проницаемость, исходную водонасыщенность, толщину пласта, давление в зоне забоя на различных расстояниях от ствола скважины, дебит газа. Данные были случайно разделены на две выборки (тестовая и тренировочная). Соотношения тренировочной выборки к тестовой варьировались и принимали разные значения (80/20, 75/25, 70/30) для дальнейшего анализа и выбора лучшего варианта.

В качестве параметров, характеризующих распределение исходных данных, были выбраны их значения на соответствующих процентилях (25, 50, 75 %), средние значения параметров, их стандартное отклонение и предельное значение в распределении. Параметры представлены в табл. 1.

Распределение давления и дебита газа представлено на рис. 1. Статистика оценена с помощью межквартильного размаха и стандартного отклонения. Распределение дебита показывает большой разбег между максимальным и минимальным значениями. Отношение максимального значения дебита к минимальному составляет 5,65. Процентиль 75 % и максимальное значение различаются в разы. Распределения дебита газа и давления в зоне забоя представляют собой ассиметричные распределения со смещением влево. Коэффициент вариации (std/mean) равняется 0,68, что говорит о низкой дисперсии распределения.

Таблица 1. Статистический анализ входных/выходных данных, используемых в исследовании

Table 1. Statistical analysis of the input/output data given in the study

Параметр Parameter	Среднее значение Mean value	Стандартное отклонение Standard deviation	25 %	50 %	75 %	Макс. Max.
Временной шаг, месяц Time step, month	6,5	3,5	3	6	9	12
Пористость, % Porosity, %	0,14	0,01	0,13	0,14	0,14	0,16
Проницаемость, Дарси Permeability, Darcy	0,08	0,03	0,06	0,05	0,1	0,21
Водонасыщенность Water saturation	0,35	0,31	0,03	0,22	0,69	0,88
Эффективная толщина, м Effective thickness, m	4,83	4,55	0,49	2,92	9,40	15,83
Давление вдоль ствола скважины, бар. Pressure along the wellbore, bar	376,7	19,1	366,7	372,9	382,5	515,5
Давление зоны 4 ячеек, бар 4 cells area pressure, bar	401,2	23,8	387,3	397,2	411,4	517,4
Давление зоны 9 ячеек, бар 9 cells area pressure, bar	416,6	14,7	398,7	411,6	430,2	520,1
Дебит газа, м ³ /сут. Gas production rate, m ³ /day	132721	90423	877	70157	111858	166494

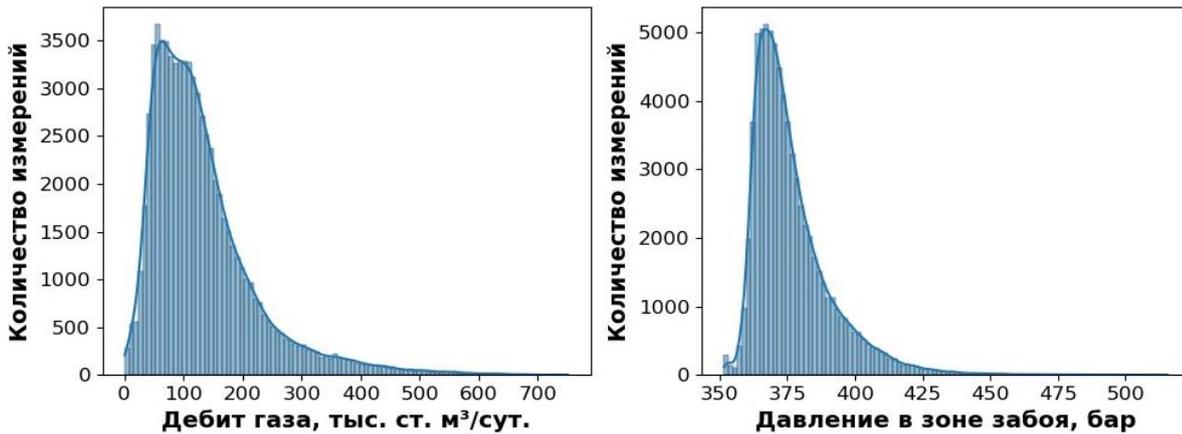


Рис. 1. Распределение дебита газа и давления в зоне забоя

Fig. 1. Distribution of gas flow rate and pressure along the wellbore

Распределение давления коррелирует с распределением дебита газа, что является очевидным, так как данные величины связаны напрямую, согласно закону Дарси [1]. Давление на различных расстояниях от ствола скважины варьируется от 351,69 до 520 бар (соответствует пластовому давлению).

Для наглядной оценки важности каждого компонента для прогнозирования дебита газа была составлена табл. 2. Анализ коэффициентов корреляции показывает, что все признаки взаимосвязаны с дебитом газа для горизонтальной скважины. Наибольший коэффициент корреляции (по модулю) имеет временной шаг – 0,566. Наихудшая корреляция у дебита с эффективной толщиной – –0,197.

Значение корреляции параметра эффективной толщины с целевой переменной может быть отрицательным, хотя он положительно влияет на целевую переменную. Данное явление связано с тем, что другие параметры (временной шаг, петрофизи-

ка и давление) вносили более значимый вклад в результирующий дебит газа. В дополнение было получено распределение для данных геологии с целью оценки характера плотности распределения входных параметров (рис. 2).

Таблица 2. Анализ коэффициентов корреляции с выходным параметром (дебит газа)

Table 2. Analysis of correlation coefficients with the output parameter (gas flow rate)

Временной шаг, месяц/Time step, month	-0,566
Пористость/Porosity, %	0,353
Проницаемость, Дарси/Permeability, Darcy	0,375
Водонасыщенность/Water saturation	-0,248
Эффективная толщина, м/Effective thickness, m	-0,197
Давление вдоль ствола скважины, бар. Pressure along the wellbore, bar	0,311
Давление зоны 4 ячеек, бар./4 cells area pressure, bar	0,298
Давление зоны 9 ячеек, бар./9 cells area pressure, bar	0,299

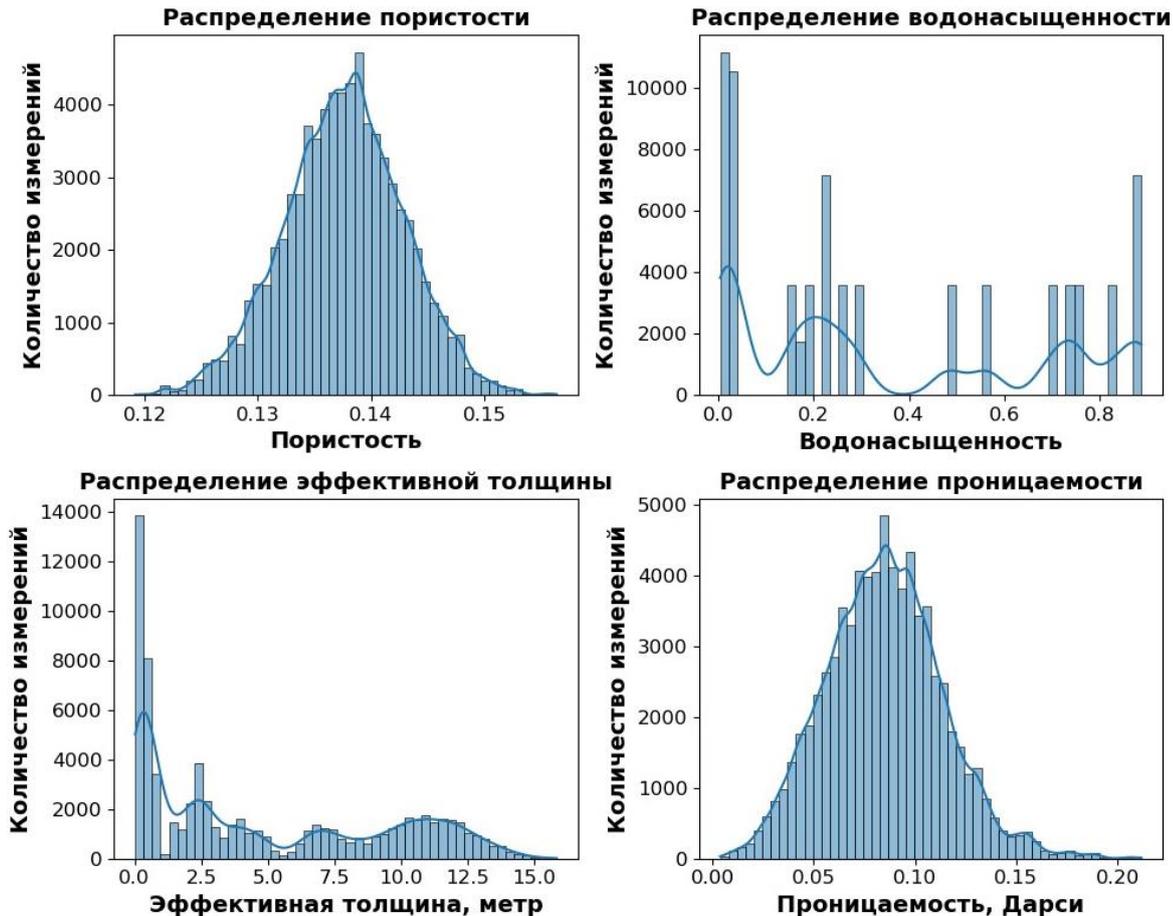


Рис. 2. Распределение геологических свойств
Fig. 2. Distribution of geological properties

В данном случае пористость и проницаемость на основе петрофизической модели носят характер нормального распределения. Значения варьируются от 11,9 до 15,6 % и от 4 до 212 мД, соответственно. Распределения носят схожий характер, так как данные геологические свойства имеют петрофизическую зависимость. Распределения равномерные. Характер распределения для водонасыщенности и эффективной толщины значительно отличается от характера нормального распределения. Имеется большая дисперсия, что является объяснимым фактом – данные параметры часто носят большую неопределенность при моделировании месторождений и разбор закономерно может принимать большие значения. Коэффициент вариации данных параметров находится в районе 1,5.

Материалы и методы

Несколько моделей машинного обучения с различным соотношением тестовой выборки к тренировочной применено для получения оптимального решения задачи прогнозирования дебита газа. Данное решение имеет наименьший показатель средней квадратичной ошибки (Root Mean Square

Error – RMSE), средней абсолютной процентной ошибки (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) и наибольший показатель коэффициента детерминации (R2) для тестовой и тренировочной выборки.

Тренировочные данные не требовали нормализации или стандартизации, так как методы случайного леса и ГБ не требуют данных операций [20, 21].

МО – область исследования в искусственном интеллекте, связанная с созданием и изучением статических алгоритмов, способных эффективно обобщать систему и выполнять задачи без явных инструкций. Другими словами, это способность охарактеризовать систему, находя зависимость между исходными и выходными данными. Существует множество систем, в которых зависимости между входом и выходом могут быть настолько сложными, что установить их аналитическим путем бывает просто невозможно. Также расчет усложняется большим количеством данных, количество значений входных параметров может исчисляться тысячами, поэтому решение данной системы становится нетривиальной задачей. Система пласт–скважина является также трудно прогнозируемой системой, что делает применение машинного обучения актуальным [22].

Зачастую, используя лишь одну модель машинного обучения, получить хороший прогноз бывает сложно. Результат модели зависит от начального шума данных, соотношения разделения стартового набора на тестовую и обучающую выборки, сам выбор значений в обучающую выборку несет долю случайности и создает разный разброс. Для того чтобы минимизировать данную ошибку создаются ансамбли моделей. Ансамблевое обучение – это общий мета-подход к машинному обучению, целью которого является улучшение предсказательной эффективности путем объединения прогнозов нескольких моделей [23]. Такие ансамбли и будут применяться в данной работе для прогнозирования показателей добычи скважины, в частности, случайный лес и ГБ на основе деревьев решений.

Метод дерева решений – семейство моделей МО, суть которого заключается в принятии большого количества простых решений, которые должны привести к ответу. Данный метод не обладает высокой обобщающей способностью из-за простого математического аппарата, но в то же время его расчёт очень прост, он служит фундаментом для построения ансамбля моделей [24]. Принцип работы дерева решений представлен на рис. 3.

Одним из самых распространённых и наглядных примеров применения ансамбля моделей МО является случайный лес [25–27]. Суть метода заключается в создании множества деревьев решений ограниченной глубины и дальнейшем получении ответа путем усреднения отдельных ответов на деревья решений (задача регрессии) или выбором наиболее популярного класса (задача классификации). Основные параметры, которые необходимо уточнить: количество признаков для обучения дерева, количество деревьев в лесу, глубина деревьев в лесу. Особенность данного метода заключается в том, что он практически не подвержен переобучению,

он позволяет уменьшить дисперсию, способствуя уменьшению значения функции потерь [24].

Модель случайного леса была применена для прогнозирования дебита газа с учетом геологических параметров и давления в зоне забоя и пласте. Модель получает набор данных и выдает наиболее вероятный дебит газа, основываясь на результате множества деревьев решений. Данное дерево представлено на рис. 3.

ГБ представляет собой высокоэффективный и широко используемый алгоритм машинного обучения [29–31]. ГБ заключается в использовании объединения базовых алгоритмов (как правило, упрощенных) в единую систему. Обучение происходит последовательно (что отличается от методик с беггингом). Каждая новая итерация пытается вычислить отклонение уже обученной модели на обучающей выборке. Создавая такой ансамбль моделей, можно получить на выходе минимальные отклонения [32]. В целом можно использовать различные алгоритмы в качестве базового. Как правило, градиентный бустинг хорошо себя показывает при работе с деревьями решений [33]. Функция для оптимизации градиентного бустинга может выглядеть как в выражении (1):

$$L(t) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}(x_i)^{t-1} + f_t(x_i) + \Omega(f_t)), \quad (1)$$

где $L(t)$ – функция оптимизации; $l(g(t))$ – функция потерь; $y_i, \hat{y}(x_i)^{t-1}$ – значение i -ого элемента обучающей выборки и сумма значений первых t базовых функций соответственно (в нашем случае деревьев); x_i – набор признаков i -ого элемента обучающей выборки; f_t – функция, которую хотим обучить (в нашем случае дерево) на шаге t ; $f_t(x_i)$ – значение модели на i -м элементе обучающей выборки; $\Omega(f_t)$ – функция регуляризации (не позволяет модели переобучиться).

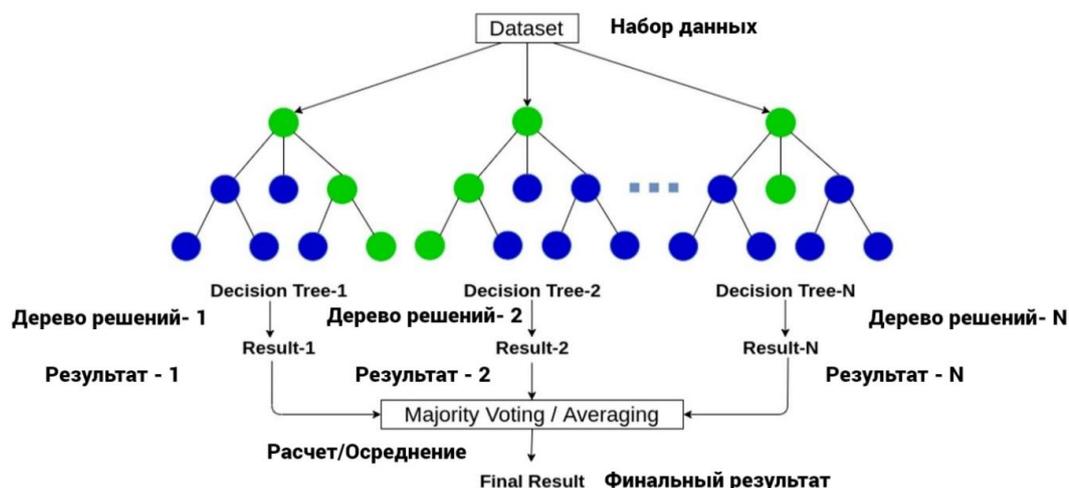


Рис. 3. Ансамбль деревьев решений (случайный лес) [28]
 Fig. 3. Ensemble of decision trees (random forest) [28]

ГБ в наше время является одной из передовых моделей. Он активно применяется в нефтегазовой отрасли и позволяет решать различные задачи, имея возможность адаптироваться под конкретную задачу [34]. Именно по этой причине данная модель была выбрана для оценки целевого показателя (дебита газа горизонтальной скважины) в данной работе.

Для прогнозирования дебита газа также применялся ГБ, который позволяет обучаться, предсказывать ошибку исходной модели машинного обучения и вносить в итоговый дебит корректировки. Для поиска оптимальных параметров применялся половинчатый поиск по сетке. Данные разбивались в аналогичном соотношении, как в итерации со случайным лесом.

Гиперпараметры – параметры, которые характеризуют модель машинного обучения. Именно эти параметры определяют, как модель будет подбирать выходные параметры (целевую переменную). Часто к таким параметрам относятся: шаг итерации, глубина деревьев, количество объектов ансамбля, коэффициент регуляризации и т. д. [35].

Подбор гиперпараметров является важным этапом к оптимизации модели машинного обучения. Имеются различные подходы к подбору гиперпараметров: поиск по сетке (Grid Search), случайный поиск по сетке (Random Search), Байесовская оптимизация и множество других видов оптимизаторов. В целом можно создать произвольный оптимизатор, все ограничено лишь навыками разработчика и сферой использования алгоритма МО [35].

Половинчатый поиск по сетке заключается в переборе комбинаций гиперпараметров (заранее заданный набор). Суть метода заключается в уменьшении изначальной выборки до n -ого количества элементов (n задает пользователь) и дальнейшей оценке комбинаций гиперпараметров этой выборки. После этого выборка увеличивается в k раз, а количество комбинаций гиперпараметров уменьшается в k раз (убираются кандидаты с наихудшим показателем ошибки). В итоге остается один наилучший набор гиперпараметров для данной модели МО. Выбранный алгоритм позволяет выполнять подбор параметров быстрее, с небольшими потерями в точности [36].

Кросс валидация – один из подходов к подбору наилучших показателей гиперпараметров. Она разбивает данные на k -количество частей, используя 1 часть для оценки модели, а $k-1$ часть для обучения. Затем выбирается другая часть для оценки и другие $k-1$ части для обучения. Суммируется ошибка всех полученных моделей – данное число характеризует итоговую ошибку исследуемой модели МО. Этот подход позволяет использовать все данные и уменьшить долю случайности в определении наилучшей модели [37].

Результаты исследования

Выбор соотношения тестовой выборки к тренировочной является очень важным аспектом обучения и дальнейшей валидации моделей МО. Правильность данного соотношения играет важную роль в оценке, контроле переобучения и выборе наилучшей модели в машинном обучении [20]. Рис. 4 демонстрирует результаты работы моделей градиентного бустинга на тестовых данных с разным соотношением тестовой выборки к тренировочной.

Сравнение ошибки этих моделей на рис. 4 показывает, что с увеличением количества обучающих данных ошибка тестовой подгруппы понижается. Для соотношения 80/20 показатели ошибок меньше по сравнению с соотношениями 75/25 или 70/30. Это говорит о том, что модель, полученная с использованием соотношения 80/20, обладает более высокой способностью к обобщению. Для моделей случайного леса ситуация аналогична и лучшее соотношение – 80/20.

Результаты, полученные в процессе обучения, могут сильно зависеть от конкретного разбиения набора данных на обучающий и тестовый. Для решения этой проблемы использовался половинчатый поиск по сетке – пятикратная кросс-валидация для заранее заданной комбинации гиперпараметров. Происходило изначальное уменьшение тренировочной выборки (80 % от общего объема данных, 58929 записей данных) до 230 элементов (желательно подбирать число, близкое к кратному выборке, что следует из принципа работы алгоритма [36]) и дальнейшая оценка комбинаций гиперпараметров этой выборки через кросс валидацию с разделением на пять равных частей. Это дает хорошую оценку эффективности модели, поскольку для обучения и оценки модели используется пять различных разделений данных обучения и оценки модели. Более того, это гарантирует, что каждое наблюдение используется как для обучения, так и для тестирования, что снижает риск переобученности. После этого выборка увеличивается в три раза, а количество комбинаций гиперпараметров уменьшается в три раза (убираются кандидаты с наихудшим показателем ошибки). В итоге остается один наилучший кандидат, он и будет наилучшим набором гиперпараметров для данной модели машинного обучения. Подобный подход позволяет сэкономить время с незначительными потерями в точности [36].

В табл. 3, 4 представлены варианты гиперпараметров, комбинации которых использовались при половинчатом поиске по сетке.

Ключевыми параметрами для определения модели ГБ (в случае, если базовая модель – дерево) являются: количество моделей, темп обучения, максимальная глубина дерева, минимальное количество листьев и минимальное количество разделений.

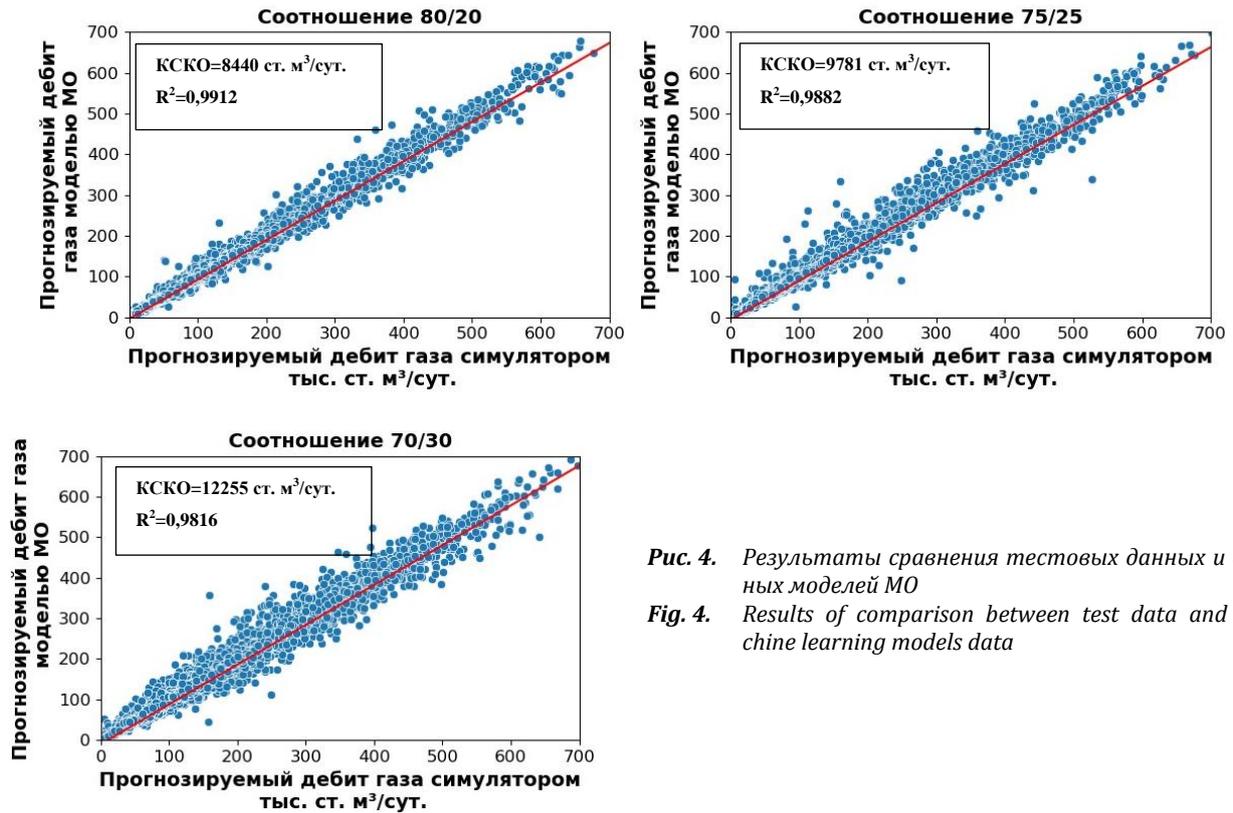


Рис. 4. Результаты сравнения тестовых данных и данных моделей МО

Fig. 4. Results of comparison between test data and machine learning models data

Таблица 3. Набор гиперпараметров для поиска лучшего решения при градиентном бустинге

Table 3. Set of hyperparameters while searching for the best solution in a gradient boosting

Гиперпараметр Hyperparameter	Значение/Value											
Количество моделей Number of estimators	1000			1500			3000			5000		
Темп обучения Learning rate	0,01			0,1				0,2				
Максимальная глубина Max depth	3		4		5		6		7		8	9
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Нет None	
Минимальное количество листьев Min samples leaf	1		2			4		6			8	
Минимальный объём разделения Min samples split	2		5			10		20			40	

Таблица 4. Набор гиперпараметров для поиска лучшего решения при случайном лесе

Table 4. Set of hyperparameters while searching for the best solutions in a random forest

Гиперпараметр Hyperparameter	Значение/Value											
Бутстреп/Bootstrap	Истина/True						Ложь/False					
Максимальная глубина Max depth	1	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Нет None	
Минимальное количество листьев Min samples leaf	1		2		4			6		8		
Минимальный объём разделения Min samples split	2		5			10		20			40	
Количество моделей Number of estimators	20	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000		

Таблица 5. Наилучшие гиперпараметры для моделей МО
Table 5. The best hyperparameters for ML models

Случайный лес/Random forest		Градиентный бустинг/Gradient boosting	
Гиперпараметр Hyperparameter	Значение Value	Гиперпараметр Hyperparameter	Значение Value
Бутстреп Bootstrap	Истина True	Темп обучения Learning rate	0,1
Максимальная глубина Max depth	40	Максимальная глубина Max depth	10
Минимальное количество листьев Min samples leaf	1	Минимальное количество листьев Min samples leaf	8
Минимальный объём разделения Min samples split	2	Минимальный объём разделения Min samples split	40
Количество моделей Number of estimators	2000	Количество моделей Number of estimators	5000

Ключевыми параметрами для определения модели случайного леса являются: количество моделей, наличие бутстрепа, максимальная глубина дерева, минимальное количество листьев и минимальное количество разделений.

В табл. 5 представлены наилучшие комбинации гиперпараметров, которые были получены на тестовую выборку с соотношением тренировочной выборки к тестовой 80/20 для моделей случайного леса и градиентного бустинга.

Половинчатый поиск по сетке определил, что при комбинациях гиперпараметров, указанных в табл. 5, получаются модели с наименьшими показателями ошибок (КСКО, САПО и R^2).

Кросс плот дебита газа, прогнозируемого симулятором и моделью машинного обучения, представлен на рис. 5. На данном рисунке показана работа модели как на тренировочной выборке, так и на тестовой. Сосредоточение большинства точек данных вблизи линии с наклоном 1 для обучающих и тестовых данных указывает на то, что модель ГБ

обеспечивает более эффективное прогнозирование по сравнению с моделью случайного леса.

В табл. 6 приведены значения ошибок двух рассматриваемых алгоритмов на различном наборе данных. Данный анализ позволяет сделать вывод о переобученности и недообученности модели, оценить ее обобщающую способность [20].

Модель градиентного бустинга показывает лучшие результаты на всех наборах данных, что представлено в табл. 6 (тренировочная выборка, тестовая выборка, все данные), по сравнению с моделью случайного леса. Значения всех ошибок меньше в случае использования первого алгоритма. Низкие показатели ошибок градиентного бустинга на тестовой выборке показывают, что получена модель с хорошей обобщающей способностью. Применение перекрестной проверки позволило добиться хороших показателей на всех наборах данных. В случае тестовой выборки значение КСКО отличается в 1,66 раз, R^2 на 1,5 %, САПО в 1,87.

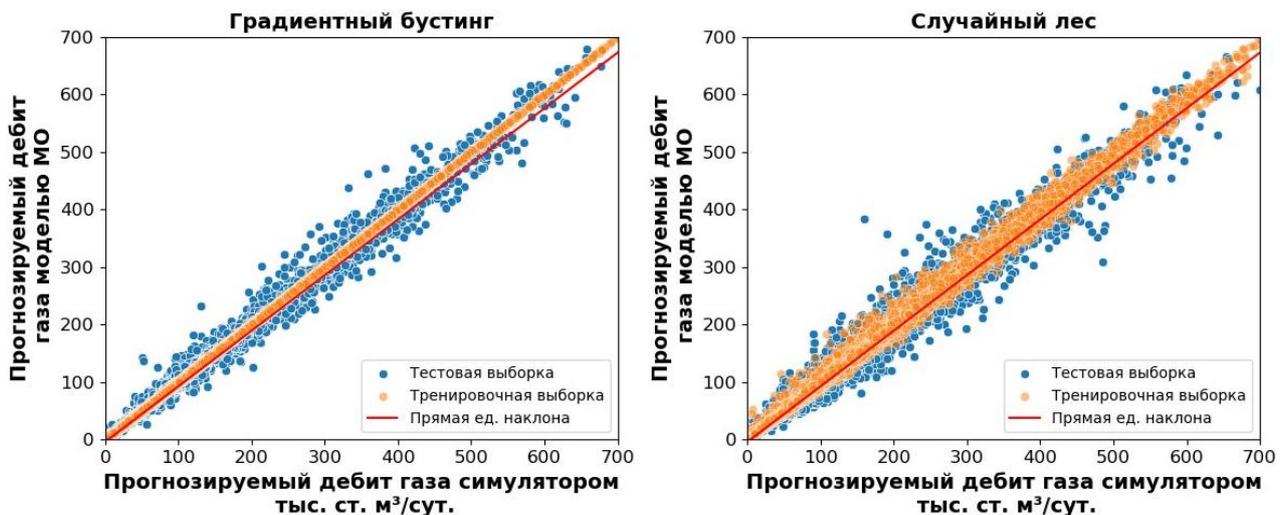


Рис. 5. Результаты сравнения моделей

Fig. 5. Results of comparison between the models

Таблица 6. Сравнение ошибок прогнозирования дебита газа с помощью моделей машинного обучения на тренировочных, тестовых выборках и на всем наборе данных

Table 6. Comparison of gas flow rate prediction errors by the applied machine learning models to the training, test samples and the full dataset

Модель Model	Градиентный бустинг Gradient boosting			Случайный лес Random forest		
	Ошибка Error	САПО, % MAPE, %	КСКО, ст. м ³ /сут RMSE, std. m ³ /day	КД R ²	САПО, % MAPE, %	КСКО, ст. м ³ /сут RMSE, std. m ³ /day
Тренировочная выборка Train sample 58929 записей 58929 records	0,536	704	0,9999	2,76	5125	0,9967
Тестовая выборка Test sample 14733 записей 14733 records	3,95	8440	0,9912	7,4	13994	0,9761
Все данные Full data 73662 записей 73662 records	1,21	3826	0,9982	3,67	7758	0,9926

Заключение

В данном исследовании использовалось несколько моделей машинного обучения с целью определения дебита горизонтальной газовой скважины. Дебит газа был спрогнозирован путем применения моделей МО случайного леса и градиентного бустинга. Модель требует геологических параметров (пористость, проницаемость, эффективную толщину, насыщенность), давления на

забое и вблизи скважины, а также временного шага, на который необходимо установить дебит газа. Было произведено 300 итераций гидродинамических расчетов с целью создания исходного набора данных для дальнейшей разработки и проверки модели. Лучший результат показала модель градиентного бустинга: КД=0,9912, R²=3,96 %, КСКО=8440 ст. м³/сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ritzi Jr R.W., Bobeck P. Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established by Darcy (1856) and Dupuit (1857) // Water Resources Research. – 2008. – Vol. 44. – № 10. – W 10402. DOI: 10.1029/2008WR007002.
- Fu Y. A critical productivity equation of horizontal wells in a bottom water drive reservoir with low-permeability interbeds // Arabian Journal Geosciences. – 2019. – Vol. 12. – Ar. Numb. 758. – № 24. DOI: 10.1007/s12517-019-4930-y.
- Ahmed T. Reservoir engineering handbook. 5th ed. – Oxford: Gulf Professional Publ., 2019. – 492 p. DOI: 10.1016/C2016-0-04718-6.
- Arps J.J. Analysis of decline curves // Transactions of the AIME. – 1945. – Vol. 160. – № 1. – P. 228–247. DOI: 10.2118/945228-G.
- Tracy G.W. Simplified form of the material balance equation // Transactions of the AIME. – 1955. – Vol. 204. – № 1. – P. 243–246. DOI: 10.2118/438-g.
- Fuentes-Cruz G., Vasquez-Cruz M.A. Reservoir performance analysis through the material balance equation: an integrated review based on field examples // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 208. – 109377, Part A. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109377.
- Coats K.H. Use and misuse of reservoir simulation models // Journal of Petroleum Technology. – 1969. – Vol. 21. – № 11. – P. 1391–1398. DOI: 10.2118/2367-pa.
- Fanchi J. Principles of applied reservoir simulation. 3rd ed. – Edinburgh: Gulf Professional, 2006. – 510 p.
- Hossain M.S. Assessment of prospective gas resources and develop a production view of eastern foldbelt (block 18), Bangladesh using Monte Carlo simulation method // Natural Gas Industry B. – 2022. – Vol. 9. – № 6. – P. 588–594. DOI: 10.1016/j.ngib.2022.11.001.
- Approach to quantify productivity of fishbone multilateral well / A. Hassan, A. Abdulraheem, S. Elkhatatny, M. Ahmed // SPE Annual Technical Conf. and Exhibition. – San Antonio, Texas, USA, October 9–11, 2017. – P. 1–11. DOI: 10.2118/187458-ms.
- Zhong R., Salehi C., Johnson 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.
- Hybridized machine-learning for prompt prediction of rheology and filtration properties of water-based drilling fluids / S. Davoodi, M. Mehrad, D.A. Wood, H. Ghorbani, V.S. Rukavishnikov // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 123. – 106459, Part C. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106459.
- Dramschi J.S. 70 years of machine learning in geoscience in review // Advances in Geophysics. – 2020. – Vol. 61. – P. 1–55. DOI: 10.1016/bs.agph.2020.08.002.

14. A new approach to mechanical brittleness index modeling based on conventional well logs using hybrid algorithms / T.M. Zamanzadeh, S. Davoodi, B. Larki, M. Mehrad, S. Rashidi, Vasfi M. // *Earth Science Informatics*. – 2023. – Vol. 16. – P. 3387–3416. DOI: 10.1007/s12145-023-01098-1.
15. Wang H., Chen S. Insights into the application of machine learning in reservoir engineering: current developments and future trends // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – 1392. – № 3. DOI: 10.3390/en16031392.
16. Zhang R., Jia H. Production performance forecasting method based on multivariate time series and vector autoregressive machine learning model for waterflooding reservoirs // *Petroleum Exploration and Development*. – 2021. – Vol. 48. – № 1. – P. 201–211. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60016-2.
17. A systematic review of data science and machine learning applications to the oil and gas industry / Z. Tariq, M.S. Aljawad, A. Hasan, M. Murtaza, E. Mohammed, A. El-Husseiny, A.A. Sulaiman, M. Mohamed, A. Abdulazeez // *Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2021. – Vol. 11. – P. 4339–4374. DOI: 10.1007/s13202-021-01302-2.
18. Multilateral wells evaluation utilizing artificial intelligence / A. Buhulaigah, A.S. Al-Mashhad, S.A. Al-Arifi, M.S. Al-Kadem, M.S. Al-Dabbous // *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conf.* – Manama, Kingdom of Bahrain, March 6–9, 2017. – P. 1–12. DOI: 10.2118/183688-ms.
19. Wui Ng C.S., Ghahfarokhi A.J., Amar M.N. Well production forecast in Volve field: application of rigorous machine learning techniques and metaheuristic algorithm // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 208. – 109468, Part B. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109468.
20. Gopal M. *Applied machine learning*. 1st ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 623 p.
21. Filho M. Do decision trees need feature scaling or normalization? // *Forecastgy*. – 2023. URL: <https://forecastgy.com/posts/do-decision-trees-need-feature-scaling-or-normalization/> (дата обращения 06.12.2023).
22. Pugliese R., Regondi S., Marini R. Machine learning-based approach: Global trends, research directions, and regulatory standpoints // *Data Science and Management*. – 2021. – Vol. 4. – P. 19–29. DOI: 10.1016/j.dsm.2021.12.002.
23. Mohammed A., Kora R. A comprehensive review on ensemble deep learning: opportunities and challenges // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. – 2023. – Vol. 35. – № 2. – P. 757–774. DOI: 10.1016/j.jksuci.2023.01.014.
24. Leondes C.T. *Expert systems: the technology of knowledge management and decision making for the 21st century*. – Cambridge: Academic Press, 2002. – 1947 p.
25. Gordon J.B., Sanei H., Pedersen P.K. Predicting hydrogen and oxygen indices (HI, OI) from conventional well logs using a Random Forest machine learning algorithm // *International Journal of Coal Geology*. – 2022. – Vol. 249. – 103903. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103903.
26. Rahimi M., Riahi M.A. Reservoir facies classification based on random forest and geostatistics methods in an offshore oilfield // *Journal of Applied Geophysics*. – 2022. – Vol. 201. – 104640. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104640.
27. Darijani M., Farquharson C.G., Perrouy S.A. Random Forest approach to predict geology from geophysics in the Pontiac subprovince, Canada // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 59. – № 8. – P. 489–503. DOI: 10.1139/cjes-2021-0089.
28. Brital A. Random forest algorithm explained. – 2021. URL: <https://anasbrital98.github.io/blog/2021/Random-Forest/> (дата обращения 05.12.2023).
29. Advanced well stimulation selection with gradient boosting / V. Kniazev, A. Erofeev, A. Demidov, D. Orlov, D. Koroteev // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 228. – 212026. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212026.
30. Lee H., Lee H.P. Formation lithology predictions based on measurement while drilling (MWD) using gradient boosting algorithms // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 227. – 211917. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.211917.
31. A physics-guided eXtreme gradient boosting model for predicting the initial productivity of oil wells / Y. Dong, L. Song, Q. Zhao, Z. Ding, L. Qiu, C. Lu, G. Chen // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 231. – 212402, Part B. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212402.
32. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // *The Annals of Statistics*. – 2001. – Vol. 29. – № 5. – P. 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451.
33. Chen T., Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system // *KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*. – San Francisco, CA, USA, August 7–8, 2016. – P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
34. Belyadi H., Haghightat A. *Supervised learning // Machine Learning Guide for Oil and Gas Using Python*. – Oxford: Gulf Professional Publ., 2021. – P. 169–295. DOI: 10.1016/B978-0-12-821929-4.00004-4.
35. Yang L., Shami A. On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice // *Neurocomputing*. – 2020. – Vol. 415. – P. 295–316. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.07.061.
36. Sklearn.model_selection.HalvingGridSearchCV // scikit-learn, 2023. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.HalvingGridSearchCV.html (дата обращения 06.12.2023).
37. Елистратова Е. Кросс-валидация // *Школа анализа данных*. URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/kross-validaciya> (дата обращения 05.12.2023).

Информация об авторах

Сергей Александрович Пискунов, инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. piskunovsa@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8491-4596>

Шадфар Давуди, инженер-исследователь Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела при Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. davoodis@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1733-1677>

Поступила в редакцию: 29.01.2024

Поступила после рецензирования: 20.02.2024

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Ritz Jr R.W., Bobeck P. Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established by Darcy (1856) and Dupuit (1857). *Water Resources Research*, 2008, vol. 44, no. 10, W 10402. DOI: 10.1029/2008WR007002.
2. Fu Y. A critical productivity equation of horizontal wells in a bottom water drive reservoir with low-permeability interbeds. *Arabian Journal Geosciences*, 2019, vol. 12, Ar. Numb. 758, no. 24. DOI: 10.1007/s12517-019-4930-y.
3. Ahmed T. *Reservoir engineering handbook*. 5th ed. Oxford, Gulf Professional Publ., 2019. 492 p. DOI: 10.1016/C2016-0-04718-6.
4. Arps J.J. Analysis of decline curves. *Transactions of the AIME*, 1945, vol. 160, no. 1, pp. 228–247. DOI: 10.2118/945228-G.
5. Tracy G.W. Simplified form of the material balance equation. *Transactions of the AIME*, 1955, vol. 204, no. 1, pp. 243–246. DOI: 10.2118/438-g.
6. Fuentes-Cruz G., Vasquez-Cruz M.A. Reservoir performance analysis through the material balance equation: an integrated review based on field examples. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, 109377, Part A. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109377.
7. Coats K.H. Use and misuse of reservoir simulation models. *Journal of Petroleum Technology*, 1969, vol. 21, no. 11, pp. 1391–1398. DOI: 10.2118/2367-pa.
8. Fanchi J. *Principles of applied reservoir simulation*. 3rd ed. Edinburgh, Gulf Professional, 2006. 510 p.
9. Hossain M.S. Assessment of prospective gas resources and develop a production view of eastern foldbelt (block 18), Bangladesh using Monte Carlo simulation method. *Natural Gas Industry B*, 2022, vol. 9, no. 6, pp. 588–594. DOI: 10.1016/j.ngib.2022.11.001.
10. Hassan A., Abdurraheem A., Elkatatny S., Ahmed M. Approach to quantify productivity of fishbone multilateral well. *SPE Annual Technical Conf. and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, October 9–11, 2017. pp. 1–11. DOI: 10.2118/187458-ms.
11. Zhong R., Salehi C., Johnson 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.
12. Davoodi S., Mehrad M., Wood D.A., Ghorbani H., Rukavishnikov V.S. Hybridized machine-learning for prompt prediction of rheology and filtration properties of water-based drilling fluids. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, vol. 123, 106459, Part C. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106459.
13. Dramsch J.S. 70 Years of machine learning in geoscience in review. *Advances in Geophysics*, 2020, vol. 61, pp. 1–55. DOI: 10.1016/bs.agph.2020.08.002.
14. Zamanzadeh T.M., Davoodi S., Larki B., Mehrad M., Rashidi S., Vasfi M. A new approach to mechanical brittleness index modeling based on conventional well logs using hybrid algorithms. *Earth Science Informatics*, 2023, vol. 16, pp. 3387–3416. DOI: 10.1007/s12145-023-01098-1.
15. Wang H., Chen S. Insights into the application of machine learning in reservoir engineering: current developments and future trends. *Energies*, 2023, vol. 16, 1392, no. 3. DOI: 10.3390/en16031392.
16. Zhang R., Jia H. Production performance forecasting method based on multivariate time series and vector autoregressive machine learning model for waterflooding reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, no. 1, pp. 201–211. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60016-2.
17. Tariq Z., Aljawad M.S., Hasan A., Murtaza M., Mohammed E., El-Husseiny A., Sulaiman A.A., Mohamed M., Abdulazeez A. A systematic review of data science and machine learning applications to the oil and gas industry. *Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, vol. 11, pp. 4339–4374. DOI: 10.1007/s13202-021-01302-2.
18. Buhulaigah A., Al-Mashhad A.S., Al-Arifi S.A., Al-Kadem M.S., Al-Dabbous M.S. Multilateral wells evaluation utilizing artificial intelligence. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conf.* Manama, Kingdom of Bahrain, March 6–9, 2017. pp. 1–12. DOI: 10.2118/183688-ms.
19. Wui Ng C.S., Ghahfarokhi A.J., Amar M.N. Well production forecast in Volve field: application of rigorous machine learning techniques and metaheuristic algorithm. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, 109468, Part B. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109468.
20. Gopal M. *Applied machine learning*. 1st ed. New York, McGraw-Hill Education, 2019. 623 p.
21. Filho M. Do decision trees need feature scaling or normalization? *Forecastegy*, 2023. Available at: <https://forecastegy.com/posts/do-decision-trees-need-feature-scaling-or-normalization/> (accessed 6 December 2023).
22. Pugliese R., Regondi S., Marini R. Machine learning-based approach: global trends, research directions, and regulatory standpoints. *Data Science and Management*, 2021, vol. 4, pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.dsm.2021.12.002.
23. Mohammed A., Kora R. A comprehensive review on ensemble deep learning: opportunities and challenges. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2023, vol. 35, no. 2, pp. 757–774. DOI: 10.1016/j.jksuci.2023.01.014.
24. Leondes C.T. *Expert systems: the technology of knowledge management and decision making for the 21st century*. Cambridge, Academic Press, 2002. 1947 p.
25. Gordon J.B., Sanei H., Pedersen P.K. Predicting hydrogen and oxygen indices (HI, OI) from conventional well logs using a Random Forest machine learning algorithm. *International Journal of Coal Geology*, 2022, vol. 249, 103903. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103903.
26. Rahimi M., Riahi M.A. Reservoir facies classification based on random forest and geostatistics methods in an offshore oilfield. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, vol. 201, 104640. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104640.
27. Darijani M., Farquharson C.G., Perrouy S.A. Random Forest approach to predict geology from geophysics in the Pontiac subprovince, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2022, vol. 59, no. 8, pp. 489–503. DOI: 10.1139/cjes-2021-0089.

28. Brital A. *Random Forest Algorithm Explained*. 2021. Available at: <https://anasbrital98.github.io/blog/2021/Random-Forest/> (accessed 5 December 2023).
29. Kniazev V., Erofeev A., Demidov A., Orlov D., Koroteev D. Advanced well stimulation selection with gradient boosting. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 228, 212026. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212026.
30. Lee H., Lee H.P. Formation lithology predictions based on measurement while drilling (MWD) using gradient boosting algorithms. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 227, 211917. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.211917.
31. Dong Y., Song L., Zhao Q., Ding Z., Qiu L., Lu C., Chen G. A physics-guided eXtreme gradient boosting model for predicting the initial productivity of oil wells. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 231, 212402, Part B. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212402.
32. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 2001, vol. 29, no. 5, pp. 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451.
33. Chen T., Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system. *KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco, CA, USA, August 7–8, 2016. pp. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
34. Belyadi H., Haghghat A. *Supervised learning. Machine Learning Guide for Oil and Gas Using Python*. Oxford, Gulf Professional Publ., 2021. pp. 169–295. DOI: 10.1016/B978-0-12-821929-4.00004-4.
35. Yang L., Shami A. On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice. *Neurocomputing*, 2020, vol. 415, pp. 295–316. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.07.061.
36. Sklearn.model_selection.HalvingGridSearchCV. *scikit-learn*, 2023. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.HalvingGridSearchCV.html (accessed 6 December 2023).
37. Elistratova E. *Cross-validation. School of Data Analysis*. (In Russ.) Available at: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/kross-validaciya> (accessed 5 December 2023).

Information about the authors

Sergey A. Piskunov, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. piskynovsa@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8491-4596>.

Shadfar Davoodi, Research Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. davoodis@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1733-1677>.

Received: 29.01.2024

Revised: 20.02.2024

Accepted: 19.04.2024

УДК 622.276
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4328
Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Цифровой графический мониторинг энергетического состояния нефтяных залежей

Л.А. Захаров^{1✉}, И.Н. Пономарева², Д.А. Мартюшев²

¹ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Россия, г. Пермь

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

✉ lzakharov-ng@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена тем, что контроль энергетического состояния залежей является неотъемлемой составляющей общей системы мониторинга разработки месторождений углеводородов. Традиционным способом контроля энергетического состояния залежей является построение карт изобар, при этом в качестве исходных данных используются материалы гидродинамических исследований скважин при неустановившихся режимах. В существующих технико-экономических условиях следует считать невозможной даже условно одновременную остановку всего фонда скважин для фактических определений пластового давления. Данного недостатка лишены косвенные методы определения пластового давления. В этой связи представляется актуальным сопоставление непосредственного и косвенных методов определения пластового давления при использовании их данных для анализа энергетического состояния залежей углеводородов. **Цель:** сравнительная оценка непосредственного и косвенных методов определения пластового давления при анализе энергетического состояния залежей (при построении карт изобар). **Объект:** турнейско-фаменские карбонатные залежи нефти месторождений Пермского края. **Методы:** гидродинамические исследования скважин, анализ истории добычи по скважинам (модуль Toraze (Kappa Workstation)), методы машинного обучения (модульный сервис Data Stream Analytics (DSA)), картопостроение, корреляционный анализ. **Результаты.** Разновременность гидродинамических исследований скважин не позволяет выполнить достоверную оценку текущего энергетического состояния залежей, в отличие от косвенных методов определения пластового давления, практическая реализация которых позволяет получать искомую величину на любую дату. Однако при условно одинаковой высокой прогностической способности косвенных методов приоритетными следует считать рассматриваемые методы машинного обучения, что обусловлено такими их преимущественными характеристиками, как низкая продолжительность вычислительных операций, минимальный набор исходных данных, интегрированный сервис картопостроения.

Ключевые слова: пластовое давление, гидродинамические исследования скважин, анализ добычи, методы машинного обучения, карта изобар

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0005).

Для цитирования: Захаров Л.А., Пономарева И.Н., Мартюшев Д.А. Цифровой графический мониторинг энергетического состояния нефтяных залежей // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 131–141. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4328

UDC 622.276
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4328

Digital graphic monitoring of energy condition of oil reservoirs

L.A. Zakharov^{1✉}, I.N. Ponomareva², D.A. Martyushev²

¹ LLC "LUKOIL-Engineering", Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ lzakharov-ng@mail.ru

Abstract. Relevance. Control of energy state of reservoirs is an integral part of the overall system for monitoring the development of hydrocarbon deposits. The traditional way to control the energy state of reservoirs is to build isobar maps, while the input data are the materials of well tests in unsteady conditions. In the current technical and economic conditions, it should be considered impossible even conditionally simultaneous shutdown of the entire well stock for the actual determination of reservoir pressure. This shortcoming is devoid of indirect methods for determining reservoir pressure. In this regard, it seems relevant to compare direct and indirect methods for determining reservoir pressure when using their data to analyze the energy state of hydrocarbon deposits. **Aim.** Comparative assessment of direct and indirect methods for determining reservoir pressure in the analysis of the energy state of deposits (when constructing isobar maps). **Object.** Tournaisian-Famenian carbonate deposits of oil from the fields of the Perm Krai. **Methods.** Well tests, analysis of production history by wells (module Topaze (Kappa Workstation)), machine learning methods (modular service Data Stream Analytics (DSA)), mapping, correlation analysis. **Results.** Well tests carried out at different times do not allow a reliable assessment of the current energy state of reservoirs, in contrast to indirect methods for determining reservoir pressure, the practical implementation of which allows obtaining the desired value for any date. However, with conditionally the same high predictive ability of indirect methods, the considered methods of machine learning should be considered a priority. This is due to their advantageous characteristics, such as low duration of computational operations, a minimum set of initial data, an integrated mapping service.

Keywords: formation pressure, well tests, production analysis, machine learning methods, isobar map

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSNM-2024-0005).

For citation: Zakharov L.A., Ponomareva I.N., Martyushev D.A. Digital graphic monitoring of energy condition of oil reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 131–141. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4328

Введение

Динамическое пластовое давление является важнейшим критерием, характеризующим энергетическое состояние залежей углеводородов в процессе их разработки. Контроль за величиной пластового давления является неотъемлемой составляющей системы мониторинга разработки месторождений.

При мониторинге энергетического состояния залежей принято изучать распределение динамического пластового давления по их площади, и с этой целью строят карту изобар. Использование карты изобар для целей нефтяной геологии отражено в нормативном документе [РД-153-39.0-110-01], в соответствии с которым построение карты изобар рекомендуется осуществлять с периодичностью один раз в квартал. Исходными данными для построения карты являются фактические определения пластового давления по гидродинамическим исследованиям (ГДИ) скважин методом восстановления давления. Проведение указанных исследований с периодичностью один раз в полгода также регламентировано в нормативном документе [РД-153-39.0-110-01]. Восстановление давления, особенно в низкопродуктивных скважинах, продолжается в течение длительного периода времени (до двух–трех месяцев) и сопровождается проблемами технико-экономического характера (недоборы нефти, затруднения в пуске скважин после остановки и т. д.). Как следствие, фактическая периодичность и продолжительность исследований не соответствует нормам и требованиям системы мониторинга процессов разработки месторождений, а охват фонда определениями пла-

стового давления редко является стопроцентным. В результате при построении карт изобар используют одновременные определения пластового давления не по всему фонду скважин, что ставит под сомнение достоверность мониторинга энергетического состояния залежей на основе карт изобар, построенных по данным исследований скважин.

Следствием обозначенной выше проблематики является значительное количество работ, посвященных определению пластового давления без остановки скважин на исследование. Например, в работе [1] предложен способ оценки пластового давления при разведочном бурении, позволяющий выявить зоны аномально высокого пластового давления при наличии сейсмических данных о глубинах залегания ловушек. Указанный способ оценки базируется на методиках с использованием d - и σ -экспонент, учитывающих механическую скорость бурения, скорость вращения ротора, нагрузку на долото и его диаметр, литологическую константу и степень уплотнения пород, плотность бурового раствора и горных пород. Очевидно, основным недостатком способа является возможность его практического применения только на этапе строительства скважины. Также на этапе строительства скважины пластовое давление определяют в рамках опробования коллектора [2]. В статье [3] авторы предлагают осуществлять прогнозирование пластового давления с применением модифицированной модели Аташбари по данным каротажа на кабеле. Этот метод основан на использовании зависимости пористости и сжимаемости горных пород от пластового давления. Метод определения пластового

давления по данным вывода скважин на режим после ремонта предложен в работе [4]. Сущность метода заключается в использовании карт вывода скважин на режим. Метод применим только для скважин, которые были подвержены глушению при текущем или капитальном ремонте и оборудованных установками электроцентробежных насосов. Новый метод расчета пластового давления для одной скважины с использованием устьевого давления, апробированный и активно применяющийся на нефтяных месторождениях Китая, описан в работе [5]. Алгоритм косвенного определения пластового давления в условиях трехфазного притока воды, нефти и выделившегося растворенного газа с использованием методов Data Mining, системного и статистического дескриптивного анализа предложен в работе [6]. Метод определения пластового давления, основанный на сочетании обобщенной формулировки материального баланса и теории псевдостационарного состояния, предложен в работе [7]. Возможности метода продемонстрированы авторами на примере пяти вертикальных и горизонтальных скважин, во всех случаях получена удовлетворительная сходимость расчетных и фактических значений пластового давления. Однако недостатком метода следует считать его применимость только в условиях стационарных дебитов или забойных давлений. Схожий метод, основанный на материальном балансе, предлагается в работе [8]. Недостатком метода является возможность его применения для скважин с радиальным режимом течения. Способ определения пластового давления в глубинно-насосных нефтяных скважинах без их остановки представлен в работе [9]. Суть метода сводится к тому, что в затрубное пространство подливается или закачивается агрегатом жидкость и ее уровень поднимается выше статического положения, по данным падения уровня строится соответствующая кривая и характеристика насоса. Далее проводится касательная к характеристике насоса; точка касания является глубиной статического уровня, который впоследствии пересчитывается в пластовое давление. Данный метод усовершенствован в работе [10], его особенностью является сокращение продолжительности исследований. Метод, который можно использовать для определения среднего пластового давления как функции времени истощения, предложен в работе [11]. Данный метод основан на совместном использовании уравнения псевдостационарного состояния с его интегральной функцией. В результате возможно построение графика, при обработке которого определяется разница между средним пластовым давлением и забойным давлением. В свою очередь, при известном значении забойного давления определение пластового не сопровождается затруднениями [12–15].

Принципиально можно выделить два ключевых направления – математическая обработка и анализ истории добычи, а также методы искусственного интеллекта и машинного обучения. Метод анализа добычи основан на исследованиях Арпс, Феткович, Бласингейм и сводится, по сути, к обратной задаче подземной гидромеханики. В мировой практике получил широкое распространение метод анализа добычи, реализованный в модуле Toraze (программное обеспечение Kappa Workstation). При интерпретации истории добычи по скважинам в указанном программном комплексе получают информацию о фильтрационных свойствах коллектора и пластовом давлении. Анализируя возможности метода для решения задачи воспроизведения пластового давления, следует отметить его высокую трудозатратность, требование к высокой квалификации специалиста и проблематику импортозамещения [16–18].

Решение задачи воспроизведения пластового давления без остановки скважин на исследование с применением методов машинного обучения описано в работах [19–25]. Авторские алгоритмы реализованы в виде модульного сервиса Data Stream Analytics (DSA), их особенностью являются высокая скорость вычислительных операций и минимальный набор требуемых исходных данных.

Представляет интерес сравнительный анализ достоверности графического мониторинга энергетического состояния залежей нефти при использовании в качестве исходных данных фактических определений пластовых давлений, а также результатов, полученных в программных продуктах Toraze (анализ добычи) и DSA (машинное обучение), чему посвящена настоящая работа.

Исходные данные

В качестве объекта исследования выбраны две турнейско-фаменские карбонатные залежи нефти Гагаринского и Шершневого месторождений.

Выбранные месторождения расположены в Пермском крае и приурочены к тектонической зоне Соликамской депрессии. Обе залежи характеризуются условной круговой формой и равномерной разбуренностью, что позволит лучше визуализировать картопостроение. Добывающий фонд месторождений оснащен глубинными измерительными приборами, гидродинамические исследования характеризуются максимальными для региона охватом и периодичностью.

Результаты

Определение величин пластового давления в модульном сервисе DSA, как отмечено ранее, основано на применении методов машинного обучения. Несомненными преимуществами реализованного метода являются высокая скорость вычислительных операций и минимальный набор исходных

данных. Реализованный функционал позволяет выполнять ретроспективную (на весь период эксплуатации) и перспективную (на полгода) оценку величины пластового давления по каждой скважине с временным интервалом в один месяц. Результаты вычислений визуализируются в виде графиков (рис. 1), на которые также нанесены фактические величины пластового давления, определенные по ГДИ. Также результаты вычислений сводятся в таблицу, которая впоследствии используется в качестве исходных данных при графическом мониторинге разработки с построением карты изобар.

Анализируя представленный на рис. 1 пример, можно отметить, что данный метод позволил с высокой достоверностью воспроизвести пластовое

давление даже в периоды его скачкообразного поведения, характерного для сложнопостроенных карбонатных коллекторов.

Модуль Toraze программного комплекса Карра Workstation нацелен на обработку истории добычи индивидуально по каждой из скважин, при этом определяются фильтрационные параметры пласта и пластовое давление. С учетом трудоемкости процесса интерпретации данных в модуле Toraze (примерно 3–4 часа на скважину) воспроизведение пластового давления по всему фонду скважин среднего месторождения осуществляется в течение довольно длительного периода времени. Диалоговое окно модуля Toraze при обработке истории добычи по скважине проиллюстрировано на рис. 2.



Рис. 1. Результаты определения пластового давления методами машинного обучения в DSA на примере скв. 66 Шершнеvского месторождения

Fig. 1. Results of determining reservoir pressure using machine learning methods in DSA on the example of well 66 of the Shershnevskoe field

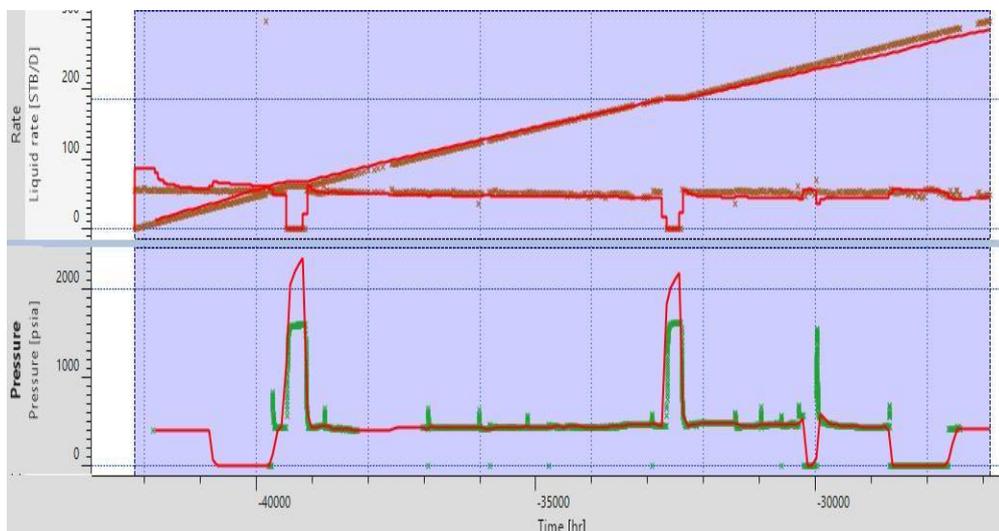


Рис. 2. Обработка данных по истории добычи в модуле Toraze на примере скв. 66 Шершнеvского месторождения

Fig. 2. Data processing on production history in the Topaze module using the example of well 66 of the Shershnevskoe field

Два рассмотренных выше косвенных метода определения пластового давления реализованы применительно ко всем скважинам добывающего фонда рассматриваемых месторождений. Даты анализа обоснованы исходя из принципа максимальной освещенности фонда гидродинамических исследований скважин с фактическими определениями пластового давления (01.01.2009 для Шершневого месторождения и 01.01.2016 г. для Гагаринского месторождения).

Данные по фактическим определениям пластового давления (для Шершневого месторождения) по ГДИ на дату, максимально приближенную к дате анализа, представлены в таблице.

Таблица. Данные о фактических определениях пластового давления для Шершневого месторождения

Table. Data on actual formation pressure determinations for the Shershnevskoe field

№ скв. Well no.	Дата ГДИ Date of well tests	№ скв. Well no.	Дата ГДИ Date of well tests
66	29.11.2008	410	16.12.2008
70	13.12.2008	411	08.07.2008
79	02.04.2008	412	02.05.2008
80	17.03.2008	413	18.11.2008
401	09.07.2008	414	24.01.2008
402	30.10.2008	416	02.09.2008
403	29.11.2008	417	06.12.2008
404	22.07.2008	419	30.04.2008
406	30.04.2008	420	31.10.2008
407	04.12.2008	422	22.06.2008
409	25.03.2008	423	04.03.2008

Как следует из представленных в таблице данных, фактические значения пластовых давлений определены по всем действующим скважинам фонда, однако период проведения ГДИ варьируется в пределах календарного 2008 г.

По результатам реализации косвенных методов определения пластового давления и их фактическим значениям построена карта изобар (рис. 3). Сервис автоматизированного построения карт изобар, как и других карт мониторинга разработки залежей (текущих отборов, накопленных отборов и др.) реализован в DSA (QR-код на сайт программы представлен на рис. 3), при этом дополнительно привлекаются координаты скважин и контуров нефтеносности, сведенные предприятием-недропользователем в единый файл.

Как следует из сравнительного анализа карт, представленных на рис. 4, они в целом одинаково характеризуют текущее энергетическое состояние объекта, то есть косвенные методы определения пластового давления демонстрируют те же результаты, что и материалы ГДИ. Данный вывод, применительно к Шершневному месторождению, подтверждается также при сопоставлении рассчитанных и фактических пластовых давлений, определенных по ГДИ (рис. 4). Анализ представленного корреляционного поля позволяет сделать вывод о сходимости рассчитанных и фактических пластовых давлений, что, в свою очередь, свидетельствует о высокой прогностической способности обоих рассматриваемых косвенных методов применительно к условиям Шершневого месторождения.

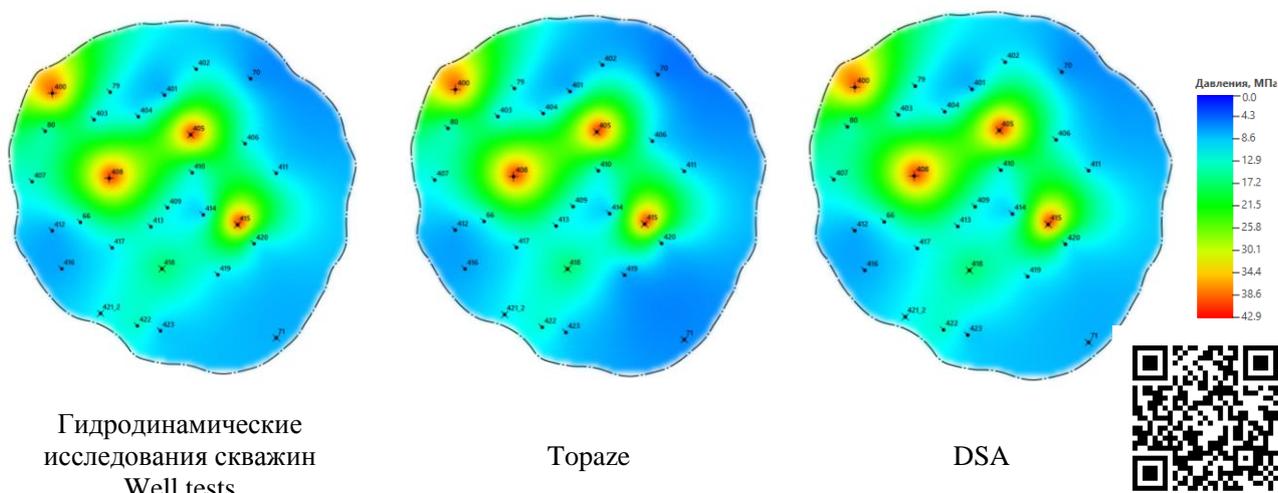


Рис. 3. Карты изобар, построенные для Шершневого месторождения по данным реализации косвенных методов определения пластового давления и ГДИ

Fig. 3. Isobar maps built for the Shershnevskoe field based on the data from the implementation of indirect methods for determining reservoir pressure and well tests

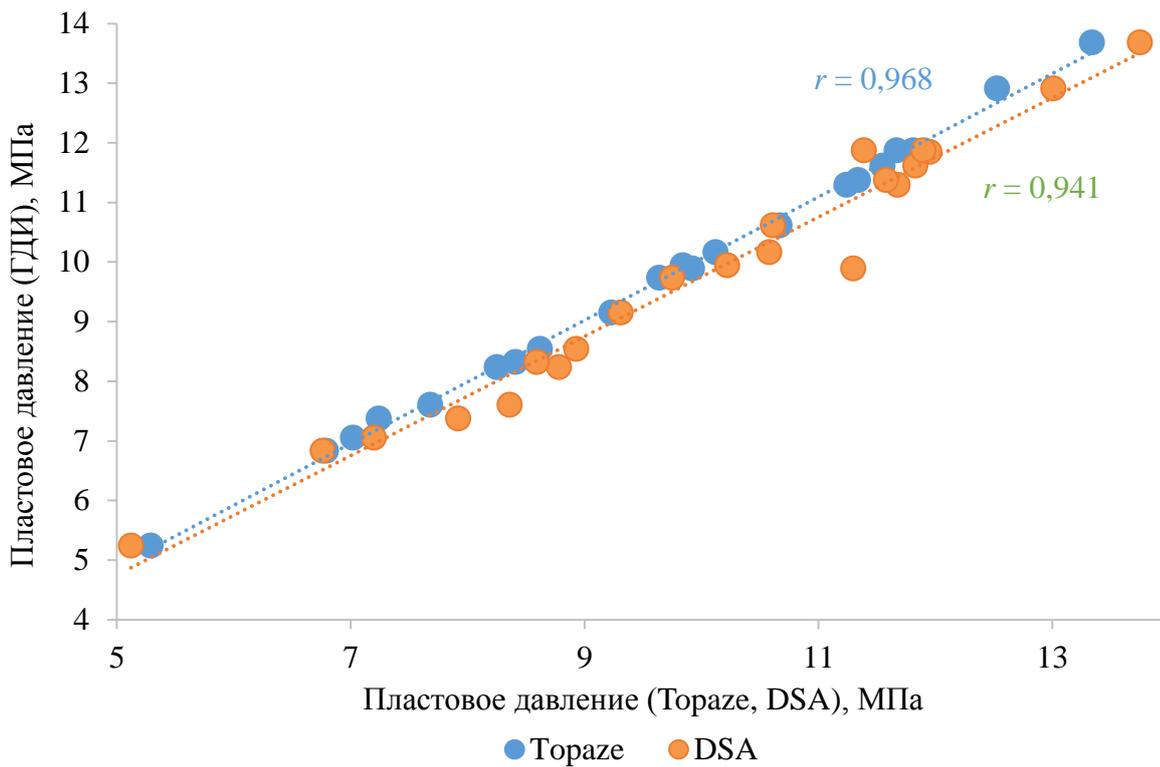


Рис. 4. Сопоставление рассчитанных и фактических пластовых давлений для условий Шершневского месторождения
Fig. 4. Comparison of calculated and actual reservoir pressures for the conditions of the Shershnevskoe field

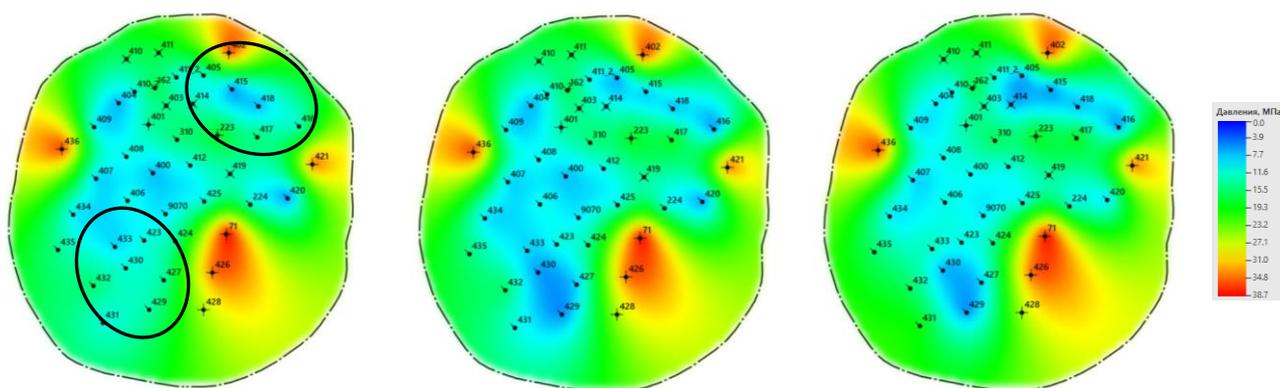
Очевидно, причиной высокой сходимости оценок энергетического состояния залежи Шершневского месторождения по данным всех методов является стопроцентный охват фонда гидродинамическими исследованиями, выполненными в течение одного календарного года. При этом следует учесть, что для проведения ГДИ каждая из скважин была остановлена, некоторые – на довольно продолжительный период времени, для восстановления давления. Остановки скважин сопровождаются недоборами и вероятными технико-технологическими проблемами с пуском после продолжительных ГДИ. Косвенные методы позволили получить такие же данные, но при этом они не требуют остановки скважин на исследование.

Аналогичные исследования выполнены также применительно к Гагаринскому месторождению. Карты изобар, построенные по фактическим (ГДИ) и косвенным (Topaze, DSA) определениям пластового давления, приведены на рис. 5. Карты также построены в специальном модуле автоматизированного сервиса DSA.

Сравнительный анализ карт изобар Гагаринского месторождения демонстрирует их некоторые различия. Так, в северо-восточной и юго-западной зонах залежи карта изобар, построенная по фактическим ГДИ, не обозначает участки с пониженными

пластовыми давлениями, что характерно для карт, построенных по косвенным методам. При этом следует отметить, что гидродинамические исследования скважин, расположенных в этих зонах, проведены со значительным отставанием от даты анализа. В целом фактические определения выполнены в период с 2014 по 2016 гг., что, очевидно, ставит под сомнение достоверность мониторинга энергетического состояния залежи на основе традиционного подхода к построению карт изобар. Возможность одномоментного воспроизведения пластового давления, характерная для рассматриваемых косвенных методов, демонстрирует свои очевидные преимущества в условиях объекта с нерегулярным проведением ГДИ.

Корреляционные поля, приведенные на рис. 6, сопоставляющие фактические и рассчитанные пластовые давления, свидетельствуют о невысокой сходимости пластовых давлений, по значениям которых построены карты изобар. При этом детальный анализ, выполненный по каждой скважине индивидуально (рис. 7), показывает высокую сходимость дискретных определений пластовых давлений. Таким образом, низкую тесноту анализируемых корреляционных связей следует объяснить разновременностью определения сопоставляемых давлений.



Гидродинамические исследования скважин
 Well tests

Topaze

DSA

Рис. 5. *Карты изобар, построенные для Гагаринского месторождения по данным реализации косвенных методов определения пластового давления и ГДИ*

Fig. 5. *Isobar maps built for the Gagarinskoe field based on the data from the implementation of indirect methods for determining reservoir pressure and well tests*

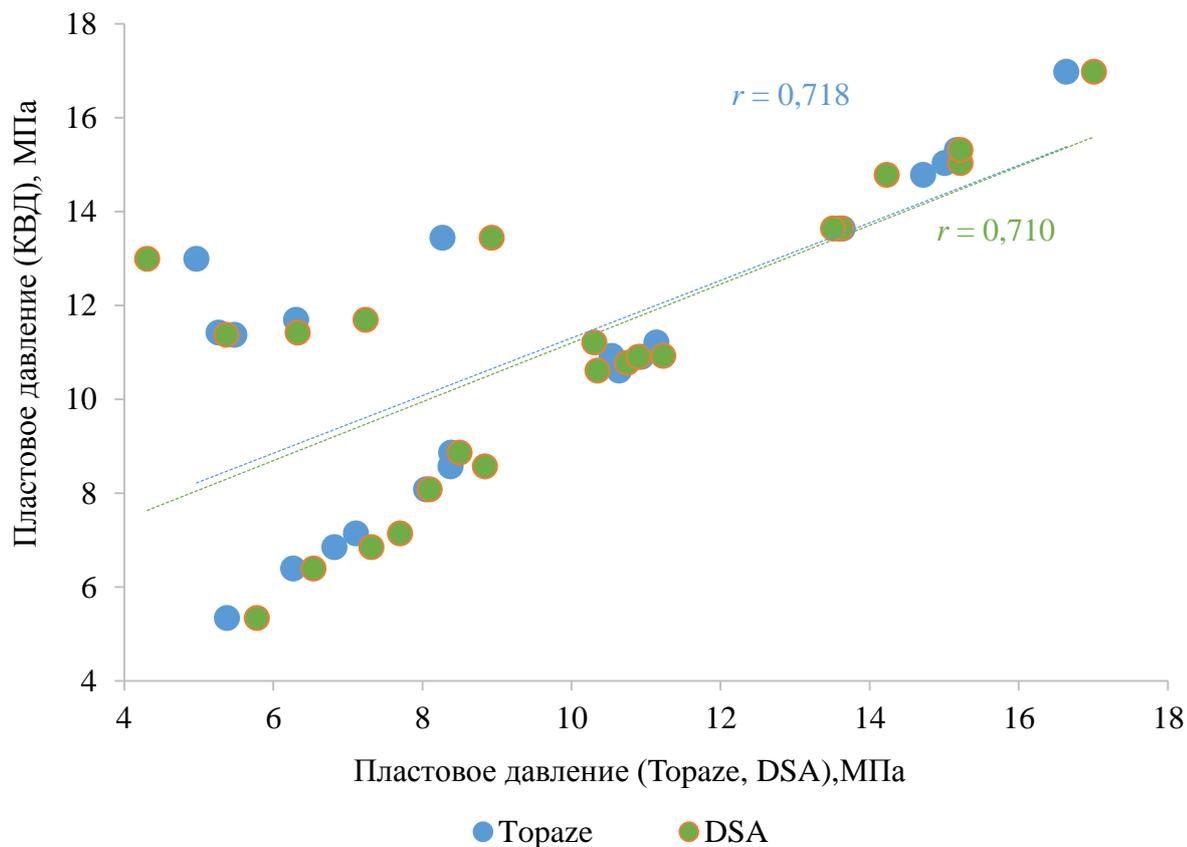


Рис. 6. *Сопоставление рассчитанных и фактических пластовых давлений для условий Гагаринского месторождения*

Fig. 6. *Comparison of calculated and actual reservoir pressures for the conditions of the Gagarinskoe field*

Динамика давлений скв. 407

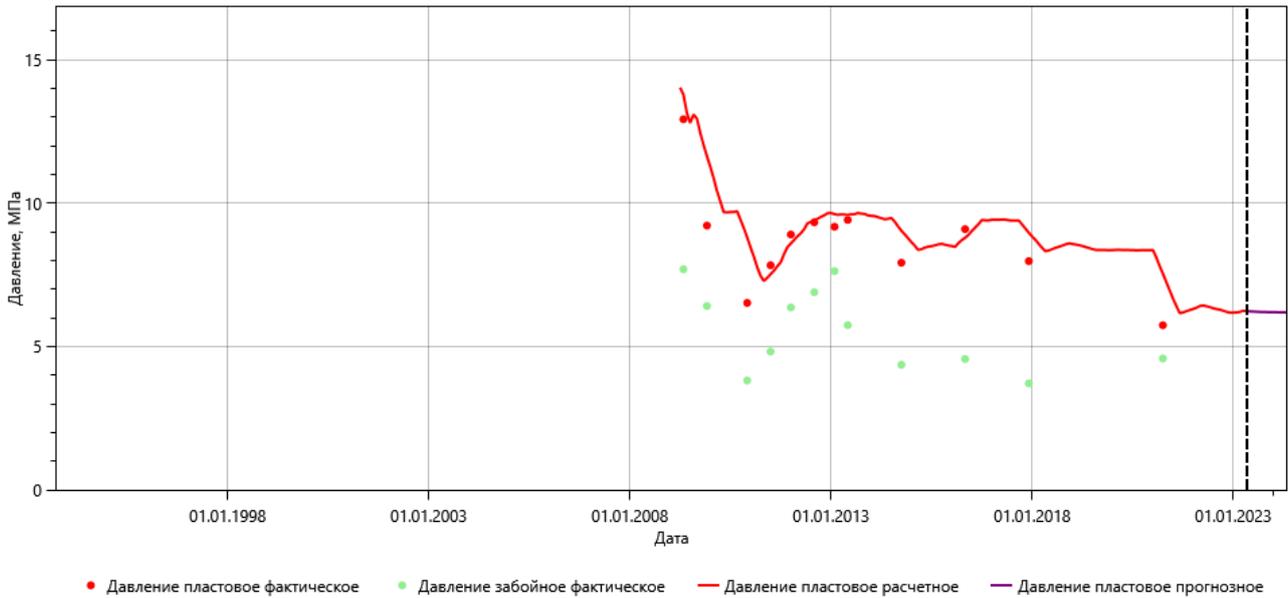


Рис. 7. Результаты определения пластового давления методами машинного обучения в DSA на примере скв. 407 Гагаринского месторождения

Fig. 7. Results of determining reservoir pressure using machine learning methods in DSA on the example of well 407 of the Gagarinskoe field

Заключение

Настоящая статья посвящена сравнительному анализу косвенных и непосредственного метода определения пластового давления с целью построения карт изобар для мониторинга энергетического состояния залежи. Непосредственным методом определения пластового давления являются гидродинамические исследования скважин при неустановившихся режимах. Среди многообразия косвенных методов принят метод, основанный на анализе исторических данных по добыче, реализованный в модуле Toraze (программное обеспечение Карра Workstation), а также метод, основанный на применении машинного обучения, реализованный в модульном сервисе Data Stream Analytics (DSA), который, в свою очередь, также позволяет в автоматизированном режиме осуществлять построение любых карт мониторинга разработки, в том числе изобар. Сравнительный анализ методов выполнен применительно к двум турнейско-фаменском карбонатным объектам разработки месторождений Пермского края (Шершневого и Гагаринского). Дата анализа выбрана для каждого месторождения индивидуально исходя из максимальной освещенности фонда гидродинамическими исследованиями с фактическими определениями пластового давления.

Определения пластового давления методами машинного обучения в сервисе DSA выполнены

для каждого месторождения в автоматизированном режиме, суммарная продолжительность вычислительных операций не превысила пяти минут, по истечению которых получена ретро- и перспективная оценка пластового давления по каждой из скважин месторождения. Трудоемкость аналогичных вычислений в Toraze несоизмеримо больше, так же как и требования к компетентности специалистов.

В ходе выполненных исследований получен вывод о том, что при стопроцентном охвате фонда гидродинамическими исследованиями, выполненными в течение непродолжительного периода времени, все три метода продемонстрировали схожие оценки текущего энергетического состояния залежи. Однако данное условие выполняется далеко не всегда. Так, на примере Гагаринского месторождения установлено, что одновременность фактических определений пластового давления приводит к искажению картины энергетического состояния залежи. То есть в случае отсутствия условно единовременного определения фактических пластовых давлений мониторинг энергетического состояния залежей целесообразно осуществлять с использованием достоверных косвенных методов (например, машинного обучения), реализованных в модульном сервисе Data Stream Analytics (DSA).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакиров А.А. Определение пластового давления аппаратурой АГИП-К по технологии многоциклового зондирования // Каротажник. – 2017. – № 3 (273). – С. 62–66.
2. Анализ результатов косвенного определения пластового давления по изменению режимов работы скважин с использованием генетического алгоритма / В.А. Грищенко, М.Н. Харисов, Р.Ф. Якупов, В.Ш. Мухаметшин, Т.Р. Вафин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 8 (356). – С. 36–41.
3. Pore-throat structure characteristics and its impact on the porosity and permeability relationship of Carboniferous carbonate reservoirs in eastern edge of Pre-Caspian Basin / Weiqiang Li, Longxin Mu, Lun Zhao, Jianxin Li, Shuqin Wang, Zifei Fan, Dali Shao, Changhai Li, Fachao Shan, Wenqi Zhao, Meng Sun // Petroleum Exploration and Development. – 2020. – Vol. 47. – Iss. 5. – P. 1027–1041. URL: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(20\)60114-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(20)60114-8) (дата обращения 25.06.2023).
4. A dynamic prediction model of reservoir pressure considering stress sensitivity and variable production / Peng Zong, Hao Xu, Dazhen Tang, Tiantian Zhao // Geoenergy Science and Engineering. – 2023. – Vol. 225. – Article 211688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211688> (дата обращения 25.06.2023).
5. Predicting pore-pressure from well-log data with hybrid machine-learning optimization algorithms / M. Farsi, N. Mohamadian, H. Ghorbani, D.A. Wood, S. Davoodi, J. Moghadasi, M.A. Alvar // Natural Resources Research. – 2021. – Vol. 30. – P. 3455–3481. URL: <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09852-2> (дата обращения 25.06.2023).
6. Characterization of pore pressure, fracturing pressure, shear failure and its implications for drilling, wellbore stability and completion design – a case study from the Takouazet field, Illizi basin, Algeria / R. Baouche, S. Sen, M. Sadaoui, K. Boutaleb, S.S. Ganguli // Marine Petroleum Geology. – 2020. – Vol. 120. – Article 104510. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104510> (дата обращения 25.06.2023).
7. Study on CO2 foam fracturing model and fracture propagation simulation / Ziyuan Cong, Yuwei Li, Yishan Pan, Bo Liu, Ying Shi, Jianguang Wei, Wei Li // Energy. – 2022. – Vol. 238. – P. 121778. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121778> (дата обращения 25.06.2023).
8. Construction of carbonate reservoir knowledge base and its application in fracture-cavity reservoir geological modeling / Wenlian Xiao, Yubin Yang, Min Li, Nong Li, Jingxi You, Jinzhou Zhao, Lingli Zheng, Keming Zhou, Jitian Ren, Yue Wang // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – Vol. 48. – Iss. 4. – P. 824–834. URL: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60069-1](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60069-1) (дата обращения 25.06.2023).
9. Abdelaal A., Elkatatny S., Abdulraheem A. Data-driven modeling approach for pore pressure gradient prediction while drilling from drilling parameters // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6. – P. 13807–13816. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01340> (дата обращения 25.06.2023).
10. Alabere A.O., Akangbe O.K. Pore pressure prediction in Niger delta high pressure, high temperature (hp/ht) domains using well logs and 3d seismic data: a case study of x-field, onshore Niger delta // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2021. – Vol. 11. – P. 3747–3758. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01264-5> (дата обращения 25.06.2023).
11. Pore pressure prediction in offshore Niger delta using data-driven approach: Implications on drilling and reservoir quality / J. Pwavodi, I.N. Kelechi, P. Angalabiri, Sh. Chioma Emeremgini, V.O. Oguadinma // Energy Geoscience. – 2023. – Vol. 4. – Iss. 3. – Article 100194. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2023.100194> (дата обращения 25.06.2023).
12. A new empirical model for enhancing well log permeability prediction, using nonlinear regression method: Case study from Hassi-Berkine oil field reservoir – Algeria / H.E. Belhouchet, M.S. Benzagouta, A. Dobby, A. Alquraishic, J. Duplay // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 33. – Iss. 2. – P. 136–145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.008> (дата обращения 25.06.2023).
13. Subhrajyoti Bhattacharyya, Aditya Vyas. Machine learning based rate decline prediction in unconventional reservoirs // Upstream Oil and Gas Technology. – 2022. – Vol. 8. – Article 100064. URL: <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2022.100064> (дата обращения 25.06.2023).
14. On the feasibility of using physics-informed machine learning for underground reservoir pressure management / D.R. Harp, D. O'Malley, B. Yan, R. Pawar // Expert Systems with Applications. – 2021. – Vol. 178. – Article 115006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115006> (дата обращения 25.06.2023).
15. Deep learning-accelerated 3D carbon storage reservoir pressure forecasting based on data assimilation using surface displacement from InSAR / H. Tang, P. Fu, H. Jo, S. Jiang, Ch.S. Sherman, F. Hamon, N.A. Azzolina, J.P. Morris // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2022. – Vol. 120. – Article 103765. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103765> (дата обращения 25.06.2023).
16. Косвенные способы оценки текущего пластового давления в скважине для использования при построении интегрированных моделей месторождений / Т.С. Ладейщикова, В.А. Волков, Н.Н. Собянин, А.В. Митрошин // Нефтепромысловое дело. – 2021. – № 7 (631). – С. 39–45.
17. Определение и прогноз пластового давления, продуктивности и фильтрационных параметров пласта без остановки скважин по результатам анализа истории добычи скважин в программном обеспечении КАРРА TOPAZE, оснащенных глубинными манометрами на приеме насоса и телеметрической системой, для месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / Е.А. Кузнецова, А.В. Шилов, С.Е. Никулин, И.А. Черных // Нефтепромысловое дело. – 2019. – № 12 (612). – С. 82–84.
18. Опыт применения аналитических методов определения пластового давления / Е.А. Кузнецова, С.Е. Никулин, А.В. Шилов, М.А. Филатов // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 6 (654). – С. 12–16. URL: [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-6\(654\)-12-16](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-6(654)-12-16) (дата обращения 25.06.2023).
19. Захаров Л.А., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Прогнозирование динамического пластового давления методами искусственного интеллекта // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 23–32. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11> (дата обращения 25.06.2023).
20. Reproduction of reservoir pressure by machine learning methods and study of its influence on the cracks formation process in hydraulic fracturing / E.V. Filippov, L.A. Zakharov, D.A. Martyushev, I.N. Ponomareva // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 258. – P. 924–932. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.103> (дата обращения 25.06.2023).

21. Ponomareva I.N., Martyushev D.A., Govindarajan S.K. A new approach to predict the formation pressure using multiple regression analysis: case study from Sukharev oil field reservoir – Russia // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. – 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.03.005> (дата обращения 25.06.2023).
22. Ponomareva I.N., Galkin V.I., Martyushev D.A. Operational method for determining bottom hole pressure in mechanized oil producing wells, based on the application of multivariate regression analysis // *Petroleum Research*. – 2021. – Vol. 6 (4). – P. 351–360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.05.010> (дата обращения 25.06.2023).
23. A dynamic prediction model of reservoir pressure considering stress sensitivity and variable production / P. Zong, H. Xu, D. Tang, T. Zhao // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 225. – Article 211688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211688> (дата обращения 25.06.2023).
24. On the feasibility of using physics-informed machine learning for underground reservoir pressure management / D.R. Harp, D. O'Malley, B. Yan, R. Pawar // *Expert Systems with Applications*. – 2021. – Vol. 178. – Article 115006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115006> (дата обращения 25.06.2023).
25. Pore pressure prediction in a carbonate reservoir: a case study from Potwar Plateau, Pakistan / M.Y. Khan, M. Awais, F. Hussain et al. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2022. – Vol. 12. – P. 3117–3135. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01511-3> (дата обращения 25.06.2023).

Информация об авторах

Лев Андреевич Захаров, начальник отдела развития проектов информационно-технологического сопровождения ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Россия, 614000, г. Пермь, ул. Пермская, 3а. izakharov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8680-3474>

Инна Николаевна Пономарева, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29. permpolitech@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0546-2506>

Дмитрий Александрович Мартюшев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29. martyushevdi@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5745-4375>

Поступила в редакцию: 11.07.2023

Поступила после рецензирования: 28.11.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Shakirov A.A. Determination of reservoir pressure by AGIP-K equipment using multi-cycle sounding technology. *Karotazhnik*, 2017, no. 3 (273), pp. 62–66. (In Russ.)
2. Grishchenko V.A., Kharisov M.N., Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh., Vafin T.R. Analysis of the results of indirect determination of reservoir pressure by changing the operating modes of wells using a genetic algorithm. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2021, no. 8 (356), pp. 36–41. (In Russ.)
3. Weiqiang Li, Longxin Mu, Lun Zhao, Jianxin Li, Shuqin Wang, Zifei Fan, Dali Shao, Changhai Li, Fachao Shan, Wenqi Zhao, Meng Sun. Pore-throat structure characteristics and its impact on the porosity and permeability relationship of Carboniferous carbonate reservoirs in eastern edge of Pre-Caspian Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, vol. 47, Iss. 5, pp. 1027–1041. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(20\)60114-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(20)60114-8) (accessed 25 June 2023).
4. Peng Zong, Hao Xu, Dazhen Tang, Tiantian Zhao. A dynamic prediction model of reservoir pressure considering stress sensitivity and variable production. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 225, Article 211688. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211688> (accessed 25 June 2023).
5. Farsi M., Mohamadian N., Ghorbani H., Wood D.A., Davoodi S., Moghadasi J., Alvar M.A. Predicting formation pore-pressure from well-log data with hybrid machine-learning optimization algorithms. *Natural Resources Research*, 2021, vol. 30, pp. 3455–3481. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09852-2> (accessed 25 June 2023).
6. Baouche R., Sen S., Sadaoui M., Boutaleb K., Ganguli S.S. Characterization of pore pressure, fracturing pressure, shear failure and its implications for drilling, wellbore stability and completion design – a case study from the Takouazet field, Illizi basin, Algeria. *Marine Petroleum Geology*, 2020, vol. 120, Article 104510. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104510> (accessed 25 June 2023).
7. Ziyuan Cong, Yuwei Li, Yishan Pan, Bo Liu, Ying Shi, Jianguang Wei, Wei Li. Study on CO2 foam fracturing model and fracture propagation simulation. *Energy*, 2022, vol. 238, pp. 121778. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121778> (accessed 25 June 2023).
8. Wenlian Xiao, Yubin Yang, Min Li, Nong Li, Jingxi You, Jinzhou Zhao, Lingli Zheng, Keming Zhou, Jitian Ren, Yue Wang. Construction of carbonate reservoir knowledge base and its application in fracture-cavity reservoir geological modeling. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, vol. 48, Iss. 4, pp. 824–834. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60069-1](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60069-1) (accessed 25 June 2023).
9. Abdelaal A., Elkhatatny S., Abdulraheem A. Data-driven modeling approach for pore pressure gradient prediction while drilling from drilling parameters. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 13807–13816. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01340> (accessed 25 June 2023).
10. Alabere A.O., Akangbe O.K. Pore pressure prediction in Niger delta high pressure, high temperature (hp/ht) domains using well logs and 3d seismic data: a case study of x-field, onshore Niger delta. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, vol. 11, pp. 3747–3758. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01264-5> (accessed 25 June 2023).

11. Pwavodi J., Kelechi I.N., Angalabiri P., Chioma Emeremgini Sh., Oguadinma V.O. Pore pressure prediction in offshore Niger delta using data-driven approach: Implications on drilling and reservoir quality. *Energy Geoscience*, 2023, vol. 4, Iss. 3, Article 100194. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2023.100194> (accessed 25 June 2023).
12. Belhouchet H.E., Benzagouta M.S., Dobbi A., Alquraishic A., Duplay J. A new empirical model for enhancing well log permeability prediction, using nonlinear regression method: Case study from Hassi-Berkine oil field reservoir – Algeria. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2021, vol. 33, Iss. 2, pp. 136–145. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.008> (accessed 25 June 2023).
13. Subhrajyoti Bhattacharyya, Aditya Vyas. Machine learning based rate decline prediction in unconventional reservoirs. *Upstream Oil and Gas Technology*, 2022, vol. 8, Article 100064. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2022.100064> (accessed 25 June 2023).
14. Harp D.R., O'Malley D., Yan B., Pawar R. On the feasibility of using physics-informed machine learning for underground reservoir pressure management. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 178, Article 115006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115006> (accessed 25 June 2023).
15. Tang H., Fu P., Jo H., Jiang S. Sherman Ch.S., Hamon F., Azzolina N.A., Morris J.P. Deep learning-accelerated 3D carbon storage reservoir pressure forecasting based on data assimilation using surface displacement from InSAR. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, vol. 120, Article 103765. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103765> (accessed 25 June 2023).
16. Ladeyshchikova T.S., Volkov V.A., Sobyenin N.N., Mitroshin A.V. Indirect methods for assessing the current reservoir pressure in a well for use in building integrated field models. *Neftepromyslovoe delo*, 2021, no. 7 (631), pp. 39–45. (In Russ.)
17. Kuznetsova E.A., Shilov A.V., Nikulin S.E., Chernykh I.A. Determination and forecast of reservoir pressure, productivity and filtration parameters of the formation without shutting down wells based on the results of the analysis of the history of well production in the KAPPA TOPAZE software, equipped with depth gauges at the pump intake and a telemetry system, for the fields of LLC LUKOIL-PERM. *Neftepromyslovoe delo*, 2019, no. 12 (612), pp. 82–84. (In Russ.)
18. Kuznetsova E.A., Nikulin S.E., Shilov A.V., Filatov M.A. Experience in the application of analytical methods for determining reservoir pressure. *Neftepromyslovoe delo*, 2023, no. 6 (654), pp. 12–16. (In Russ.) Available at: [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-6\(654\)-12-16](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-6(654)-12-16) (accessed 25 June 2023).
19. Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 23–32. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11> (accessed 25 June 2023).
20. Filippov E.V., Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Reproduction of reservoir pressure by machine learning methods and study of its influence on the cracks formation process in hydraulic fracturing. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 924–932. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.103> (accessed 25 June 2023).
21. Ponomareva I.N., Martyushev D.A., Govindarajan S.K. A new approach to predict the formation pressure using multiple regression analysis: case study from Sukharev oil field reservoir – Russia. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.03.005> (accessed 25 June 2023).
22. Ponomareva I.N., Galkin V.I., Martyushev D.A. Operational method for determining bottom hole pressure in mechanized oil producing wells, based on the application of multivariate regression analysis. *Petroleum Research*, 2021, vol. 6 (4), pp. 351–360. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.05.010> (accessed 25 June 2023).
23. Zong P., Xu H., Tang D., Zhao T. A dynamic prediction model of reservoir pressure considering stress sensitivity and variable production. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 225, Article 211688. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211688> (accessed 25 June 2023).
24. Harp D.R., O'Malley D., Yan B., Pawar R. On the feasibility of using physics-informed machine learning for underground reservoir pressure management. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 178, Article 115006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115006> (accessed 25 June 2023).
25. Khan M.Y., Awais M., Hussain F. Pore pressure prediction in a carbonate reservoir: a case study from Potwar Plateau, Pakistan. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2022, vol. 12, pp. 3117–3135. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01511-3> (accessed 25 June 2023).

Information about the authors

Lev A. Zakharov, Head of the Department for the Development of Information Technology Support Projects, LLC "LUKOIL-Engineering", 3a, Permskaya street, Perm, 614000, Russian Federation. lzakharov-ng@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8680-3474>

Inna N. Ponomareva, Dr. Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. permpolitech@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0546-2506>

Dmitriy A. Martyushev, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. martyushevdi@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5745-4375>

Received: 11.07.2023

Revised: 28.11.2023

Accepted: 19.04.2024

УДК 504.064.2.001.18
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4338
Шифр специальности ВАК: 25.00.36

Оценка экологической опасности золоторудного месторождения Улюк-Бар (Южный Урал)

Г.М. Казбулатова[✉], С.В. Мичурин

Уфимский Федеральный исследовательский центр РАН, Россия, г. Уфа

[✉]kazbulatova@mail.ru

Аннотация. Актуальность. В связи с превышением предельно допустимых концентраций тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных водах Авзянского золоторудного района определяются возможные источники токсичных элементов, что актуально для борьбы с загрязнением в рудных районах. **Цель:** оценка экологической опасности золоторудного месторождения Улюк-Бар на основе данных химического и минералогического состава вмещающих горных пород и подвижности в них токсичных элементов. **Материалы и методы.** Химический состав пород определен рентгенофлуоресцентным и атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой методами, а также с использованием методов классической аналитической химии. Минералогический состав пород определен рентгенофазовым анализом, состав минералов и содержание в них элементов-примесей – сканирующей электронной микроскопией. Предварительная оценка экологического состояния месторождения осуществлена по показателю потенциальной токсичности элементов и показателю потенциальной экологической опасности минералов. Прогноз состава дренажных вод и подвижности элементов был проведен с использованием пероксидного эксперимента и данных атомно-абсорбционного анализа, конечных кислотно-щелочных условий – путем расчета кислотнейтрализующего и кислотопродуцирующего потенциалов. **Результаты и обсуждение.** Выявлены высокие и очень высокие показатели потенциальной токсичности и опасности. Главную потенциальную опасность представляют мышьяк, хром, кобальт, никель, медь, палладий, сурьма и др. Установлена высокая подвижность магния, кальция, хрома, сурьмы, рубидия, бария, стронция и серы, многие из которых представляют реальную экологическую опасность. Кремний, алюминий, титан, натрий, калий, железо, марганец, фосфор, медь, цинк, никель, мышьяк, лантан, церий, иттрий, ванадий, кобальт, ниобий, цирконий и молибден в породах являются неподвижными или малоподвижными. Сульфиды принимают основное участие в загрязнении токсичными элементами. Породы месторождения характеризуются высоким кислотнейтрализующим потенциалом. Среда дренажных вод определяется как нейтрально-щелочная. **Заключение.** Месторождение Улюк-Бар обладает высокой потенциальной опасностью, которая обусловлена в первую очередь минералогическими и геохимическими особенностями руд и вмещающих их горных пород. Сульфиды представляют основную угрозу в связи с содержанием в них большого количества токсичных металлов и металлоидов. Вместе с тем в неизмененных гипергенными процессами породах месторождения содержится значительное количество карбонатных минералов, что обуславливает высокие кислотнейтрализующие и низкие кислотопродуцирующие свойства пород, препятствующие быстрому растворению сульфидных минералов. Проведенное исследование объединяет информацию для выявления экологических проблем, связанных с геолого-геохимическими особенностями месторождения и облегчает выбор подходящей комбинации методов для минимизации экологических рисков и воздействий.

Ключевые слова: Авзянский золоторудный район, месторождения золота, окружающая среда, токсичные элементы, сульфиды, карбонаты

Благодарности: Исследования выполнены по теме № FMRS-2022-0015 госзадания ИГ УФИЦ РАН.

Для цитирования: Казбулатова Г.М., Мичурин С.В. Оценка экологической опасности золоторудного месторождения Улюк-Бар (Южный Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 35. – № 5. – С. 142–157. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4338

UDC 504.064.2.001.18

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4338

Environmental hazard assessment of the Ulyuk-Bar gold deposit (Southern Urals)

G.M. Kazbulatova[✉], S.V. Michurin

Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

[✉]kazbulatova@mail.ru

Abstract. Relevance. Due to the maximum allowable concentrations of heavy metals and metalloids exceeding in the surface waters of the Avzyan gold region, possible sources of toxic elements are determined, which is important for combating pollution in ore areas. **Aim.** To assess the environmental hazard of the Ulyuk-Bar gold deposit based on the chemical and mineralogical composition of the enclosing rocks and the mobility of toxic elements in them. **Materials and methods.** The chemical composition of rocks was determined by X-ray fluorescence and atomic emission with inductive plasma methods, as well as using methods of classical analytical chemistry. The mineralogical composition of rocks is determined by X-ray phase analysis, the composition of minerals and the content of elements-impurities in them – by scanning electron microscopy. Preliminary assessment of the ecological condition of the deposit was carried out according to the indicator of the potential toxicity of elements and the indicator of the potential environmental hazard of minerals. The forecast of drainage water composition and mobility of elements was carried out using peroxide experiment and atomic absorption analysis data, final acid-alkali conditions – by calculating acid neutralizing and acid producing potentials. **Results and discussion.** High and very high indicators of potential toxicity and hazard were identified. The main potential hazard is arsenic, chromium, cobalt, nickel, copper, palladium, antimony etc. The high mobility of magnesium, calcium, chromium, antimony, rubidium, barium, strontium, sulfur was established. Many of them represent a real environmental hazard. Silicon, aluminum, titanium, sodium, potassium, iron, manganese, phosphorus, copper, zinc, nickel, arsenic, lanthanum, cerium, yttrium, vanadium, cobalt, niobium, zirconium and molybdenum in rocks are immobile or low mobile. Sulfides are mainly involved in contamination with toxic elements. The rocks of the deposit are characterized by a high acid neutralizing potential. The drainage water conditions are defined as neutral-alkaline. **Conclusion.** The Ulyuk-Bar deposit has a high potential hazard, which is primarily due to the mineralogical and geochemical features of the ores and the enclosing rocks. Sulfides are the main threat due to the content of large amounts of toxic metals and metalloids in them. At the same time, the rocks of the deposit, unchanged by hypergenic processes, contain a significant amount of carbonate minerals, which causes high acid neutralizing and low acid producing properties of rocks that prevent the rapid dissolution of sulfide minerals. The conducted research combines information to identify environmental problems related to the geological and geochemical features of the deposit and facilitates the selection of a suitable combination of methods to minimize environmental risks and impacts.

Keywords: Avzyan gold region, gold deposits, environment, toxic elements, sulfides, carbonates

Acknowledgements: The research was carried out on the theme of the state task no. FMRS-2022-0015 of the IG UFRC RAS.

For citation: Kazbulatova G.M., Michurin S.V. Environmental hazard assessment of the Ulyuk-Bar gold deposit (Southern Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 142–157. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4338

Введение

Рудные месторождения представляют собой природные геохимические аномалии, являющиеся потенциальными и реальными источниками опасных для окружающей среды элементов. Экологические проблемы, связанные с выносом из горных пород токсикантов в рудных районах в результате природных факторов (процессов выветривания) или антропогенного воздействия, имеют глобальное значение. Для изучения потенциального экологического риска от тяжелых металлов и металлоидов в последнее время проводятся исследования по всему миру. В рудных районах пристальное внима-

ние уделяется поведению элементов в системах горные породы–почвы, подземные–поверхностные воды [1–4]. Результаты исследований часто указывают на исходные природные источники загрязнений и естественное обогащение почв, подземных и поверхностных вод потенциально токсичными элементами. Обогащение почв связывают с выносом As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn из горных пород вместе с подвижными элементами и их адсорбцией гидроксидами Fe, Mn или образованием металлоорганических соединений при высоких значениях pH в процессе почвообразования [5]. В золоторудных месторождениях источником этих тяжелых

металлов в первую очередь являются сульфиды и сульфоарсениды, а также окорудные жильные карбонаты [6]. В результате процессов растворения и выщелачивания из этих минералов может происходить вынос экологически опасных микроэлементов (например, As, Cd, Mn). Такие исследования создают основу для устранения или предотвращения загрязнения.

Существует много способов для мониторинга экологических обстановок и, как следствие, проведения природоохранных мероприятий. Один из них – определение потенциальной опасности месторождения на основе коэффициентов литотоксичности элементов. Такой подход широко используется как зарубежными, так и отечественными авторами [7–12]. При этом не только оценивается валовое содержание токсикантов, изучается также их подвижность в тех или иных условиях [13–18].

В Авзянском золоторудном районе (АЗР), расположенном в Белорецком районе Республики Башкортостан, находится целый ряд месторождений и рудопроявлений коренного и россыпного

золота (Кургашлинское, Улюк-Бар, Рамеева жила, Богряшка, Калашникова жила, Горный Прииск, Карасмаякское, Надеждинское, Большой Ключ, Богряшка, Рыжова Поляна, Каменный ключ, Авзянское) (рис. 1). Наиболее известными из них являются месторождения Улюк-Бар, Горный Прииск, рудопроявление Рамеева жила, которые с перерывами разрабатывались с конца XIX в. Исследования экологической ситуации в АЗР до сих пор не проводилось. Нами [19] впервые установлены превышающие ПДК концентрации тяжелых металлов и металлоидов (Mn, Fe, Al, Sb, W, V, Cu, As) в поверхностных водах АЗР. Показано, что население близлежащих сел подвергается экологическим рискам от химического загрязнения поверхностных вод в результате, преимущественно, природных (геогенных) факторов. В связи с этим целью данного исследования является изучение химического и минералогического состава горных пород и подвижности в них токсичных металлов и металлоидов, чтобы выявить источники опасных элементов.

Рис. 1. Геологическая карта южной части Ямантауского антиклинория (по [20] с небольшими изменениями и дополнениями) и положение месторождений и рудопроявлений золота (по [19]): 1–12 – отложения нижнего рифея, свиты: 1–2 – большеинзерская, подсвиты: 1 – средняя, 2 – верхняя; 3–5 – суранская, подсвиты: 3 – миньякская, 4 – бердагуловская, 5 – ангастакская; 6–8 – юшинская, подсвиты: 6 – вязовская, 7 – багарыштинская, 8 – сухинская; 9 – саткинская; 10 – бакальская; 11–24 – отложения среднего рифея, свиты: 11–14 – машакская, подсвиты: 11 – кузельгинская, 12 – казавдинская, 13 – быковская, 14 – малошатакская (верхняя); 15 – зигальгинская; 16–18 – зигазино-комаровская, подсвиты: 16 – серегинская, 17 – амбарская, 18 – туканская; 19–23 – авзянская, подсвиты: 19 – катаскинская, 20 – малоинзерская, 21 – ушаковская, 22 – куткурская, 23 – реветская; 24 – кужинская, нижняя подсвита; 25, 26 – отложения верхнего рифея, свиты: 25, 26 – зильмердакская, подсвиты: 25 – инзерская; 26 – миньярская; 27 – четвертичные отложения; 28 – границы свит; 29 – дайки магматических пород; 30 – тектонические нарушения разного порядка; 31 – реки и ручьи; 32 – населенные пункты; 33 – месторождения и рудопроявления коренного золота (1 – Кургашлинское, 2 – Улюк-Бар, 3 – Рамеева жила, 4 – Богряшка; 5 – Калашникова жила; 6 – Горный Прииск); 34 – месторождения россыпного золота (I – Карасмаякское, II – Кургашлинское, III – Надеждинское, IV – Большой Ключ, V – Богряшка, VI – Рыжова Поляна, VII – Каменный ключ, VIII – Авзянское)

Fig. 1. Geological map of the southern part of the Yamantau anticlinorium (according to [20] with minor changes and additions) and the position of deposits and ore occurrences of gold (according to [19]): 1–12 – deposits of the Lower Riphean, formations: 1–2 – Bolsheinzer, subformations: 1 – middle, 2 – upper; 3–5 – Suran, subformations: 3 – Minyak, 4 – Berdagul, 5 – Angastak; 6–8 – Yusha, subformations: 6 – Vyazov, 7 – Bagaryshka, 8 – Sukhin; 9 – Satka; 10 – Bakal; 11–24 – deposits of the Middle Riphean, formations: 11–14 – Mashak, subformations: 11 – Kuzelga, 12 – Kazavda, 13 – Vykov, 14 – Maloshatak (upper); 15 – Zigalga; 16–18 – Zigazino-Komarovo, subformations: 16 – Seregin, 17 – Ambar, 18 – Tukan; 19–23 – Avzyan, subformations: 19 – Kataskin, 20 – Maloinzer, 21 – Ushak, 22 – Kutkur, 23 – Revet; 24 – Kuzhin, lower subformation; 25, 26 – deposits of the Upper Riphean, formations: 25, 26 – Zilmerdak, subformations: 25 – Inzer; 26 – Minyar; 27 – quaternary deposits; 28 – boundaries of formations; 29 – dikes of igneous rocks; 30 – different order tectonic dislocations; 31 – rivers and streams; 32 – settlements; 33 – deposits and ore occurrences of indigenous gold (1 – Kurgashlya, 2 – Ulyuk-Bar, 3 – Rameev Vein, 4 – Bogryashka; 5 – Kalashnikov Vein; 6 – Gorny Priisk); 34 – placer gold deposits (I – Karasmayak, II – Kurgashlya, III – Nadezhdinsk, IV – Bolshoy Klyuch, V – Bogryashka, VI – Ryzhova Polyana, VII – Kamenny Klyuch, VIII – Avzyan)

Объект и материалы для исследования

Объектом исследования выбрано малосульфидное золотокварцевое месторождение Улюк-Бар, которое разрабатывается в настоящее время. Месторождение локализовано в песчаниках, алевролитах и сланцах большеинзерской свиты нижнего рифея [21, 22]. Рудная зона приурочена к запорокинутому на восток под углом 80–85° западному крылу Айгирской антиклинали. Золотосодержащая минерализация представлена кварцем, жильными карбонатными минералами (кальцит, доломит, анкерит), сульфидами (мышьяковистый пирит, пирротин, халькопирит, галенит) и сульфоарсенидами (арсенопирит и герсдорфит). Месторождение сопровождается первичными и вторичными геохимическими ореолами. Золото обнаруживает положительную корреляцию со многими тяжелыми металлами и металлоидами (As, Cu, Pb, Zn, Ni, Co), которые потенциально могут представлять экологическую угрозу.

Изучение проведено по керновым пробам вмещающих горных пород месторождения, отобранным из 6 скважин, пробуренных в 2003–2019 гг. Неизменные гипергенными процессами породы ($n=38$) взяты с глубины 70–250 м, из коры выветривания ($n=65$) – 5–85 м. Породы в пределах рудной зоны имеют практически субвертикальное падение, и гипергенные процессы проходили по тем же песчаникам, алевролитам и сланцам, развитым на глубоких горизонтах. По материалам ГУП «Башгеолцентр» РБ в коре выветривания месторождения Улюк-Бар преобладают зоны начальной гидратации и выщелачивания, в которых развиты хрупкие, легко крошащиеся трещиноватые породы, сохранившие свою исходную структуру и существенно не изменившие минеральный состав. Зоны конечного выщелачивания и полного гидролиза и окисления развиты локально в приповерхностной части.

Методы исследования

Определение содержания петрогенных и редких элементов в породах проведено рентгенофлуоресцентным анализом (РФА) и спектральным атомно-эмиссионным анализом с индуктивно-связанной плазмой (метод ИСП-АЭС) на энергодисперсионном спектрометре X-Calibur (Xenometrix, Израиль) и на спектрометре ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) (аналитик З.Р. Биктимерова), соответственно. Рентгенофазовый анализ для установления минералогического состава пород выполнен на дифрактометре ДРОН-4 (Россия).

Для качественной оценки и определения подвижности элементов, способных перейти в дренажные воды при окислении минералов горных пород, истертые пробы обрабатывались перекисью водорода с последующим измерением состава полученных растворов атомно-абсорбционным ана-

лизом (ААС) на спектрометре Persee A3 (PG Instrument, Китай). As и Sb определены с использованием гидридной приставки WHG-630 A (Китай). Подвижность (в отн. %) оценивалась как доля химического элемента, переходящего в пероксидную вытяжку, от его валового содержания в породе. Методика проведения эксперимента включала обработку ~2 г порошка горной породы 15 % раствором перекиси водорода ($pH=7$) и выдерживание смеси в течение двух суток. Предварительно перекись выпаривалась при 70 °С. Раствор фильтровался и переводился в колбу на 200 мл, в нем измерялись pH, Eh, а также содержания тяжелых металлов и металлоидов (Cr, Cu, Mn, Pb, Zn, Sb, As). Перед экспериментом и после его проведения, соответственно, в исходных и обработанных пробах содержания петрогенных и редких элементов определялись методом РФА.

Изучение химического состава минералов и содержания в них элементов-примесей проведено на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 4 Compact (TESCAN Brno s.r.o., Чехия) с энерго-дисперсионным анализатором Xplorer15 (Oxford Instruments, Великобритания) (аналитик С.С. Ковалев). Изучено 8 образцов, 4 из которых представляют собой неизменные гипергенными процессами породы, 4 – породы коры выветривания. Для анализа из образцов готовились полированные пластины размером 3×3×0,5 см.

Предварительная оценка экологического состояния месторождения осуществлена по показателю потенциальной токсичности (ГЭр) [10, 11], основанному на степени токсичности химических элементов и их содержании в породах:

$$\text{ГЭр} = \sum_{i=1}^n (\text{Тл} \cdot \text{Кк})_1 + \dots + (\text{Тл} \cdot \text{Кк})_n,$$

где Кк – отношение концентрации элемента в породах месторождения к его кларку для верхней континентальной коры по [23]; n – число элементов-токсикантов в месторождении; Тл – коэффициенты литотоксичности элементов, которые сгруппированы по нескольким классам, в зависимости от токсичности по [10].

С учетом устойчивости минералов рассчитаны их показатели потенциальной экологической опасности (ГЭм) по [24]:

$$\text{ГЭм} = \left(\frac{1}{Y}\right) \cdot \sum_{i=1}^n (\text{Тл} \cdot \frac{X}{Q})_1 + \dots + (\text{Тл} \cdot \frac{X}{Q})_n,$$

где $Y = C_0/C_1$ – устойчивость минерала; C_0 – содержание минерала в коре выветривания; C_1 – содержание минерала в неизменных породах; Тл – коэффициент литотоксичности элементов, входящих в минерал; X – содержание токсичного элемента в минерале; Q – кларк элемента для верхней континентальной коры по [23]; n – число потенциально токсичных элементов.

Предварительная оценка кислотно-щелочных условий дренажных вод проведена с помощью определения кислотопродуцирующего (КПП) и кислотонейтрализующего (КНП) потенциалов [14, 25–27]. Формулы для их расчета имеют следующий вид:

$$\text{КПП} = 10 \cdot C_S \cdot \left(\frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_S} \right) = 10 \cdot C_S \cdot \left(\frac{100}{32} \right) = C_S \cdot 31,25,$$

$$\text{КНП} = 10 \cdot C_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot \left(\frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_3^{2-}}} \right) = 10 \cdot C_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot \left(\frac{100}{60} \right) = C_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot 16,7,$$

где 10 – коэффициент пересчета кг/т в мас. %; $C_{\text{CO}_3^{2-}}$ и C_S – содержание карбонатов и сульфидной серы в горной породе, мас. %; M_{CaCO_3} , $M_{\text{CO}_3^{2-}}$ и M_S – молярные массы карбоната кальция, кислотного остатка угольной кислоты и сульфидной серы, соответственно.

Конечная кислотность дренажных вод определена как фактический кислотонейтрализующий потенциал (ФНП) или кислотопродуцирующий потенциал (ФКП) [15, 28]:

$$\text{ФНП} = \text{КНП} - \text{КПП} \text{ или } \text{ФКП} = \text{КПП} - \text{КНП}.$$

Концентрация сульфидной серы в породах определена как разница между содержанием в них общей и сульфатной серы. $S_{\text{общ}}$ измерена рентгенофлуоресцентным анализом, $S_{\text{сульфат}}$ – гравиметрическим методом, основанным на измерении массы осадка сульфата бария, образованного при взаимодействии сульфат-ионов с хлоридом бария. Количество карбонатов в породах рассчитано по содержанию диоксида углерода, измеренного титриметрическим методом.

Результаты исследования

Химический состав пород из коры выветривания месторождения Улюк-Бар представлен в табл. 1. Породы в сравнении с верхней континентальной корой характеризуются низкими содержаниями Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P, Li, Sc, V, Zn, Sr, Ba, La, Ce, Pb с коэффициентами концентрации (Кк) от 0,04 до 0,96 и повышенными концентрациями Si, Cr, Co, Ni, Cu, Zr с Кк от 1,06 до 1,57. Самый высокий коэффициент концентрации имеет As (Кк=309).

Химический состав неизменных пород месторождения представлен в табл. 2. Породы по сравнению с верхней континентальной корой характеризуется низкими содержаниями Si, Ti, Al, Fe, Na, K, P, Be, V, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, Ba, La, Ce, U с Кк=0,25...0,96, повышенными концентрациями Mn, Mg, Ca, Sc, Cr, Ta, Pb (Кк=1,07...1,87) и высокими содержаниями Li, Co, Ni, Cu, Pd, Sb и Th с Кк от 2,15 до 8,56. Самый высокий коэффициент концентрации, так же как и в породах из коры выветривания, имеет As (Кк=95).

Минералогический состав пород и показатель потенциальной экологической опасности минера-

лов (ГЭМ) представлены в табл. 3. Неизменные гипергенными процессами породы и породы коры выветривания состоят из кварца, карбоната (кальцит, доломит, анкерит), полевого шпата (альбит), слюд (мусковит, биотит), каолинита и хлорита.

Таблица 1. Химический состав пород из коры выветривания месторождения Улюк-Бар, коэффициенты концентрации, показатели литотоксичности и потенциальной токсичности элементов

Table 1. Chemical composition of rocks from the weathering crust of the Ulyuk-Bar deposit, coefficients of concentration, indicators of lithotoxicity and potential toxicity of elements

Оксиды, сера, микроэлементы Oxides, sulfur, trace elements	Содержания оксидов, серы (мас. %) и микроэлементов (г/т) Content of oxides, sulfur (wt %) and trace elements (g/t) (n=65)			Кларк Clark	Кк Cc	Тл Tl	ГЭр _i GEr _i
	Мин Min	Макс Max	Ср. Av.				
SiO ₂	62,84	95,06	82,82	66	1,25	1	1,25
TiO ₂	0,16	0,75	0,38	0,5	0,76	1	0,76
Al ₂ O ₃	3,17	17,00	7,78	15,2	0,51	5	2,56
FeO _{общ}	0,80	4,02	1,41	4,5	0,31	1	0,31
MnO	0,002	0,36	0,05	0,077	0,63	5	3,14
MgO	0,23	3,30	0,89	2,2	0,41	1	0,41
CaO	0,20	4,71	0,62	4,2	0,15	1	0,15
Na ₂ O	0,06	1,40	0,46	3,9	0,12	1	0,12
K ₂ O	0,57	4,50	1,66	3,4	0,49	1	0,49
P ₂ O ₅	0,05	0,18	0,09	0,2	0,43	5	2,14
S _{общ}	0,02	0,06	0,03	-	-	-	-
Li	<1,00	51,91	13,59	20	0,68	5	3,40
Sc	2,07	18,53	5,78	11	0,53	5	2,63
V	19,51	109,50	43,23	60	0,72	10	7,20
Cr	24,274	195,64	54,86	35	1,57	10	15,67
Co	7,05	26,67	13,02	10	1,30	10	13,02
Ni	19,61	67,24	31,35	20	1,57	10	15,67
Cu	14,01	65,31	29,52	25	1,18	5	5,90
Zn	12,10	128,60	33,33	71	0,47	5	2,35
As	<5,00	3053,77	463,50	1,5	309,00	10	3090,03
Sr	0,25	62,00	14,71	350	0,04	5	0,21
Y	10,48	29,60	17,69	-	-	-	-
Zr	91,38	868,39	201,68	190	1,06	1	1,06
Ba	94,38	795,36	254,52	550	0,46	5	2,31
La	11,02	65,44	28,27	30	0,94	1	0,94
Ce	54,81	18,78	112,16	64	0,86	-	-
Pb	9,16	76,35	19,17	20	0,96	10	9,59
ΣГЭр _i				3181,31			

Примечание. Здесь и в табл. 2: n – количество проб, про черк – нет значений. Мин, Макс, Ср. – соответственно минимальные, максимальные и средние содержания оксидов, общей серы и микроэлементов; Кк – отношение концентрации элемента в породах к его кларку для верхней континентальной коры по [23]; Тл – коэффициент литотоксичности; ГЭр_i – показатель потенциальной токсичности элемента.

Note. Here and in Table 2: n – number of samples, dash – no values. Min, Max, Av. – respectively minimum, maximum and average contents of oxides, sulfur and trace elements; Cc – ratio of the concentration of an element in rocks to its clark for the upper continental crust according to [23]; Tl – lithotoxicity coefficient; GEr_i – indicator of an element potential toxicity.

Таблица 2. Химический состав неизменных гипергенными процессами пород месторождения Улюк-Бар, коэффициенты концентрации, показатели литотоксичности и потенциальной токсичности элементов

Table 2. Chemical composition of rocks unchanged by hypergenic processes of the Ulyuk-Bar deposit, concentration coefficients, indicators of lithotoxicity and potential toxicity of elements

Оксиды, сера, микроэлементы Oxides, sulfur, trace elements	Содержания оксидов, серы (мас. %) и микроэлементов (г/т) Content of oxides, sulfur (wt %) and trace elements (g/t) (n=38)			Кларк Clark	Кк Cc	Тл Tl	ГЭр _i GE _r
	Мин/Min	Макс/Max	Ср./Av.				
SiO ₂	17,05	79,73	63,22	66	0,96	1	0,96
TiO ₂	0,11	0,85	0,47	0,5	0,94	1	0,94
Al ₂ O ₃	2,62	21,26	10,79	15,2	0,71	5	3,55
FeO _{общ}	0,45	4,16	2,24	4,5	0,50	1	0,50
MnO	0,05	0,20	0,09	0,077	1,13	5	5,64
MgO	0,50	6,74	3,04	2,2	1,38	1	1,38
CaO	0,22	37,32	6,67	4,2	1,59	1	1,59
Na ₂ O	0,51	2,23	1,39	3,9	0,36	1	0,36
K ₂ O	0,13	5,82	2,09	3,4	0,62	1	0,62
P ₂ O ₅	0,06	0,21	0,11	0,2	0,56	5	2,81
S _{общ}	0,01	0,53	0,19	–	–	–	–
Li	22,17	69,44	42,94	20	2,15	5	10,73
Be	0,50	2,96	1,09	3	0,36	15	5,43
Sc	7,83	24,68	15,71	11	1,43	5	7,14
V	9,63	115,00	47,93	60	0,80	10	7,99
Cr	12,70	191,00	65,58	35	1,87	10	18,74
Co	6,00	56,00	27,86	10	2,79	10	27,86
Ni	14,00	110,00	65,21	20	3,26	10	32,61
Cu	8,00	390,00	60,75	25	2,43	5	12,15
Zn	12,00	120,00	59,89	71	0,84	5	4,22
As	17,20	2221,10	142,08	1,5	94,72	10	947,21
Rb	5,60	238,00	80,98	112	0,72	5	3,61
Sr	21,80	794,00	187,06	350	0,53	5	2,67
Y	6,90	42,20	16,13	22	0,73	–	–
Zr	40,39	338,00	121,61	190	0,64	1	0,64
Nb	0,19	15,20	6,00	25	0,25	1	0,25
Mo	<1,00	3,13	0,74	1,5	0,50	5	2,48
Pd	0,001	0,011	0,004	0,0005	8,56	10	85,57
Sn	0,75	2,64	1,54	5,5	0,28	5	1,40
Sb	0,49	1,40	0,76	0,20	3,81	10	38,08
Cs	0,19	6,18	2,30	3,70	0,63	15	9,48
Ba	38,38	452,50	195,49	550	0,36	5	1,78
La	8,79	58,00	27,36	30	0,91	1	0,91
Ce	54,41	16,70	106,00	64	0,85	–	–
Ta	0,14	1,20	0,60	2,2	0,27	1	0,27
Pb	0,40	86,00	21,34	20	1,07	10	10,67
Th	1,56	15,30	7,21	10,70	0,67	10	6,74
U	0,86	5,12	2,20	2,80	0,79	15	11,79
ΣГЭр _i			1268,77				

Примечание. Расчет ГЭр_i по V, Cr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Sn, Cs, La, Ce, Ta, Pb, Th и U проведен с учетом данных ИСП-МС из [29].

Note. GE_r calculation by V, Cr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Sn, Cs, La, Ta, Pb, Th and U was carried out taking into account the data of the ICP-MS from [29].

В аксессуарных количествах отмечаются сульфиды и сульфоарсениды (пирит, халькопирит, пирротин, герсдорфит, галенит, арсенопирит), рутил, фторapatит, гипс, монацит, циркон. Гидроксиды железа (гетит) встречаются преимущественно в породах из коры выветривания.

Содержание карбонатов (CO₃²⁻), сульфидной серы (S_{сульфид.}) в породах и расчетные показатели КНП, КПП и ФНП кислотно-щелочных условий дренажных вод представлены в табл. 4. Сера в неизменных породах представлена практически полностью сульфидной формой, в коре выветривания – сульфатной (гипс). Содержание S_{общ.} варьи-

рует от 0,005 до 0,53 мас. %, CO₃²⁻ – от 0,67 до 43,37 мас. %.

Результаты пероксидного эксперимента по неизменным гипергенными процессами породам представлены в табл. 5 и на рис. 2. Установлены крайне низкие концентрации в растворах Si, P, Cu, Zn, Pb, Ti, Zr, Mo, Sb. Другие элементы (Na, Mg, Al, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, As, Rb, Sr, Y, Nb, Ba) характеризуются широкими вариациями содержания. Превалирующее содержание в растворах имеет Ca. По результатам пероксидного эксперимента рассчитана подвижность некоторых петрогенных и редких элементов, которая приводится в табл. 6.

Таблица 3. Минералогический состав пород месторождения Улюк-Бар, химический состав минералов и показатели их устойчивости и потенциальной экологической опасности

Table 3. Mineralogical composition of rocks of the Ulyuk-Bar deposit, chemical composition of minerals and indicators of their stability and potential environmental hazard

Минерал Mineral	C ₁	C ₀	У/S	X, %	ГЭМ _i ГЕМ _i
	%				
Кварц Quartz	64,24	83,87	1,31	Si – 47,42; Fe – 0,13	1,18
Биотит Biotite	2,02	1,51	0,75	Mg – 9,34; Al – 12,17; Si – 12,93; K – 6,35; Ti – 0,1; Fe – 18,52	23,49
Хлорит Chlorite	2,64	0,97	0,37	Na – 0,67; Mg – 8,18; Al – 11,57; Si – 16,28; K – 0,08; Ca – 0,34; Ti – 0,19; V – 0,02; Cr – 0,01; Mn – 0,006; Fe – 14,54; Co – 0,004; Sr – 0,002	319,78
Гетит+гидрогетит Goethite+hydrogoethite	0,01	2,87	287	Al – 1,66; Si – 0,79; P – 0,45; S – 0,04; Cl – 0,04; Ca – 0,15; Mn – 0,14; Fe – 53,73; Co – 0,02; Cu – 0,03; As – 1,06	247,26
Альбит Albite	5,33	2,55	0,48	Na – 8,38; Al – 10,60; Si – 32,00; Ca – 0,06; Fe – 0,02	23,95
Рутил Rutile	0,43	0,36	0,84	Mg – 0,06; Al – 0,36; Si – 1,03; K – 0,10; Ca – 0,26; Ti – 58,30; Fe – 0,53; Nb – 0,08	270,85
Кальцит Calcite	11,30	1,23	0,11	Mg – 0,52; Si – 0,19; Ca – 36,68; Mn – 0,26; Fe – 0,90, Sr – 0,08	632,08
Доломит Dolomite	4,66	1,00	0,21	Mg – 13,19; Ca – 21,74	79,84
Каолинит Kaolinite	2,48	1,37	0,55	Al – 19,10; Si – 21,62; K – 0,63; Ca – 0,08; Fe – 1,51	23,21
Мусковит Muscovite	3,96	2,59	0,65	Na – 0,15; Mg – 1,03; Al – 16,89; Si – 22,51; K – 7,76; Ti – 0,28; Sn – 0,02	302,29
Фторапатит Fluorapatite	0,23	0,17	0,74	F – 3,87; P – 17,78; Ca – 38,73	1353,87
Анкерит Ankerite	1,68	0,88	0,53	Mg – 8,54; Si – 0,06; Ca – 20,88; Mn – 0,28; Fe – 8,38	74,14
Монацит Monazite	0,04	0,02	0,50	Si – 0,64; P – 11,20; Ca – 0,50; Ag – 0,13; La – 13,87; Ce – 23,45; Pr – 2,48; Nd – 9,31; Sm – 1,45; Gd – 0,69; Th – 0,72	283949,43
Циркон Zircon	0,05	0,04	0,80	Si – 14,60; Fe – 0,613; Zr – 48,32; Nb – 0,2; Hf – 1,07	3279,76
Сульфиды (пирит, халькопирит, пирротин, герсдорфит, галенит, арсенопирит) Sulfides (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, gersdorffite, galena, arsenopyrite)	0,79	0,08	0,10	S – 33,46; Cr – 0,05; Fe – 30,17; Co – 0,12; Ni – 9,8; Cu – 1,8; Zn – 0,01; As – 19,15; Sb – 0,005; Pb – 4,48; Bi – 0,16	13385811,21
Гипс/Gypsum	0,15	0,02	0,13	S – 18,6; Ca – 23,3	58,25
$\Sigma ГЭМ_i / \Sigma ГЕМ_i$	1,4·10 ⁷				

Примечание. C₁ и C₀ – содержания минералов в неизменных породах и коре выветривания, соответственно; У – устойчивость минерала; X – содержание элемента в минерале; ГЭМ_i – показатель потенциальной экологической опасности минерала. Концентрации в породах фторапатита, монацита, циркона рассчитаны по содержанию P, Ce, Zr соответственно. Данные по содержанию в породах гипса и микроэлементному составу сульфидов приводятся с использованием материалов И.В. Высоцкого (Общество с ограниченной ответственностью «Башгеоцентр»).

Note. C₁ and C₀ – mineral content in unchanged rocks and weathering crust, respectively; S – mineral stability; X – element content in the mineral; GEM_i – indicator of a mineral potential environmental hazard. Concentrations in rocks of fluorapatite, monazite and zircon are calculated by the content of P, Ce and Zr, respectively. Data on the content of gypsum in rocks and the trace element composition of sulfides are given using the materials of I.V. Vysotsky («Bashgeolcenter» Limited Liability Company).

Таблица 4. Содержание карбонатов (CO₃²⁻), сульфидной серы (S_{сульфид}) в породах месторождения Улюк-Бар и показатели КНП, КПП, ФНП

Table 4. Content of carbonates (CO₃²⁻), sulfide sulfur (S_{sulfide}) in the rocks of the Ulyuk-Bar deposit and the indicators of ANP, APP, FNP

№ образца Sample no.	CO ₃ ²⁻	S _{сульфид} S _{sulfide}	КНП/ANP	КПП/APP	ФНП/FNP
	%				
Кора выветривания/Weathering crust					
1913-5	0,86	0,02	14,36	0,63	13,74
1913-10	1,04	0,03	17,37	0,94	16,43

1913-15	1,22	0,03	20,37	0,94	19,44
1913-20	0,97	0,03	16,20	0,94	15,26
1913-25	1,16	0,03	19,37	0,94	18,43
1913-30	1,70	0,05	28,39	1,56	26,83
1913-35	1,15	0,02	19,21	0,63	18,58
1913-40	0,76	0,02	12,69	0,63	12,07
1913-45	1,23	0,03	20,54	0,94	19,60
1913-50	0,96	0,02	16,03	0,63	15,41
1913-55	0,91	0,03	15,20	0,94	14,26
1913-60	0,95	0,02	15,87	0,63	15,24
1913-65	1,03	0,03	17,20	0,94	16,26
1913-70	3,43	0,11	57,28	3,44	53,84
1913-75	0,72	0,02	12,02	0,63	11,40
1913-80	0,67	0,01	11,19	0,31	10,88
1916-5	1,04	0,02	17,37	0,63	16,74
1916-10	0,99	0,02	16,53	0,63	15,91
1916-15	0,73	0,02	12,19	0,63	11,57
1916-20	0,74	0,02	12,36	0,63	11,73
1916-25	0,85	0,02	14,20	0,63	13,57
1916-30	0,88	0,01	14,70	0,31	14,38
1916-35	1,46	0,02	24,38	0,63	23,76
1916-40	2,78	0,03	46,43	0,94	45,49
1916-45	2,66	0,02	44,42	0,63	43,80
1916-50	1,87	0,02	31,23	0,63	30,60
1916-55	2,02	0,03	33,73	0,94	32,80
1916-60	3,94	0,04	65,80	1,25	64,55
1916-65	2,10	0,03	35,07	0,94	34,13
1916-70	2,70	0,01	45,09	0,31	44,78
1916-75	1,58	0,03	26,39	0,94	25,45
1916-80	4,60	0,05	76,82	1,56	75,26
1916-85	2,85	0,02	47,60	0,63	46,97
1917-5	2,78	0,07	46,43	2,19	44,24
1917-10	1,02	0,02	17,03	0,63	16,41
1917-15	1,44	0,04	24,05	1,25	22,80
1917-20	1,47	0,05	24,55	1,56	22,99
1917-25	3,06	0,1	51,10	3,13	47,98
1917-30	2,19	0,07	36,57	2,19	34,39
1917-35	2,09	0,11	34,90	3,44	31,47
1917-40	2,81	0,13	46,93	4,06	42,86
1917-45	5,71	0,02	95,36	0,63	94,73
1917-50	2,04	0,04	34,07	1,25	32,82
1917-55	2,42	0,06	40,41	1,88	38,54
1917-60	2,91	0,02	48,60	0,63	47,97
1917-65	3,16	0,07	52,77	2,19	50,58
1917-70	3,59	0,06	59,95	1,88	58,08
ФНП _{ср.} /FNP _{ав.}			30,53		
Неизмененные гипергенными процессами породы/Rocks unchanged by hypergenic processes					
№ образца Sample no.	CO ₃ ²⁻	S _{сульфид.} S _{sulfide.}	КНП/ANP	КПП/APP	ФНП/FNP
	%				
M74	5,56	0,16	92,85	5,00	87,85
M75	4,52	0,28	75,48	8,75	66,73
M77	43,37	0,00	724,28	0,00	724,28
M79	19,88	0,36	332,00	11,25	320,75
M80	12,33	0,09	205,91	2,81	203,1
M82	4,26	0,24	71,14	7,50	63,64
M84	5,39	0,13	90,01	4,06	85,95
M85	15,76	0,17	263,19	5,31	257,88
M86	6,49	0,12	108,38	3,75	104,63
M88	2,68	0,43	44,756	13,44	31,316
M89	4,63	0,38	77,32	11,88	65,44
M90	5,14	0,08	85,84	2,50	83,34
M462	8,82	0,01	147,29	0,31	146,98
M464	10,57	0,11	176,52	3,44	173,08
M465	6,17	0,05	103,04	1,56	101,48
M466	7,33	0,02	122,41	0,63	121,78
M467	4,54	0,00	75,82	0,00	75,82
M468	7,24	0,21	120,91	6,56	114,35
M479	35,54	0,01	593,52	0,31	593,21

M481	4,97	0,00	83,00	0,00	83,00
M482	28,2	0,03	470,94	0,94	470,00
M483	2,03	0,53	33,90	16,56	17,34
M493	2,47	0,43	41,25	13,44	27,81
M494	4,80	0,01	80,16	0,31	79,85
ФНП _{ср.} /FNP _{ав.}	170,82				

Примечание. КНП, КПП, ФНП – кислотонейтрализующий, кислотопродуцирующий и фактический кислотонейтрализующий потенциалы пород, соответственно.

Note. ANP, APP, FNP – acid neutralizing, acid producing and factual acid neutralizing potentials of rocks, respectively.

Таблица 5. Содержания тяжелых металлов и металлоидов (мкг/л) в пероксидных растворах после обработки неизмененных гипергенными процессами пород месторождения Улюк-Бар

Table 5. Content of heavy metals and metalloids (µg/l) in peroxide solutions after processing of rocks unchanged by hypergenic processes of the Ulyuk-Bar deposit

№ образца Sample no.	pH	Eh	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Sb	As
M74	7,86	296	<3	56,19	7,98	<15	<1,5	0,07	0,93
M75	7,80	302	<3	<1,5	15,09	<15	<1,5	0,27	1,25
M77	11,41	-30	<3	<1,5	22,20	<15	<1,5	0,40	0,81
M79	8,05	300	6,85	<1,5	22,20	<15	<1,5	0,36	1,039
M80	7,57	313	<3	<1,5	29,33	<15	<1,5	<0,03	1,03
M84	7,86	298	23,37	<1,5	0,89	<15	<1,5	0,01	2,03
M85	7,67	315	23,37	<1,5	29,33	<15	<1,5	0,17	2,00
M86	7,87	296	39,89	<1,5	22,20	<15	<1,5	0,07	1,11
M88	6,55	390	6,85	<1,5	36,47	<15	2,93	0,14	2,63
M89	6,32	403	39,89	<1,5	36,47	<15	<1,5	0,50	31,32
M90	7,61	321	<3	<1,5	29,33	<15	<1,5	<0,03	1,71
M462	8,86	212	<3	<1,5	29,33	<15	<1,5	<0,03	2,51
M464	9,13	200	7,31	<1,5	36,47	<15	<1,5	0,07	7,67
M465	8,07	289	<3	<1,5	36,47	<15	<1,5	2,53	18,04
M466	7,75	302	<3	<1,5	36,47	<15	<1,5	<0,03	2,03
M467	8,01	277	<3	<1,5	65,17	<15	<1,5	<0,03	1,56
M468	8,02	290	<3	<1,5	29,33	<15	<1,5	0,17	69,17
M481	9,61	168	79,37	<1,5	43,63	<15	<1,5	0,07	1,04
M482	8,69	229	<3	<1,5	43,63	<15	<1,5	0,10	2,63
M493	6,77	381	56,40	<1,5	50,80	<15	25,50	0,36	4,18
M494	8,15	281	56,40	<1,5	57,98	<15	<1,5	0,50	3,59

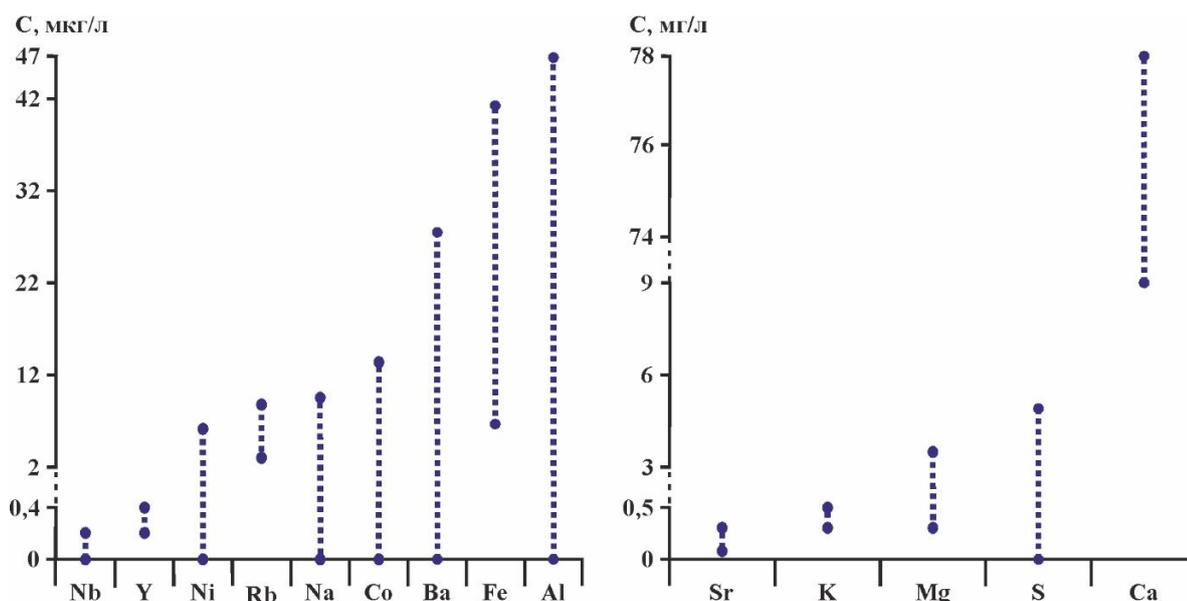


Рис. 2. Расчетные (по данным РФА) содержания элементов (С) в пероксидных растворах после обработки неизмененных гипергенными процессами пород месторождения Улюк-Бар

Fig. 2. Calculated (according to the XRFA) contents of elements (C) in peroxide solutions after processing of rocks unchanged by hypergenic processes of the Ulyuk-Bar deposit

Таблица 6. Расчетная подвижность (P, отн. %) некоторых петрогенных и редких элементов в неизменных гипергенными процессами породах месторождения Улюк-Бар по результатам пероксидного эксперимента
Table 6. Calculated mobility (M, comp. %) of some petrogenic and rare elements in rocks unchanged by hypergenic processes of the Ulyuk-Bar deposit according to the results of the peroxide experiment

Элемент/Element	P/M	Элемент/Element	P/M	Элемент/Element	P/M	Элемент/Element	P/M
Na	0,004	Zn	0,97	Si	0,0	Cr	2,14
K	0,96	Sr	5,49	Ti	0,0	Mn	0,53
Cu	0,56	Al	0,003	P	0,0	Fe	0,013
Rb	3,28	Y	0,32	As	0,71	Ni	0,72
Mg	1,14	La	0,0	Sb	2,97	V	0,0
Ca	1,90	Ce	0,0	S	33,16	Co	0,0
Nb	0,11	Zr	0,0	Ba	3,57	Mo	0,0

Обсуждение результатов

Обычно в рудных месторождениях выявляется близкий набор токсичных элементов. Однако геолого-структурная позиция и рудно-формационная принадлежность месторождений определяет разные уровни содержаний и формы концентраций токсикантов и, следовательно, неодинаковую степень их потенциальной экологической опасности.

ГЭр для пород месторождения Улюк-Бар из коры выветривания в сумме составляет $3,18 \cdot 10^3$, для неизменных пород – $1,27 \cdot 10^3$ (табл. 1, 2). Полученные значения соответствуют данным для сульфидных месторождений, в которых ГЭр обычно составляет n^3-n^4 [10], и характерны для объектов с высокой потенциальной опасностью [30].

ГЭр месторождения Улюк-Бар близки аналогичным показателям на некоторых золоторудных месторождениях. Например, в Албынском месторождении в Приамурье показатель потенциальной токсичности равен $8 \cdot 10^2$ [13]. Основную опасность в рудах этого месторождения определяют As, Sb, Mo, W, Cd, Be, U, в подземных и поверхностных водах – Mo, W, As. ГЭр для золотоносных кварцевых жил сульфидных месторождений Восточного Забайкалья лежат в пределах от $0,48 \cdot 10^2$ до $2,5 \cdot 10^5$, а для отвалов золотоизвлекательной фабрики в районе месторождений – $3,8 \cdot 10^3 \dots 1,9 \cdot 10^4$ [7].

Элементы в коре выветривания месторождения Улюк-Бар располагаются в порядке убывания показателя потенциальной токсичности в ряду As(3090)–Cr(16)–Ni(16)–Co(13)–Pb(10)–V(7)–Cu(6). Остальные элементы имеют незначительные показатели потенциальной токсичности. В неизменных гипергенными процессами породах этот порядок имеет следующий вид: As(947)–Pd(86)–Sb(38)–Ni(33)–Co(28)–Cr(19)–Cu(12)–U(12)–Li(11)–Pb(11)–Cs(9)–V(8)–Sc(7)–Th(7)–Mn(6)–Be(5). Как видно из приведенных данных, As вносит основной вклад в значение показателя потенциальной токсичности. Показатель ГЭр в коре выветривания для As в 3,3 раза выше по сравнению аналогичным показателем для неизменных пород. Вместе с тем угрозу могут представлять и элементы с меньшими показателями ГЭр, такие как Cr, Co, Ni, Cu, Pd, Sb и др.

Специфика влияния золоторудных месторождений на окружающую среду обусловлена, в первую очередь, их геолого-геохимическими особенностями. Опасность загрязнения токсичными элементами зависит не только от их валового содержания в породах, но и от миграционной способности и вида их минерала-носителя. Как правило, природная вода является основным агентом переноса токсикантов.

В то же время оценка экоминералогических особенностей месторождений является более сложной задачей, так как устойчивость минералов зависит от многих факторов. В минерале могут содержаться различные микропримеси, которые необходимо диагностировать. В некоторых случаях устойчивость минерала определяется экспериментально и вычисляется как отношение содержания минерала в коре выветривания к содержанию в неизменных породах [10]. Рассчитанный показатель потенциальной экологической опасности ($\Gamma_{Эм} = 1,4 \cdot 10^7$, табл. 3) относит минералы месторождения Улюк-Бар в соответствии с классификацией по [10, 11] к очень высокоопасным. В первую очередь такое большое значение ГЭм определяют сульфиды, что объясняется их более высоким содержанием в неизменных породах (среднее 0,79 мас. %, табл. 3) по сравнению с породами из коры выветривания, в которых их концентрация на порядок ниже (среднее 0,08 мас. %).

Как видно из полученных данных (табл. 3), сульфиды месторождения Улюк-Бар содержат большее количество, по сравнению с другими минералами, потенциально опасных элементов (As, Sb, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Bi). Поэтому их следует рассматривать как главный источник загрязнения. Их окисление и выщелачивание в результате гипергенных процессов будет приводить к выносу токсичных элементов. Кроме того, следует отметить, что месторождение Улюк-Бар, как и все коренные месторождения АЗР, расположено в зоне пересечения разноранговых тектонических нарушений [21, 22, 29], которая характеризуется максимальной дислоцированностью и трещиноватостью пород. Это также может способствовать ин-

тенсивному протеканию гипергенных процессов и их распространению на глубокие горизонты. В связи с этим важно изучить кислотонейтрализующие свойства пород месторождения и среду дренажных вод, от которых в большой степени зависит устойчивость сульфидных минералов в породах.

По [31] горные породы с ФНП > 20 кг CaCO₃/т являются кислотонейтрализующими, с ФНП < -20 кг CaCO₃/т – кислотопродуцирующими. В случае, если ФНП варьирует от -20 до 20 кг CaCO₃/т, породы попадают в неопределенный интервал. Авторы [26, 31] считают, что кислые дренажные воды в рудных месторождениях образуются, если ФКП превышает значения от -20 до 5 кг CaCO₃/т, а нейтральные и слабощелочные – если ФКП меньше значений от -80 до -2,3 кг CaCO₃/т. Значения ФНП месторождения Улюк-Бар практически во всех изученных пробах неизменных пород и в более половине проб из пород коры выветривания составляют более 20 кг CaCO₃/т, значения ФКП – менее -20 кг CaCO₃/т (табл. 4). Эти данные указывают на высокую кислотонейтрализующую способность и низкие кислотопродуцирующие свойства неизменных и слабоизмененных гипергенными процессами пород месторождения и кислотно-щелочной среде дренажных вод от нейтральной до слабощелочной, что должно препятствовать быстрому растворению сульфидных минералов. Менее половины проб из коры выветривания, как правило, тяготеющие к ее самой верхней части, по показателю ФНП находятся в неопределенном интервале (табл. 4), т. е. породы здесь обладают меньшей кислотонейтрализующей способностью, а среда дренажных вод в них преимущественно нейтральная.

Результаты пероксидного эксперимента по неизменным породам (табл. 5) в целом также свидетельствуют о слабощелочной и щелочной среде дренажных вод (рН=7,61...11,41) и подтверждают вывод о высокой нейтрализующей способности

горных пород месторождения. Исключение при этом представляют всего три пробы сланцев, по которым данные пероксидного эксперимента указывают на слабокислую среду дренажных вод (рН=6,32...6,77). Это соответствует полученным в них сравнительно низким значениям ФНП (28–65 кг CaCO₃/т). Объяснением такого отличия является наименьшее содержание в этих породах карбонатных минералов (<0,6 мас. %) и наибольшим – сульфидов (~0,8...1,0 мас. %).

По результатам эксперимента установлено, что рН пероксидных растворов прямо коррелирует с содержанием в породах CO₃²⁻ (рис. 3, а), которое напрямую зависит от количества в них карбонатных минералов и обратно коррелирует с концентрацией в породах сульфидной серы (рис. 3, б). Это согласуется с теоретически ожидаемыми зависимостями и говорит о правильности использования пероксидных растворов в качестве модельных дренажных. Преобладающее содержание Ca в растворах (рис. 2) определяет дренажные воды как кальциевые.

В целом результаты эксперимента показывают, что многие петрогенные (Si, Al, Ti, Na, K, Fe, Mn, P) и редкие (Cu, Zn, Ni, As, La, Ce, Y, V, Co, Nb, Zr, Mo) элементы в породах месторождения Улюк-Бар являются неподвижными или малоподвижными (табл. 6). Вместе с тем достаточно большая группа токсичных элементов относится к подвижным. Их степень подвижности увеличивается в ряду: Mg–Ca–Cr–Sb–Rb–Ba–Sr–S. Как видно из полученных данных, наиболее подвижными являются элементы, входящими в состав карбонатных минералов (Mg, Ca, Sr), слюды (Rb, Mg, Cr, Ba) и сульфидов (S, Sb, Cr).

Эти минералы с точки зрения экоминералогической оценки месторождения Улюк-Бар могут являться потенциальными загрязнителями.

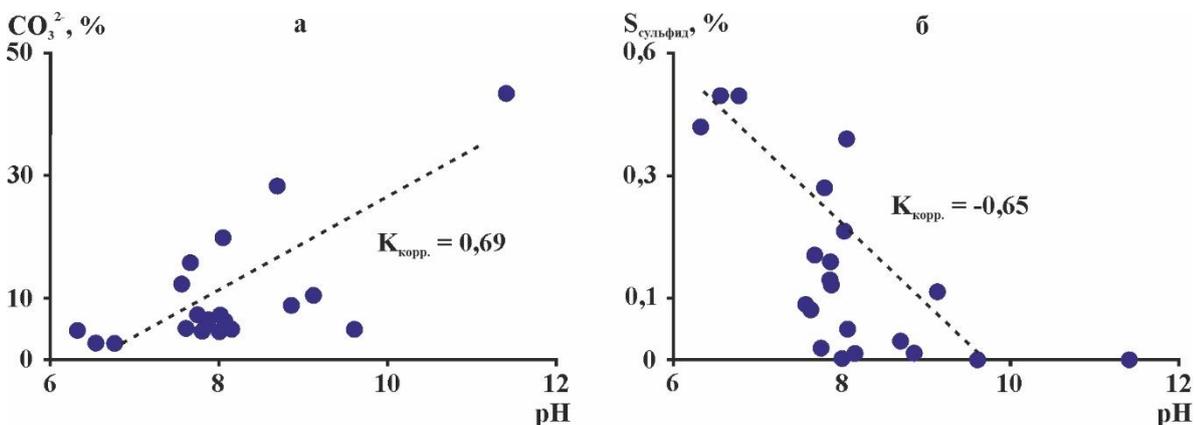


Рис. 3. Связь между рН в пероксидных растворах и содержаниями CO₃²⁻ (а) и S_{сульфид} (б) в породах месторождения Улюк-Бар

Fig. 3. Relationship between pH in peroxide solutions and CO₃²⁻ (a) and S_{sulfide} (b) contents in rocks of the Ulyuk-Bar deposit

Ранее нами установлено наиболее частое превышение ПДК в поверхностных водах АЗР для Sb и реже для As, Fe, Mn, Cu [19]. Из этого следует, что главными минералами-загрязнителями поверхностных вод являются сульфиды.

Разработка месторождения Улюк-Бар в настоящее время осуществляется открытым способом путем гравитационного обогащения руды с использованием механических сепараторов. С экологической точки зрения такой способ считается наиболее безопасным, поскольку не требует применения вредных химических веществ (кислот и др.). «Отработанные» руды (безсульфидные хвосты) складываются на значительном расстоянии от ручья Большой Ключ и реки Кургашля, золотодобывающее предприятие сброса сточных вод в них не производит. Содержания тяжелых металлов и металлоидов в этих реках сходны с таковыми в других притоках реки Большой Авзян, которые пространственно не могут быть связаны с возможным техногенным загрязнением [19]. Из этого следует, что загрязнение ручья Большой Ключ и других ручьев и рек в АЗР обусловлено в первую очередь не ведущимися разработками золоторудных месторождений, а минералогическими и геохимическими особенностями вмещающих их горных пород и руд. Проведенное исследование объединяет информацию для выявления экологических проблем, связанных с геолого-геохимическими особенностями месторождения Улюк-Бар и облегчает выбор подходящей комбинации методов для минимизации экологических рисков и воздействий.

Выводы

1. На основании расчётов показателя потенциальной токсичности установлено, что месторождение Улюк-Бар обладает высокой потенциальной опасностью. Данный показатель для пород из коры выветривания и неизмененных гипергенными процессами пород составляет $3,18 \cdot 10^3$ и $1,22 \cdot 10^3$, соответственно. Главным потенциально опасным токсикантом является мышьяк, превышающий кларк в 95–309 раз. Вместе с тем угрозу представляют и элементы с меньшими показателями потенциальной токсичности, такие как хром, кобальт, никель, медь, палладий, сурьма и др.
2. По показателю потенциальной экологической опасности минералов ($1,4 \cdot 10^7$) месторождение

относится к очень высокоопасным. В первую очередь такое большое значение определяют сульфиды, которые являются источником тяжелых металлов (хром, кобальт, никель, медь, цинк, свинец, висмут) и металлоидов (мышьяк, сурьма).

3. Фактический кислотонейтрализующий потенциал пород благодаря значительному содержанию в них карбонатных минералов (кальцит, анкерит, доломит), превышающих концентрацию сульфидов (пирит, халькопирит, пирротин, герсдорфит, галенит, арсенопирит), определяется как средний и высокий. Это прогнозирует конечную среду дренажных вод как нейтрально-щелочную и указывает на высокую кислотонейтрализующую способность и низкие кислородопродуцирующие свойства неизмененных и слабоизмененных гипергенными процессами пород месторождения. В целом это должно препятствовать быстрому растворению сульфидных минералов.
4. Данные пероксидного эксперимента подтверждают вывод о кислотно-щелочных условиях дренажных вод. Результаты эксперимента показывают, что кремний, алюминий, титан, натрий, калий, железо, марганец, фосфор, медь, цинк, никель, мышьяк, лантан, церий, иттрий, ванадий, кобальт, ниобий, цирконий и молибден в породах месторождения Улюк-Бар являются неподвижными или малоподвижными, а магний, кальций, хром, сурьма, рубидий, барий, стронций и сера относятся к подвижным элементам, которые входят в состав карбонатных минералов, слюд и сульфидов.
5. Проведенное исследование определяет методы для минимизации экологических рисков и воздействий и показывает, что потенциальная возможность загрязнения почв, подземных и поверхностных вод вблизи месторождения Улюк-Бар обусловлена минералогическими и геохимическими особенностями руд и вмещающих их горных пород, т. е. природными факторами. Следовательно, в целях минимизации экологического риска для населения близлежащих сел Исмакаево и Верхний Авзян методы борьбы должны быть направлены в первую очередь на очистку используемой для питья воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bempah C., Ewusi A. Heavy metals contamination and human health risk assessment around Obuasi gold mine in Ghana // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2016. – Vol. 188 (5). – P. 261–273.
2. Heavy metal contamination and exposure risk assessment via drinking groundwater in Ain Azel territory, north-eastern Algeria / H. Kada, A. Demdoum, F. Baali, H. Aouati, D.E. Hamza // *Sustainable Water Resources Management*. – 2022. – Vol. 8. – P. 1–19.
3. Saha A., Sen-Gupta B.P.S., Martínez-Villegas N. Evaluation of potential ecological risk index of toxic metals contamination in the soils // *Chemistry Proceedings*. – 2022. – Vol. 10 (59). – P. 1–11.

4. Contamination and human health risk assessment of heavy metal(loid)s in topsoil and groundwater around mining and dressing factories in Chifeng, North China / D. Zhao, Q. Wu, Y. Zeng, J. Zhang, A. Mei, X. Zhang, S. Gao, H. Wang, H. Liu, Y. Zhang, S. Qi, X. Jia // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2023. – Vol. 10 (1). – P. 1–15.
5. Transfer processes of potential toxic elements (PTE) between rock-soil systems and soil risk evaluation in the Baoshan area, Yunnan Province, Southwest China / L. Zhang, J. McKinley, M. Cooper, W. Han, F. Liu, Y. Song, M. Peng, X. Liu, W. Yang, H. Cheng // *Applied Geochemistry*. – 2020. – Vol. 121. – P. 104712.
6. Presence of toxic elements in ore and gangue minerals of an epithermal Au-Ag deposit, Central Thailand: application for environmental consideration / S. Kaewpaluk, T. Assawincharoenkij, Ch. Hauzenberger, A. Salam // *Conference of the international mine water association*. – Christchurch, November 6–10, 2022. – Christchurch: Curran Associates, Inc., 2022. – 1 p.
7. Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г. Оценка экологической опасности на окружающую среду хвостохранилищ некоторых сульфидных месторождений Восточного Забайкалья // *Успехи современного естествознания*. – 2019. – № 5. – С. 35–41.
8. Беляев А.М. Оценка эколого-геохимической опасности месторождений полезных ископаемых // *Вестник Санкт-Петербургского университета: Геология, География*. – 2011. – № 3. – С. 43–48.
9. Оценка потенциальной экологической опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений (Восточное Забайкалье, Россия) / Б.Н. Абрамов, О.В. Еремин, Р.А. Филенко, Т.Г. Цыренов // *Геосферные исследования*. – 2020. – № 2. – С. 64–75.
10. Экологическая оценка потенциальной токсичности рудных месторождений (методические рекомендации) / Р.В. Голева, В.В. Иванов, И.И. Куприянова, Б.Н. Маринов, М.И. Новикова, Е.П. Шпанов, Т.Н. Шурига. – М.: ВИМС, 2001. – 53 с.
11. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach // *Water Resource*. – 1980. – Vol. 14. – P. 975–1001.
12. Spatial distribution and pollution assessment of Potentially Toxic Elements (PTEs) in surface sediments at the drinking water source channel of Taipu River in China / Y. Wang, F. Li, L. Mao, M. Chen, H. Tao, J. Li // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11. – 13 p.
13. Гидрогеохимические аспекты разработок Албынского золоторудного месторождения (Приамурье) / В.И. Радомская, С.М. Радомский, Л.М. Павлова, Л.П. Шумилова // *Водные ресурсы*. – 2019. – Т. 46. – № 2. – С. 191–206.
14. Еделев А.В. Прогнозная оценка состава дренажных вод, взаимодействующих с сульфидсодержащим веществом // *Геология и геофизика*. – 2013. – Т. 54. – № 1. – С. 144–157.
15. Оценка кислотообразующего/кислотонейтрализующего потенциалов отвальных пород и подвижности потенциально токсичных элементов раздолинского рудного узла (красноярский край) / С.Б. Бортникова, Н.В. Силантьева, А.Н. Запольский, Н.В. Юркевич, О.П. Саева, А.Я. Шевко, О.В. Шуваева, А.В. Еделев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 55–72.
16. Dold B. Acid rock drainage prediction: a critical review // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – Vol. 172. – P. 120–132.
17. Ferrer F.M., Dold B., Jerez O. Dissolution kinetics and solubilities of copper sulfides in cyanide and hydrogen peroxide leaching: applications to increase selective extractions // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2021. – Vol. 230. – P. 106848.
18. Development of a modified kinetic test using EDTA and citric acid for the prediction of contaminated neutral drainage / M.L. Michaud, B. Plante, B. Bussiere, M. Benzazoua, J. Leroux // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – Vol. 181. – P. 58–68.
19. Казбулатова Г.М., Мичурин С.В., Карамова А.М. Геоэкологическая оценка состояния поверхностных вод Авзянского золоторудного района Республики Башкортостан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 139–152.
20. Ларионов Н.Н., Цветкова А.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200000. Южно-Уральская серия. N-40-XXII (Тукан). – СПб: МПР РФ, 2003.
21. Сульфидная минерализация, самородное золото и его геохимические связи в рифейских отложениях Авзянского рудного района (Южный Урал) / С.В. Мичурин, А.А. Шарипова, М.Т. Крупенин и др. // *Литосфера*. – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 61–81.
22. Шарипова А.А. Минералогия и геохимия месторождений и рудопроявлений золота Авзянского рудного района (Южный Урал): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. Наук. – Уфа, 2021. – 17 с.
23. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 384 с.
24. Меньшикова Е.А. Оценка потенциальной экологической опасности техногенных компонентов современных речных осадков // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении*. Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: сборник научных статей. – 2021. – Вып. 24. – С. 127–130.
25. Paktunc A.D. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage // *Environmental Geology*. – 1999. – Vol. 39 (2). – P. 103–112.
26. Acid-base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines / J. Skousen, J. Simmons, L.M. McDonald, P. Ziemkiewicz // *Journal of Environmental Quality*. – 2002. – Vol. 31 (6). – P. 2034–2044.
27. Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils. Final report / A.A. Sobek, W.A. Schuller, J.R. Freeman, R.M. Smith // *Environmental protection technology series*. – 1978. – 203 p.
28. Ritcey G.M. Tailings management in gold plants // *Hydrometallurgy*. – 2005. – Vol. 78 (1–2). – P. 3–20.
29. Первые данные о геохимии редкоземельных элементов и платиноидов в породах золоторудного месторождения Улюк-Бар (Южный Урал) / С.Г. Ковалев, С.В. Мичурин, А.В. Маслов, А.А. Шарипова // *Литосфера*. – 2020. – Т. 20 (4). – С. 573–591.
30. Иванов В.В. О понятии «экологическая минералогия» и методах прогноза токсикологической опасности минералов // *Минералогические исследования в решении экологических проблем*. – М., 1998. – С. 5–15.
31. Lengke M.F., Davis A., Bucknam C. Improving management of potentially acid generating waste rock // *Mine Water and the Environment*. – 2010. – Vol. 29. – P. 29–44.

Информация об авторах

Гульфия Мавлетовна Казбулатова, младший научный сотрудник института геологии Уфимского Федерального исследовательского центра РАН, Россия, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2. kazbulatova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0623-8792>

Сергей Васильевич Мичурин, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник института геологии Уфимского Федерального исследовательского центра РАН, Россия, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2. s_michurin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2776-2190>

Поступила в редакцию: 20.07.2023

Поступила после рецензирования: 12.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Bempah C., Ewusi A. Heavy metals contamination and human health risk assessment around Obuasi gold mine in Ghana. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188 (5), pp. 261–273.
2. Kada H., Demdoun A., Baali F., Aouati H., Hamza D.E. Heavy metal contamination and exposure risk assessment via drinking groundwater in Ain Azel territory, north-eastern Algeria. *Sustainable Water Resources Management*, 2022, vol. 8, pp. 1–19.
3. Saha A., Sen-Gupta B.P.S., Martínez-Villegas N. Evaluation of potential ecological risk index of toxic metals contamination in the soils. *Chemistry Proceedings*, 2022, vol. 10 (59), pp. 1–11.
4. Zhao D., Wu Q., Zeng Y., Zhang J., Mei A., Zhang X., Gao S., Wang H., Liu H., Zhang Y., Qi S., Jia X. Contamination and human health risk assessment of heavy metal(loid)s in topsoil and groundwater around mining and dressing factories in Chifeng, North China. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2023, vol. 10 (1), pp. 1–15.
5. Zhang L., McKinley J., Cooper M., Han W., Liu F., Song Y., Peng M., Liu X., Yang W., Cheng H. Transfer processes of potential toxic elements (PTE) between rock-soil systems and soil risk evaluation in the Baoshan area, Yunnan Province, Southwest China. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 121, pp. 104712.
6. Kaewpaluk S., Assawincharoenkij T., Hauzenberger Ch., Salam A. Presence of toxic elements in ore and gangue minerals of an epithermal Au-Ag deposit, Central Thailand: application for environmental consideration. *Conference of the international mine water association*. Christchurch, November 6–10, 2022. Christchurch, Curran Associates, Inc. Publ., 2022. 1 p.
7. Abramov B.N., Cyrenov T.G. Assessment of environmental hazards to the environment of tailings dumps of some sulfide deposits of Eastern Transbaikalia. *Successes of modern Natural Science*, 2019, no. 5, pp. 35–41. (In Russ.)
8. Belyaev A.M. Assessment of ecological and geochemical hazard of mineral deposits. *Bulletin of St. Petersburg University. Series: Geology. Geography*, 2011, no. 3, pp. 43–48. (In Russ.)
9. Abramov B.N., Eremin O.V., Filenko R.A., Cyrenov T.G. Assessment of the potential environmental hazard of natural and man-made complexes of ore deposits (Eastern Transbaikalia, Russia). *Journal of Geophysical Research*, 2020, no. 2, pp. 64–75. (In Russ.)
10. Goleva R.V., Ivanov V.V., Kupriyanova I.I., Marinov B.N., Novikova M.I., Shpanov E.P., Shuriga T.N. *Environmental assessment of potential toxicity of ore deposits (methodological recommendations)*. Moscow, VIMS Publ., 2001. 53 p. (In Russ.)
11. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach. *Water Resources*, 1980, vol. 14, pp. 975–1001.
12. Wang Y., Li F., Mao L., Chen M., Tao H., Li J. Spatial distribution and pollution assessment of Potentially Toxic Elements (PTEs) in surface sediments at the drinking water source channel of Taipu River in China. *Minerals*, 2021, vol. 11, 13 p.
13. Radomskaya V.I., Radomskij S.M., Pavlova L.M., Shumilova L.P. Hydrogeochemical aspects elements behavior under development of the Albyn gold deposit, Amur region. *Water Resources*, 2019, vol. 46, no. 2, pp. 191–206. (In Russ.)
14. Edelev A.V. Composition of drainage mine waters interacting with sulfide-containing rocks: a predictive estimation. *Journal of Geology & Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 1, pp. 144–157. (In Russ.)
15. Bortnikova S.B., Silanteva N.V., Zapolskij A.N., Yurkevich N.V., Isaeva O.P., Shevko A.Ya., Shuvaeva O.V., Edelev A.V. Assessment of acid-base accounting of mine waste rocks and mobility of potentially toxic elements of the Razdolinsky ore field (Krasnoyarsk territory). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 55–72. (In Russ.)
16. Dold B. Acid rock drainage prediction: a critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 172, pp. 120–132.
17. Ferrer F.M. Dold B., Jerez O. Dissolution kinetics and solubilities of copper sulfides in cyanide and hydrogen peroxide leaching: applications to increase selective extractions. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 230, pp. 106848.
18. Michaud M.L., Plante B., Bussiere B., Benzaazoua M., Leroux J. Development of a modified kinetic test using EDTA and citric acid for the prediction of contaminated neutral drainage. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 181, pp. 58–68.
19. Kazbulatova G.M., Michurin S.V., Karamova A.M. Geoecological assessment of the condition of surface waters of Avzyan gold region in the Republic of Bashkortostan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 139–152. (In Russ.)
20. Larionov N.N., Cvetkova A.A. *State Geological Map of the Russian Federation. 1:200000. South Ural series. N-40-XXII (Toucan)*. St Petersburg, MPR RF Publ., 2003. (In Russ.)
21. Michurin S.V., Sharipova A.A., Krupenin M.T. Sulfide mineralization, native gold and its geochemical connections in the Riphean deposits of the Avzyan ore-bearing region (the Southern Urals). *Litosfera*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 61–81. (In Russ.)
22. Sharipova A.A. *Mineralogy and geochemistry of gold deposits and ore occurrences of Avzyan ore district (Southern Urals)*. Cand. Diss. Abstract. Ufa, 2021. 17 p. (In Russ.)
23. Tejlor S.R., Mak-Lennan S.M. *Continental crust: its composition and evolution*. Moscow, Mir Publ., 1988. 384 p.

24. Menshikova E.A. Assessment of the potential environmental hazard of technogenic components of modern river sediments. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky: collection of scientific articles*, 2021, Iss. 24, pp. 127–130. (In Russ.)
25. Paktunc A.D. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage. *Environmental Geology*, 1999, vol. 39 (2), pp 103–112.
26. Skousen J., Simmons J., McDonald L.M., Ziemkiewicz P. Acid-base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines. *Journal of Environmental Quality*, 2002, vol. 31 (6), pp. 2034–2044.
27. Sobek A.A., Schuller W.A., Freeman J.R., Smith R.M. Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils. Final report. *Environmental protection technology series*, 1978. 203 p.
28. Ritcey G.M. Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, 2005, vol. 78 (1–2), pp. 3–20.
29. Kovalev S.G., Michurin S.V., Maslov A.V., Sharipova A.A. First data on the geochemistry of rare earth elements and platinoids in the rocks of the gold mining deposit Ulyuk-Bar (the Southern Urals). *Litosfera*, 2020, vol. 20 (4), pp. 573–591. (In Russ.)
30. Ivanov V.V. *On the concept of «ecological mineralogy» and methods for predicting the toxicological danger of minerals*. Moscow, 1998. pp. 5–15. (In Russ.)
31. Lengke M.F., Davis A., Bucknam C. Improving management of potentially acid generating waste rock. *Mine Water and the Environment*, 2010, vol. 29, pp. 29–44.

Information about the authors

Gulfiya M. Kazbulatova, Junior Research Fellow, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 16/2, Karl Marx street, Ufa, 450077, Russian Federation. kazbulatova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0623-8792>

Sergey V. Michurin, Cand. Sc., Leading Researcher, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 16/2, Karl Marx street, Ufa, 450077, Russian Federation. s_michurin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2776-2190>

Received: 20.07.2023

Revised: 12.09.2023

Accepted: 19.04.2024

УДК 621.311.212
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4570
Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Микро-ГЭС с регулированием гидроагрегата по цепи якоря гидрогенератора

Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, М.М. Попов✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉lukutin48@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Приводится сравнительный анализ микро-ГЭС с регулированием гидроагрегата по цепи якоря гидрогенератора по технико-экономической эффективности. Авторы обосновывают возможность применения интеллектуального управления энергетическим балансом инверторных микро-ГЭС с целью увеличения количества вырабатываемой электроэнергии без увеличения установленной мощности гидроагрегата, что позволит повысить их технико-экономические характеристики по сравнению с традиционными микро-ГЭС автоталостного типа. Данный подход позволяет использовать интеллектуальные системы управления, которые могут регулировать выработку электроэнергии в зависимости от пиков потребления электроэнергии. Для этого используются инверторные микро-ГЭС, которые позволяют более эффективно управлять энергопотреблением и накапливать электроэнергию в аккумуляторных батареях. Разработанные алгоритмы управления позволяют оптимизировать работу микро-ГЭС, обеспечивая максимальную эффективность использования ресурсов и снижение затрат на электроэнергию. Применение этих технологий может существенно улучшить экономические показатели микро-ГЭС и сделать их более конкурентоспособными на рынке электроэнергии. Алгоритмы осуществляют управление работой гидроагрегата, гарантируют поставку электроэнергии потребителям и обеспечивают эффективное использование аккумуляторных накопителей электроэнергии в зависимости от энергетических потребностей. **Цель:** сравнительный технико-экономический анализ микро-ГЭС с регулированием параметров генерируемого напряжения по цепи якоря гидрогенератора с приводом от нерегулируемой гидротурбины. **Объект:** микро-ГЭС деривационного типа с силовыми преобразователями и накопителями электроэнергии. **Методы:** компьютерное моделирование. **Результаты.** Предложена классификация деривационных микро-ГЭС с управлением гидроагрегатом по цепи якоря гидрогенератора, показаны технико-экономические возможности различных способов их построения, определены наиболее перспективные технические решения инверторных микро-ГЭС, оптимизированы их энергетические балансы и алгоритмы управления энергетическим оборудованием.

Ключевые слова: микро-ГЭС, энергоэффективность, алгоритм управления, стабилизация, инвертор, аккумуляторный накопитель электроэнергии, график нагрузки, напорный трубопровод

Для цитирования: Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М. Микро-ГЭС с регулированием гидроагрегата по цепи якоря гидрогенератора // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 158–171. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4570

UDC 621.311.212
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4570

Micro-hydroelectric power station with a hydraulic unit regulation along a hydrogenerator anchor circuit

B.V. Lukutin, E.B. Shandarova, M.M. Popov✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉lukutin48@mail.ru

Abstract. Relevance. The article provides a comparative analysis of micro-hydroelectric power stations with a hydraulic unit regulation along a hydrogenerator anchor circuit according to technical and economic efficiency. The authors substantiate the possibility of using intelligent control of the energy balance of inverter micro-hydroelectric power stations for increasing the amount of electricity generated without increase in the installed capacity of the hydraulic unit. This will improve their technical and economic characteristics compared with traditional micro-hydroelectric power plants of the ballast type. This approach allows using intelligent control systems that can regulate power generation depending on the peaks of electricity consumption. For this purpose, inverter micro-hydroelectric power stations are used. They allow more efficient management of energy consumption and accumulation of electricity in batteries. The developed control algorithms make it possible to optimize the operation of micro-hydroelectric power stations, ensuring maximum resource efficiency and reducing the cost of electric energy. Application of these technologies may significantly improve economic indicators of micro-hydroelectric power stations and make them more competitive in the electricity market. The algorithms control the hydraulic unit operation, ensure supply of electric power to consumers and effective use of energy storage batteries depending on electric needs. **Aim.** Comparative technical and economic analysis of a micro-hydroelectric power station with regulation of the parameters of the generated voltage along the anchor circuit of the hydrogenerator driven by an unregulated hydraulic turbine. **Object.** Micro-hydroelectric power stations of diversion type with power converters and electricity storage devices. **Methods.** Computer modeling. **Results.** The authors have proposed the classification of diversion micro-hydroelectric power stations with hydraulic unit control via the hydrogenerator anchor circuit. The paper demonstrates the technical and economic possibilities of various methods of their construction. The most promising technical solutions for inverter micro-hydroelectric power stations are determined, their energy balances and power equipment control algorithms are optimized.

Keywords: micro-hydroelectric power station, energy efficiency, control algorithm, stabilization, inverter, battery energy storage, load curve, pressure pipeline

For citation: Lukutin B.V., Shandarova E.B., Popov M.M. Micro-hydroelectric power station with a hydraulic unit regulation along a hydrogenerator anchor circuit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 158–171. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4570

Введение

Рост цен на углеводородное топливо и возрастающие экологические проблемы на фоне роста населения планеты с соответствующим увеличением энергетических потребностей определили в последние десятилетия опережающее развитие возобновляемой энергетики. Энергия потоков воды занимает весьма существенное место по запасам и масштабам использования. Этому способствует высокая энергетическая плотность потока воды и относительная стабильность его параметров в сравнении с энергетическими характеристиками других возобновляемых энергоресурсов, например, ветра или солнечного излучения. Кроме того, использование различных гидротехнических сооружений позволяет управлять рабочим потоком воды, поступающим на гидротурбину, что положительно сказывается на технико-экономических характеристиках гидроагрегата [1–5]. В результате электроэнергия гидроэлектростанций обычно дешевле, чем от других энергоисточников.

Конструктивные, технические и экономические характеристики гидроэлектростанций существенно различаются в зависимости от их мощности. В данной работе рассматриваются микрогидроэлектростанции (мощность до 100 кВт) наиболее распространённой конструкции – деривационного типа [6]. Такие микро-ГЭС обеспечивают стабилизацию рабочего потока воды на входе гидротурбины за счёт напорного трубопровода и позволяют, при наличии подходящего водотока, создавать авто-

номные системы электроснабжения для широкого круга потребителей: бытовых, социальных, небольших производственных и других.

Особенностью деривационных микро-ГЭС является отсутствие возможностей аккумулировать запасы воды, что определяет зависимость их функционирования от водных режимов водотока, которые могут существенно изменяться по сезонам года. В частности, типичные характеристики водности малых рек Алтая можно показать на примере реки Маймы. Речная сеть Алтайского края включает 17085 рек общей протяженностью 51004 км, большая часть которых относится к малым рекам и ручьям. Многие реки берут начало высоко в горах и питаются от ледников и снежников, характеризуются быстрым течением, порожистым руслом в узких долинах. Майма – река на севере Республики Алтай, правый приток Катунь. Река берёт своё начало на хребте Иолго рядом с безымянной вершиной (1144 м). Далее Майма проходит в северо-западном направлении, впадая в реку Катунь. Длина реки составляет 57 км, превышение истока над устьем 800 м, средний уклон русла 1,4 %.

По типу водного режима р. Майма относится к рекам с весенним половодьем и летними паводками. Около 45 % стока приходится на весну, 30 % – на лето. Средний многолетний гидрограф стока и средний многолетний уровень воды р. Маймы приведён на рис. 1 [7]. По рисунку видно, что водность реки весной более чем на порядок превышает зимнюю.



Рис. 1. Средний многолетний гидрограф стока и средний многолетний уровень воды р. Маймы с 1940 по 2016 г. по гидропосту с. Майма

Fig. 1. Average long-term flow hydrograph and average long-term water level of the Maima river from 1940 to 2016 according to the hydropost of Maima village

Учитывая, что для деривационных микро-ГЭС рекомендуется использовать не более 10 % минимального стока воды, получаем, что для рассматриваемой не самой малой реки может быть использован проектный расход воды не более 0,3 м³/с. Следовательно, повышение энергоэффективности микро-ГЭС, в том числе и за счёт рационального использования энергетического потенциала водотока, является актуальной задачей.

Исторически первые гидроэлектростанции относились к классу микро-ГЭС и их возникновение связано с появлением промышленных электрических генераторов. В СССР микрогидроэнергетика в сельском хозяйстве получила распространение в тридцатые годы прошлого века. Первая отечественная серия автоматизированных микро-ГЭС из 22 типов была спроектирована и принята к производству на Ленинградском заводе «Электросила». Мощность гидроагрегатов составляла от 0,7 до 55,2 кВт. Микро-ГЭС имели автоматические регуляторы частоты вращения на базе масляного насоса, которые управляли углом поворота лопастей турбины, и угольные регуляторы возбуждения электрических генераторов [8].

Эта серия микро-ГЭС впервые имела полный набор автоматических устройств, обеспечивающих стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии. Однако уровень развития техники того времени не позволил обеспечить приемлемый уровень эксплуатационных и производственно-технологических характеристик станций. В результате для серийного производства пришлось существенно упростить конструкцию микро-ГЭС, прежде всего использованием нерегулируемых гидротурбин и совершенствованием электрической части станций.

Указанные направления совершенствования микрогидроэлектростанций являются приоритетными и в настоящее время, особенно в связи с прогрессом в области силовой преобразовательной техники, систем аккумулирования электроэнергии и информационных технологий. Упрощение гидротехнической части гидроагрегата существенно повышает требования к устройствам генерирования электроэнергии и стабилизации её параметров. Соответственно, задачи исследования режимов работы электротехнических комплексов генерирования и стабилизации параметров электроэнергии микро-ГЭС с целью совершенствования их технико-экономических характеристик продолжают оставаться актуальными [9].

Следует заметить, что применение нерегулируемых турбин в микро-ГЭС понимается как исключение из их конструкции устройств автоматического регулирования угла поворота лопастей или рабочего потока воды направляющим аппаратом. Однако равенство текущих мощностей гидротурбины и электрического генератора определяет зависимость энергетических характеристик гидроагрегата как от мощности рабочего потока воды гидротурбины, так и от мощности, потребляемой электрическими нагрузками гидрогенератора. Таким образом, нерегулируемой гидротурбиной можно управлять с помощью воздействия на тормозной момент гидрогенератора регулированием его электрической мощности. Математически движение системы «гидротурбина–гидрогенератор» описывается уравнением:

$$M_t - M_g = J(d\omega/dt),$$

где M_t – механический момент вращения гидротурбины; M_g – момент сопротивления генератора, определяемый мощностью электрической нагрузки; J – момент инерции вращающихся частей; ω – частота вращения гидроагрегата; t – время.

Регулируя механический момент сопротивления гидрогенератора, можно стабилизировать частоту вращения гидроагрегата и, соответственно, частоту выходного напряжения микро-ГЭС. Регулировать электрическую мощность гидрогенератора можно с помощью дополнительных управляемых нагрузок, позволяющих влиять на магнитный поток реакции якоря и тормозной момент, что позволяет стабилизировать генерируемое напряжение гидроагрегата по величине и частоте.

Принцип управления гидроагрегатом с помощью регулируемых нагрузок – автобалластное регулирование – получил широкое распространение и послужил основой для создания промышленных серий микро-ГЭС отечественными и зарубежными производителями. Дальнейшее развитие конструкций микро-ГЭС связано с использованием силовой

преобразовательной техники и накопителей электрической энергии [10].

Целью данной статьи является изучение возможностей и условий достижения экономической целесообразности использования микро-ГЭС деривационного типа, в том числе с инверторами и накопителями электрической энергии, с учетом параметров графиков электропотребления, водного режима водотока и рельефа местности в районе установки микро-ГЭС по сравнению с характеристиками промышленной серии микро-ГЭС фирмы «ИНСЭТ» [11].

Классификация систем генерирования и стабилизации параметров электроэнергии микрогидроэлектростанций деривационного типа по цепи якоря гидрогенератора приведена на рис. 2.



Рис. 2. Классификация систем генерирования и стабилизации напряжения микро-ГЭС по цепи якоря гидрогенератора

Fig. 2. Classification of microelectric power station voltage generation and stabilization systems

Принципиально, для создания управляющего тормозного момента гидрогенератора может использоваться отдельный балластный генератор.

В этом случае гидроагрегат состоит из гидротурбины, вал которой приводит во вращение два управляемых гидрогенератора одинаковой мощности: основной – для электропитания нагрузок микро-ГЭС, и балластный, нагруженный на балластные сопротивления, для регулирования суммарного тормозного момента гидроагрегата. Структурная схема такой микро-ГЭС приведена на рис. 3.

Преимущества трёхмашинной конструкции микро-ГЭС заключаются в снижении мощности систем управления балластом до мощности системы возбуждения балластного генератора. Рассеивание необходимой мощности на балластной нагрузке обеспечивается формированием соответствующего выходного напряжения балластного генератора по цепи его возбуждения. Нагрузочный генератор работает только на электрические нагрузки потребителя, что позволяет осуществлять независимую регулировку величины его выходного напряжения по каналу возбуждения. Частота напряжения стабилизируется по независимому каналу регулирования мощности балласта по цепи возбуждения балластного генератора.

Недостатком трёхмашинной микро-ГЭС являются конструктивные ограничения построения такого гидроагрегата. Кроме того, на динамические характеристики микро-ГЭС влияют постоянные времени обмоток возбуждения генераторов. Эти обстоятельства ограничивают целесообразность применения таких энергоисточников специальными энергосистемами.

Наиболее распространены двухмашинные автобалластные микро-ГЭС, в которых один гидрогенератор параллельно работает на полезную и управляющую балластную нагрузки. В России типичным представителем такого типа микро-ГЭС является серийная продукция фирмы «ИНСЭТ». Структурная схема такой микро-ГЭС приведена на рис. 4.

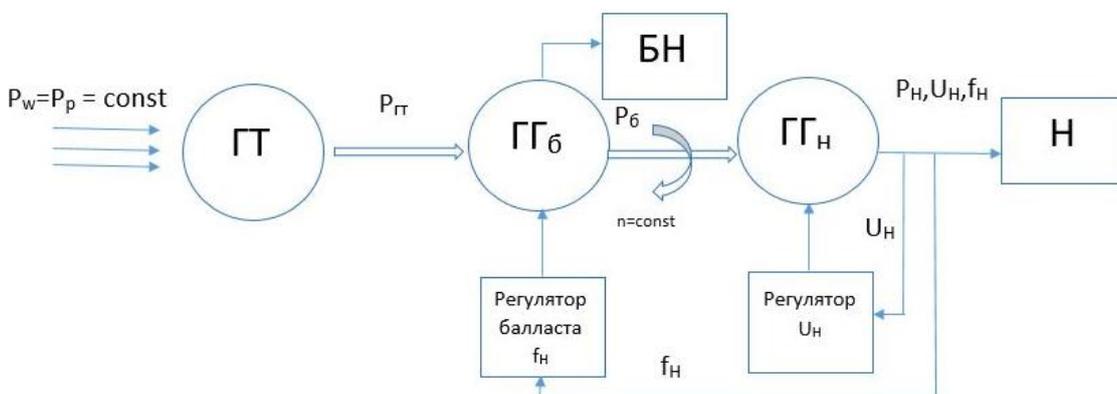


Рис. 3. Генерирующая система с балластным генератором

Fig. 3. Generating system with a ballast generator

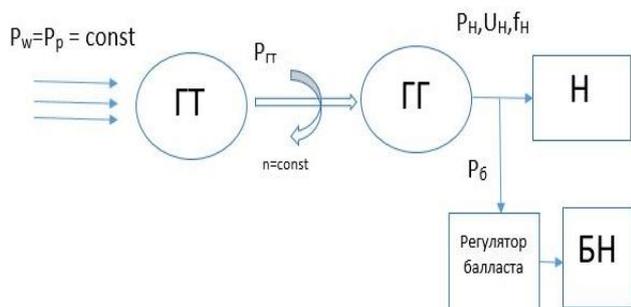


Рис. 4. Микро-ГЭС со стабилизацией выходного напряжения по цепи якоря гидрогенератора

Fig. 4. Microelectric power station with stabilization of the output voltage along a hydrogenerator anchor circuit

Принцип балластной стабилизации величины и частоты выходного напряжения нерегулируемого гидроагрегата с напорным трубопроводом заключается в поддержании на номинальном уровне активной и реактивной составляющих суммарной мощности электрических нагрузок: потребления и балласта. Осуществляет эту функцию регулятор балласта, который может иметь как разомкнутую, так и замкнутую структуры. Разомкнутая автобалластная система управляется током нагрузки, замкнутая может работать по отклонению от номинала величины или частоты напряжения на нагрузке. Достоинствами рассматриваемой генерирующей системы являются относительная простота и дешевизна энергетического оборудования, обеспечивающего хорошие динамические характеристики станции и приемлемое качество электроэнергии.

Для деривационных микро-ГЭС с напорным трубопроводом и нерегулируемым гидроагрегатом возможно обеспечение приемлемого качества генерируемого напряжения с помощью балластного регулирования. В источнике [12] показано, что автобалластные микро-ГЭС с одноканальной токовой системой стабилизации гидроагрегата могут обеспечить уровень стабилизации напряжения по величине порядка $U = U_{ном} \pm 9-12 \%$, по частоте $\omega = \omega_{ном} \pm 1,8-5 \%$. Такие показатели достигаются при работе на пассивную нагрузку с коэффициентом мощности в диапазоне $\cos\phi = 0,8-1,0$ и стабильных параметрах рабочего потока воды. Лучшего качества

напряжения добиться сложно, что определяется трудностями стабилизации активно-индуктивного результирующего сопротивления полезной и балластной нагрузок, которые изменяются в течение суток по величине и характеру. Для повышения качества напряжения автобалластных микро-ГЭС необходимо использовать более сложные регуляторы балласта, вводить дополнительные каналы регулирования и, соответственно, использовать управляемые электрические машины синхронного типа с электромагнитным возбуждением. Таким образом, повышение качества выходного напряжения станции достигается её усложнением и удорожанием, что снижает её потребительские характеристики.

Радикальным способом повысить качество выходного напряжения автобалластной микро-ГЭС, без усложнения системы стабилизации режима работы гидроагрегата, является использование в её составе автономного инвертора. Структурная схема такой станции приведена на рис. 5. С помощью автономного инвертора (АИ) можно обеспечить нагрузку (Н) качественной электроэнергией. Качество выходного напряжения современных инверторов удовлетворяет нормативным значениям. Контроль режима работы гидроагрегата осуществляется автобалластной системой, обеспечивающей ограничение диапазона изменения входного напряжения инвертора, что несколько снижает требования к входным параметрам инверторного преобразователя. Кроме того, инверторная система позволяет использовать регуляторы балласта с технологией поиска точки максимальной мощности (МРРТ-технология) энергетических характеристик гидротурбины, соответствующих разным значениям рабочего потока воды на входе турбины за счёт погрешностей при строительстве напорного трубопровода и потерь напора на его гидравлическом сопротивлении, а также для экономии расхода воды в периоды минимальных стоков реки. МРРТ-регулятор балласта определяет диапазон изменения частоты вращения гидроагрегата, что предъявляет к нему дополнительные требования по механической прочности.

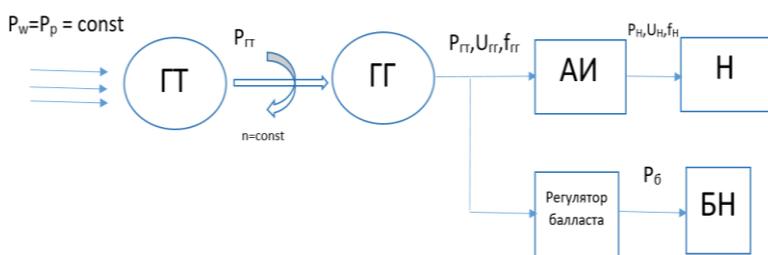


Рис. 5. Структурная схема микро-ГЭС автобалластного типа с инвертором

Fig. 5. Block diagram of a microelectric power station of an autoballast type with an inverter

Принцип действия регулятора балласта с использованием МРРТ-технологии заключается в управлении балластной мощностью с целевой функцией вывода гидроагрегата на максимальную мощность при доступных энергетических параметрах рабочего потока воды на его входе.

Алгоритм функционирования балластной системы с МРРТ-технологией применительно к оборотным характеристикам гидротурбины $P=f(n)$ при фиксированном открытии направляющего аппарата основывается на управлении суммарной мощностью гидроагрегата с помощью регулирования величины балластной нагрузки. Критерием достижения работы гидроагрегата с генерацией, близкой к максимуму, для доступной энергии рабочего потока воды гидротурбины может использоваться отношение приращения мощности к приращению частоты вращения: dP/dn , величина которого в точке максимума P равна нулю, или просто величина приращения dn при $dP=\text{const}$.

Последовательность шагов реализации алгоритма следующая:

1. Производятся измерение текущих значений мощности и частоты вращения гидрогенератора $P_{\text{ГГ}i}$, $n_{\text{ГГ}i}$ для оборотной характеристики гидротурбины с неполными данными о характеристиках её рабочего режима.
2. К суммарной мощности нагрузки гидрогенератора добавляется приращение мощности балласта $P_{\text{ГГ}i+1}=P_{\text{ГГ}i}+dP_6$.
3. Определяется частота вращения гидроагрегата $n_{\text{ГГ}i+1}$ и её приращение $dn_{\text{ГГ}i+1}=n_{\text{ГГ}i}-n_{\text{ГГ}i+1}$.
4. Проверяется выполнение условия превышения приращения частоты вращения над заданной фиксированной величиной $dn_{\text{ГГ}i+1}>dn_{\text{ГГ}i+1}^{\text{max}}$, свидетельствующей о приближении к максимуму оборотной характеристики гидротурбины $dn_{\text{ГГ}i+1}>dn_{\text{ГГ}i+1}^{\text{max}}$.
5. При выполнении условия п. 4 процесс приращения мощности балластной нагрузки прекращается и микро-ГЭС переходит в установившийся режим работы на скорректированную нагрузку максимальной мощности для доступных энергетических параметров рабочего потока воды. Если условие не выполняется, процесс приближения к точке максимальной мощности гидроагрегата продолжается.

Для аппаратной реализации предложенного алгоритма необходимо определить время переходного процесса при набросе балласта, т. е. время, при котором наступит новый установившийся режим, после которого можно переходить к следующему шагу алгоритма. Также нужно выбрать приращение мощности балласта исходя из условий возможности практической реализации и приемлемой точности нахождения точки максимальной мощности на оборотной характеристике гидротурбины. Моделирование про-

цесса наброса балластной нагрузки инверторной микро-ГЭС проводилось в системе *MATLAB Simulink*.

Схема имитационной модели автономной системы электроснабжения с инверторной микро-ГЭС, работающей на активную балластную нагрузку с заданным коэффициентом модуляции ШИМ-инвертора, приведена на рис. 6 [13].

В модели использованы стандартные моделирующие блоки: синхронный генератор с постоянными магнитами, трёхфазный мостовой выпрямитель, трёхфазный автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Система управления (СУ) при заданном коэффициенте модуляции формирует эталонные синусоидальные напряжения фаз с предмодуляцией третьей гармоникой. Сформированные сигналы задания подаются на стандартный элемент библиотеки *PWM Generator*, формирующий сигналы управления силовыми ключами инвертора с несущей частотой 5 кГц.

Номинальная активная мощность магнитоэлектрического синхронного генератора принималась равной 30 кВт, полная – 37,5 кВт. Активная мощность балласта каждой фазы в процессе моделирования изменялась от 1 до 12 кВт, при этом шаг приращения мощности балласта dP_6 выбран равным 10 % от номинальной активной мощности генератора $P_{\text{нг}}$.

Характеристика нерегулируемой пропеллерной гидротурбины с напорным трубопроводом представлена аппроксимирующим полиномом в относительных единицах (о.е.) относительно максимума мощности гидроагрегата:

$$P(\omega) = -1,697\omega^3 - 1,3581\omega^2 + 3,0451\omega + 0,0062.$$

На рис. 7 представлены результаты моделирования в виде зависимости скорости вращения гидроагрегата от изменения мощности балластной нагрузки микро-ГЭС. До момента времени, равного 0,55 с, гидрогенератор работал на активный балласт мощностью, равной 80 % от $P_{\text{нг}}$, затем в моменты времени 0,55 и 1 с мощность балласта увеличивалась на $0,1P_{\text{нг}}$.

Как видно из графика, время переходного процесса при номинальном моменте инерции гидроагрегата мощностью 30 кВт не превышает 0,26 с. При уменьшении момента инерции на 50 %, что соответствует гидроагрегату меньшей мощности, время переходного процесса уменьшается до 0,15 с, при увеличении на 50 % увеличивается до 0,35 с.

На рис. 8 представлен результат работы предложенного алгоритма поиска точки максимальной мощности оборотной характеристики гидроагрегата в виде аппроксимированной зависимости мощности гидроагрегата от скорости вращения при последовательном изменении мощности балластной нагрузки от 1,2 до $0,1P_{\text{нг}}$ с шагом $0,1P_{\text{нг}}$.

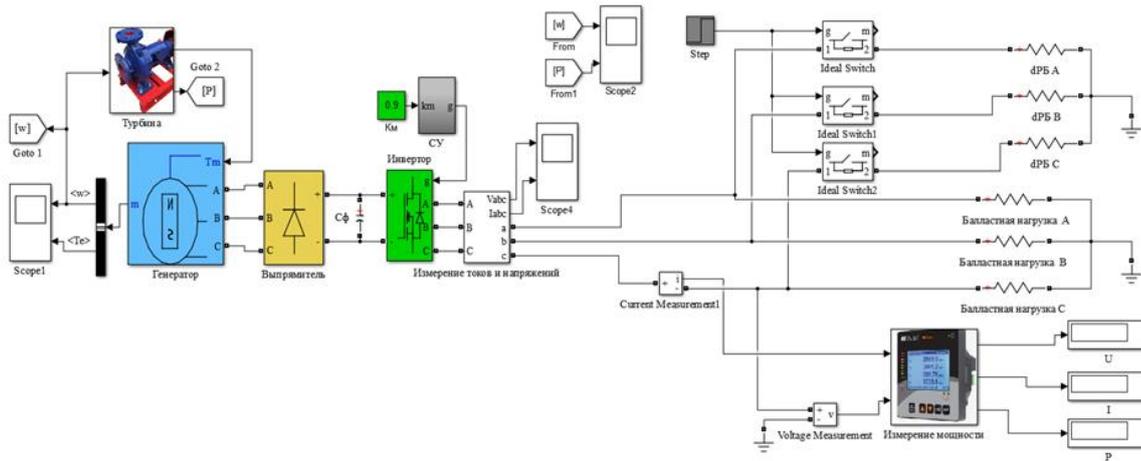


Рис. 6. Имитационная модель системы электроснабжения с инверторной микро-ГЭС
Fig. 6. Simulation model of an electric power supply system with an inverter microelectric power station

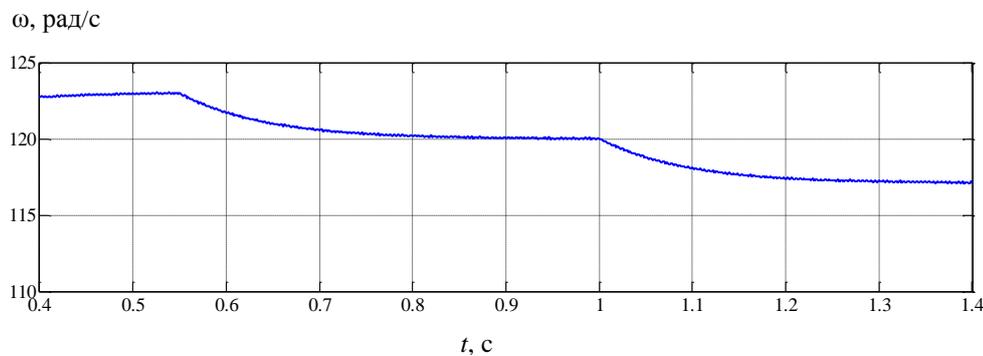


Рис. 7. Переходный процесс изменения скорости вращения при набросе нагрузки инверторной микро-ГЭС
Fig. 7. Transient process of changing the angular rotation speed when loading an inverter microelectric power station

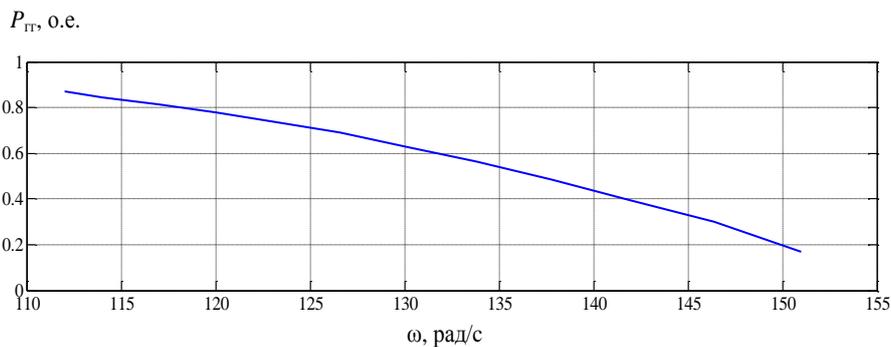


Рис. 8. Зависимость мощности гидрогенератора от угловой скорости вращения
Fig. 8. Dependence of the angular rotation speed of the hydrogenerator on active load power

Недостатком автобалластных систем является рассеивание в виде тепла управляющей электрической мощности на балластных резисторах, что снижает электрический коэффициент полезного использования установленной мощности гидроагрегата.

Инвертор в составе микро-ГЭС на максимальную мощность нагрузки увеличивает стоимость оборудования станции, но обеспечивает высокое

качество генерируемой электроэнергии [14, 15]. Включение в состав инверторной микро-ГЭС накопителя электроэнергии позволяет улучшить её технические и экономические характеристики за счёт покрытия пиковых нагрузок энергией, запасённой в аккумуляторах.

Структурная схема инверторной микро-ГЭС с аккумуляторными накопителями электроэнергии и автобалластной системой показана на рис. 9.

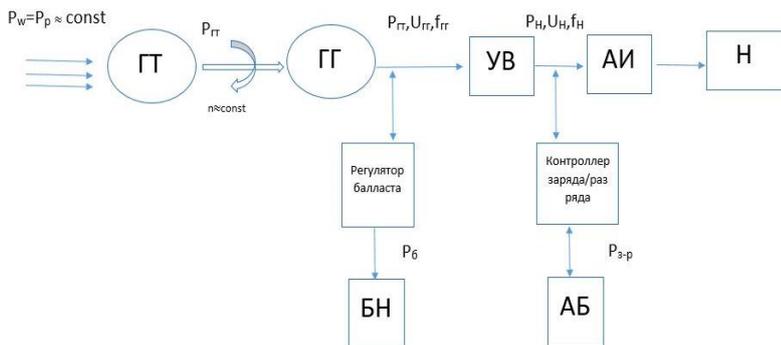


Рис. 9. Структурная схема инверторной микро-ГЭС с автобалластной системой регулирования гидроагрегата и аккумуляторным накопителем электроэнергии

Fig. 9. Block diagram of the inverter microelectric power station with an autoblastic control system of a hydraulic unit and an electric power accumulator

Технико-экономические характеристики рассматриваемой микро-ГЭС могут быть улучшены по сравнению с базовым вариантом – автобалластной микро-ГЭС – с помощью силовых преобразовательных устройств – инверторов и аккумуляторных накопителей электрической энергии. Инверторная микро-ГЭС позволяет управлять энергетическим балансом автономного энергетического комплекса, стабилизируя мощность гидрогенерации на номинальном уровне в соответствии с установленной мощностью гидроагрегата. Стабилизация достигается корректировкой мощности гидрогенератора добавлением к текущей мощности нагрузки мощности заряда аккумуляторов и необходимой мощности балласта:

$$P_H = P_{ГГ} - P_B - P_{АБЗ} + P_{АБР}$$

при условии $P_{ГГ} = \text{const}$, где P_H , $P_{ГГ}$, P_B , $P_{АБЗ}$, $P_{АБР}$ – соответственно, мощность нагрузки, мощность гидрогенерации, мощность балласта, мощности заряда или разряда аккумуляторной батареи. Аккумуляторы должны запасать электроэнергию гидрогенератора в часы, когда гидрогенерация позволяет обеспечивать электропотребление нагрузки и заряд оптимальной мощностью аккумуляторов и отдавать её потребителю в часы пиковой нагрузки, дополняя номинальный уровень генерации до пиковой нагрузки [16].

Это позволяет осуществлять электроснабжение потребителей, мощность которых превышает установленную мощность гидроагрегата микро-ГЭС без его перегрузки. По сравнению с базовой станцией с балластным регулированием, максимальная мощность нагрузки которой не может превышать номинальную мощность гидроагрегата, инверторная микро-ГЭС с системой аккумулирования электроэнергии может улучшить технико-экономические характеристики базовой микро-ГЭС за счёт аккумуляторов, позволяющих покрывать пиковые нагрузки большей мощностью.

Алгоритм расчётов рабочих режимов системы электропитания представлен на рис. 10. Исходными данными для алгоритма являются номинальная мощность гидрогенератора $P_{ГГ}$ и текущая почасовая мощность электрических нагрузок на начальный момент времени в соответствии с суточным графиком электропотребления P_H . Начальный момент времени может выбираться произвольно. Исходное состояние батареи аккумуляторов определяется величиной её заряда $C_{аб}$, которая может задаваться произвольно. Параметры, ограничивающие режимы работы аккумуляторной батареи: оптимальная мощность заряда $P_{зм}$, максимальный C_{max} и минимальный C_{min} уровень заряда аккумуляторной батареи в соответствии с рекомендациями для конкретных типов аккумуляторов.

К целевым функциям алгоритма относятся: определение максимально возможного превышения энергоотдачи рассматриваемой инверторной микро-ГЭС относительно базовой микро-ГЭС автобалластного типа на примере нагрузки с суточным графиком, соответствующим сельскому бытовому потребителю; минимизация ёмкости аккумуляторного накопителя электроэнергии; обеспечение приоритетного использования в качестве балластной нагрузки гидроагрегата зарядной мощности аккумуляторов.

Возмущающим воздействием, определяющим управляющие воздействия алгоритма, является суточный график электропотребления объекта электрификации.

Управляющими параметрами алгоритма являются управляемые балласты электрохимического и резистивного типов.

Режимы функционирования алгоритма определяются соотношением номинальной мощности гидрогенератора и текущей в соответствии с графиком электрических нагрузок для рассматриваемого часа суток, а также состоянием заряда аккумуляторов.

Если текущая мощность нагрузки меньше, чем уставка гидрогенератора: $P_n < P_{ГГ}$, то необходимая мощность поступает в нагрузку, а разница мощностей $P_{из}$, если она не превышает предельную мощность заряда аккумуляторов $P_{из} < P_{ЗМ}$ и состояние аккумуляторов $C_{аб} < C_{max}$, позволяет принять зарядную мощность, то мощность направляется на заряд батареи аккумуляторов. Зарядная мощность аккумуляторов также выполняет роль балластной нагрузки, стабилизируя режим работы гидрогенератора на уровне мощности $P_{ГГ} = P_n + P_{абз}$. Если аккумуляторы не в состоянии принять излишнюю мощность генератора, то часть её, превышающая зарядную, отправляется в тепловой балласт $P_б$, обеспечивающий вместе с зарядной мощностью аккумуляторов стабилизацию тормозного момента генератора, частоты вращения и генерируемой мощности гидроагрегата: $P_{ГГ} = P_n + P_{абз} + P_б$.

Если текущая мощность нагрузки превышает номинальную стабилизируемую мощность гидрогенератора, то генератор продолжает работать в номинальном режиме на мощности $P_{ГГ}$, балласт отключается (если он был в работе), а контроллер заряда-разряда аккумуляторной батареи, если её заряд больше минимально допустимого, переводит её в режим разряда, дополняя номинальную мощность гидрогенерации $P_{ГГ}$ разрядной мощностью аккумуляторов $P_{АБР}$ до необходимой для покрытия пиковой нагрузки P_n . Режим работы гидрогенератора при этом остаётся стабильным, определяемым мощностью генератора $P_{ГГ} = P_n - P_{АБР}$ [17].

Если уровень заряда аккумуляторов снижается до уровня меньше допустимого, то происходит отключение нагрузки и генерируемая мощность поступает на заряд аккумуляторов и балластную нагрузку.

Последовательный анализ состояния инверторной микро-ГЭС в соответствии с суточным графиком нагрузки позволяет оптимизировать её состав и режимы работы энергетического оборудования.

Экономическая целесообразность построения рассматриваемой микро-ГЭС достигается если увеличение её производительности приведёт к снижению себестоимости генерируемой электроэнергии относительно базовой промышленной микро-ГЭС, несмотря на увеличение стоимости её энергетического оборудования за счёт дополнительных затрат на инвертор и батарею аккумуляторов.

Реализация предлагаемого алгоритма функционирования инверторной микро-ГЭС с аккумуляторным накопителем и балластной системой управления гидроагрегатом с целью исследования возможностей повышения коэффициента использования установленной мощности базового генерирующего оборудования целесообразна в виде компьютерной модели. Численный эксперимент проведён с использованием характеристик промышленного образца микро-ГЭС ПР-10 «МНТО ИНСЭТ» с установленной мощностью 10 кВт [18].

Компьютерная модель формируется как последовательность рабочих режимов автономной системы электроснабжения в течение характерных суток с интервалом дискретизации один час. Энергетические характеристики гидроагрегата выбранной микро-ГЭС в номинальном режиме приведены в табл. 1, где обозначены H – напор воды (м), n – частота вращения гидроагрегата (об/мин), $P_{агр}$ – номинальная мощность генератора (кВт), P_t – номинальная мощность турбины (кВт), Q – расход воды (м³/с), η_t – коэффициент полезного действия турбины, $\eta_{агр}$ – коэффициент полезного действия генератора.

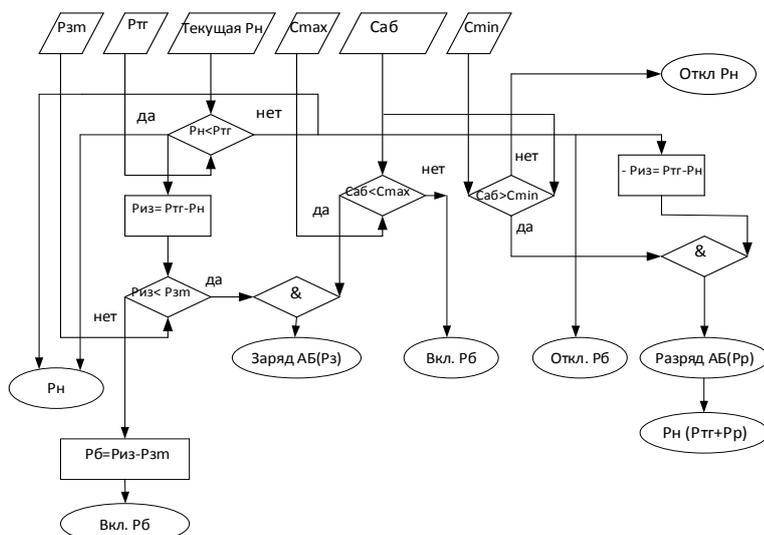


Рис. 10. Логическая структура алгоритма функционирования инверторной микро-ГЭС
 Fig. 10. Logical structure of the algorithm for the inverter microelectric power station operation

Таблица 1. Характеристики гидроагрегата ПР-10 АОЗТ МНТО ИНСЭТ

Table 1. Characteristics of the PR-10 AOZT MNTO INSET hydraulic unit

n=1500 об/мин/грп						
H	n	Q	P _т	P _{агр}	η _т	η _{агр}
10	1545	0,142	11,7	10,5	0,81	0,9
9	1540	0,139	9,8	8,8	0,80	0,9
8	1535	0,138	8,7	7,9	0,81	0,9
7	1530	0,136	7,6	6,8	0,81	0,9
6	1525	0,133	6,2	5,5	0,79	0,9
5	1520	0,130	4,6	4,1	0,72	0,9

Важным элементом микро-ГЭС является напорный трубопровод – наиболее дорогой элемент энергоустановки. Это обстоятельство определяет необходимость его расчёта с учётом потери напора воды для микро-ГЭС за счёт гидравлического трения.

Величина гидравлических потерь в напорном трубопроводе H_n [м] определяется по формуле Дарси–Вейсбаха

$$H = \frac{\lambda \cdot l \cdot V^2}{2 \cdot d \cdot g},$$

где l – длина напорного трубопровода [м]; λ – коэффициент гидравлического трения; d – внутренний диаметр напорного трубопровода [м]; V – скорость потока воды в трубопроводе [м/с]:

$$V = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d^2},$$

Q – расход воды м³/с; λ – коэффициент гидравлического трения – определяется по формуле Шифрисона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{0,25},$$

где k – абсолютная шероховатость трубы [мм]. Формула Шифрисона справедлива при условии: $Re > 500 \cdot (d/k)$, где Re – число Рейнольдса, при 20 °С кинематическая вязкость воды $\nu = 1,004 \cdot 10^{-6}$, м²/с:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}.$$

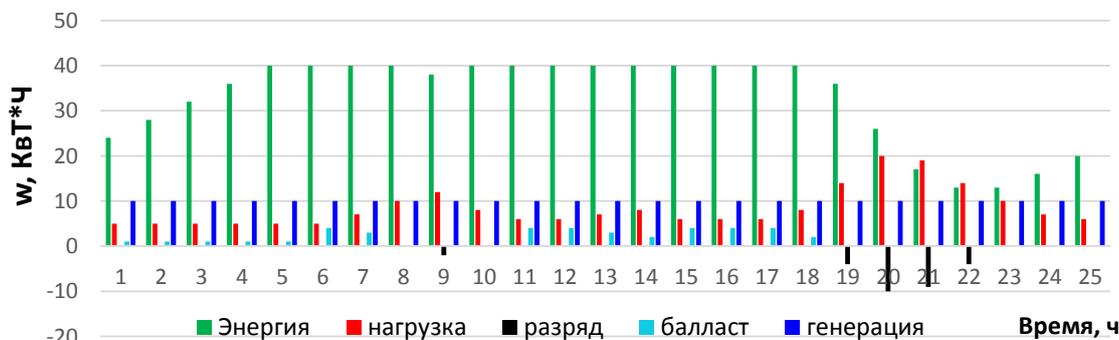


Рис. 12. Диаграмма энергетического баланса автономной системы электроснабжения с инверторной микро-ГЭС, накопителем и балластом

Fig. 12. Diagram of energy balance of an autonomous power supply system with an inverter microelectric power station, storage and ballast

Стоимость стального напорного трубопровода для выбранной базовой микро-ГЭС при различных напорах с учётом гидравлических потерь и уклонов русла водотока показана на рис. 11.

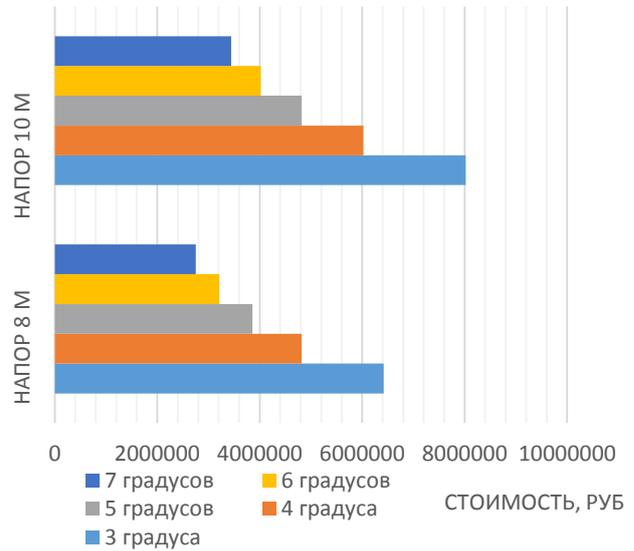


Рис. 11. Диаграмма стоимости напорного трубопровода в зависимости от величины напора и уклона русла водотока

Fig. 11. Diagram of a pressure pipeline cost depending on pressure and slope of a watercourse bed

Результаты моделирования суточных энергетических балансов автономной системы электроснабжения с рассматриваемой инверторной микро-ГЭС в графическом виде приведены на рис. 12. На данном графике видны почасовые изменения суточного энергетического баланса, включающего энергию нагрузки, энергию заряда и разряда аккумуляторных батарей, энергию, преобразуемую в тепло на резистивном балласте и энергию гидрогенерации.

Таблица 2. Сравнительный технико-экономический анализ разных конфигураций микро-ГЭС на основе базового комплекта Микро-ГЭС ПР-10 АОЗТ «МНТО ИНСЭТ»

Table 2. Comparative technical and economic analysis of different configurations of micro-hydroelectric power stations based on the basic set of Micro-hydroelectric power plants PR-10 AOZT "MNTO INSET"

Показатели Indicators	микро-ГЭС/microelectric power station		
	с балластной нагрузкой with ballast load	с балластной нагрузкой и инвертором with ballast load and inverter	с балластной нагрузкой, инвертором и накопителем энергии with ballast load, inverter and energy storage device
Полные затраты, всего, р. Total costs, rub.	850000	1147000 (297000 стоимость инвертора) Inverter cost	3940280 (1943280 стоимость АКБ) Battery cost
Стоимость стального трубопровода р. Steel pipeline cost, rub.	4817000		
КИУМ по электроэнергии Installed capacity utilization factor of electricity	0,46	0,46	0,98
Показатели качества электроэнергии Electricity quality indicators	Отраслевой стандарт Industry standard	ГОСТ 32144-2013 SS 32144-2013	ГОСТ 32144-2013 SS 32144-2013
Пиковая мощность нагрузки, кВт Peak load power, kW	10	10	20

Исходя из представленных данных, энергетический баланс системы электроснабжения с рассматриваемой микро-ГЭС удовлетворяет потребностям объекта в электроэнергии в течение суток. За счет аккумуляторного накопителя электроэнергии система позволяет обеспечить двукратную пиковую нагрузку потребителя относительно установленной мощности гидроагрегата при принятом допустимом разряде аккумуляторов в 30 %. При этом гидроагрегат постоянно работает в своём номинальном режиме.

Сравнительные основные технико-экономические характеристики разных типов балластных микро-ГЭС, питающих типового сельского потребителя, приведены в табл. 2.

Исходными данными для табл. 2 выбраны: стоимость оборудования Микро-ГЭС-10ПР составляет 850 тыс. р., стоимость стального напорного трубопровода диаметром 300 мм и длиной 114 м для обеспечения напора 10 м для местности с уклоном русла водотока в 5 градусов равна 4 млн 817 тыс. р. [19].

В качестве силового модуля – трехфазный инвертор «Импульс форвард 3310» мощностью 10 кВт и стоимостью 297000 р. [20].

При выборе аккумуляторов для накопительного устройства учитывалась возможность их быстрой зарядки с использованием больших токов, а также стойкость в циклическом режиме с учётом ограничений на глубину разряда. Стоимость одного блока аккумулятора составляет 16194 р. [21].

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO₄) в значительной степени отвечают этим требованиям [22]. Степень разрешенного разряда LiFePO₄ может изменяться в зависимости от бренда и конкретного типа аккумулятора. Однако для продления ресурса аккумуляторов рекомендуется ограни-

чивать разряд на уровне 30 % от номинальной ёмкости LiFePO₄ батареи [23, 24].

Заключение

Микрогидроэлектростанции с нерегулируемыми гидротурбинами и управлением по цепи якоря гидрогенератора имеют в настоящее время наибольшее распространение. Их модификации: автобалластного типа, автобалластные с инвертором, автобалластные с инвертором и накопителем электроэнергии, обладают различными ценовыми и эксплуатационными характеристиками и могут гарантированно обеспечить потребителя электроэнергией различного качества.

Инверторные микро-ГЭС, кроме генерирования высококачественной электроэнергии, позволяют рационально использовать энергетический потенциал водотока за счёт применения технологии поиска точки максимальной мощности обратной характеристики гидроагрегата.

Для поиска точки максимальной мощности гидроагрегата определена дискретизация балласта для шагов сканирования его обратной характеристики. Шаг по мощности может составлять величину в пределах 10 %, а временной интервал в зависимости от установленной мощности гидроагрегата – от 0,15 до 0,35 с.

Инверторные микро-ГЭС с аккумуляторным накопителем электроэнергии позволяют увеличить электрический коэффициент использования установленной мощности базового гидроагрегата практически до единицы за счёт использования зарядной мощности аккумуляторов в качестве электрохимического балласта в отличие от резистивных балластов, безвозвратно преобразующих балластную мощность в тепло.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology / J.A. Laghari, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, H. Mohammad // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 20. – P. 279–293.
2. Выбор источников генерации для использования в микросетях на основе ВИЭ / В.В. Харченко, В.А. Гусаров, В.Б. Адомавичюс, И.Ю. Валицкас // *Научный вестник Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Сборник научных трудов*. – 2016. – № 240. – С. 31–43.
3. Participation of load aggregator in grid frequency stabilization with consideration of renewable energy resources integration / E. Mudaheranwa, H. Berkem Sonder, Ye-Obong Udoakah, L. Cipcigan, C.E. Ugalde-Loo // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9. – P. 3967–3988.
4. Optimal sizing of micro hydropower to improve hybrid renewable power system / Syafii, Heru Dibyo Laksono, Novizon, Rahmad Fahreza // *7th International Conference on Electrical Engineering, Computer Sciences and Informatics (EECSI)*. – Yogyakarta, Indonesia, 2020. – P. 95–99. DOI: 10.23919/EECSI50503.2020.9251911.
5. Sabita Tripathy, Manoj Kumar Debnath, Sanjeeb Kumar Kar. Optimal design of PI/PD dual mode controller based on quasi opposition based learning for power system frequency control // *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. – 2023. – № 4. – P. 100–135.
6. Попов М.М. Повышение технико-экономической эффективности микроГЭС деривационного типа. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. – 66 с.
7. Сравнительный анализ гидрометеорологических наблюдений Росгидромета и автономного измерительного комплекса «Майма» в бассейне р. Майма (Горный Алтай) / В.В. Зуев, Е.М. Короткова, В.А. Уйманова, С.А. Кураков // *Водное хозяйство России*. – 2018. – № 5. – С. 65–74.
8. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2013. – Vol. 28. – № 2. – P. 452–459.
9. Курилин С.П., Денисов В.Н. Особенности конструктивного исполнения и проектирования синхронных генераторов для микро-ГЭС // *Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ*. – 2019. – № 4. – С. 78–84.
10. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Фазорегулируемые автобалластные системы стабилизации выходных параметров микрогэс // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 113–118.
11. Бляшко Я.И. Опыт МСО ИНСЭТ по созданию и эксплуатации оборудования для микро- и малых ГЭС // *Малая энергетика*. – 2004. – № 1. – С. 26–29.
12. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
13. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М. Режимы работы микрогидроэлектростанции со стабилизацией выходного напряжения при помощи управления инвертором // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 51–58.
14. Ефимова О.Н., Утеулина Ж.Б. Многофункциональный инвертор с источником напряжения для интеграции возобновляемых источников энергии и обеспечения качества электроэнергии // *The Scientific Heritage*. – 2023. – № 115. – С. 40–56.
15. Optimal design capacitive energy storage (ces) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm / Machrus Ali, Muhammad Ruswandi Djalal, Muhammad Fakhrurozi, Kadaryono, Budiman, Dwi Ajiatmo // *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*. – Batu, Indonesia, 2018. – P. 21–26.
16. Обухов С.Г., Плотников И.А., Сарсикеев Е.Ж. Буферная система накопления электроэнергии для возобновляемой энергетики // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2012. – № 9 (113). – С. 137–141.
17. Лукутин Б.В., Попов М.М. Повышение технико-экономической эффективности инверторной микрогидроэлектростанции деривационного типа // *Омский научный вестник*. – 2023. – № 3 (187). – С. 68–76.
18. Ассортимент оборудования, производимого МНТО ИНСЭТ // МНТО ИНСЭТ. URL: <https://ersd.narod.ru/gidro6.htm> (дата обращения 15.01.2024).
19. Металлопрокат, металл и сталь // Металл и сталь. URL: <https://metallas.ru> (дата обращения 15.01.2024).
20. Промышленные источники бесперебойного питания. URL: <https://www.bespereboynik.ru> (дата обращения 15.01.2024).
21. Литиевые батареи LFP4 // LFP. URL: <https://lfp4.ru> (дата обращения 15.01.2024).
22. Safwat I.M., Li W., Wu X. A novel methodology for estimating state-of-charge of Li-ion batteries using advanced parameters estimation // *Energies*. – 2017. – № 11 (10). – С. 1751–1767.
23. Li-ion battery materials: present and future / N. Nitta, F. Wu, T. Jung, G. Yushin // *Materials today*. – 2015. – № 18 (5). – P. 252–264.
24. Online state of charge and state of health estimation for a lithium-ion battery based on a data-model fusion method / Z. Wei, F. Leng, Z. He, W. Zhang, K. Li // *Energies*. – 2018. – № 7 (11). – P. 1810–1826.

Информация об авторах

Борис Владимирович Лукутин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. lukutin48@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2049-6635>

Елена Борисовна Шандарова, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политех-

нический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shandarovaelena@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

Михаил Михайлович Попов, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mix_mix13@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4272-026X>

Поступила в редакцию: 10.02.2024

Поступила после рецензирования: 06.03.2024

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Laghari J.A., Mokhlis H., Bakar A.H.A., Mohammad H. A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 20, pp. 279–293.
2. Harchenko V.V., Gusarov V.A., Adomavichyus V.B., Valickas I.Yu. Selection of generation sources for use in microgrids based on RES. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine*, 2016, no. 240, pp. 31–43. (In Russ.)
3. Mudaheranwa E., Berkem Sonder H., Ye-Obong Udoakah, Cipcigan L., Ugalde-Loo C.E. Participation of load aggregator in grid frequency stabilization with consideration of renewable energy resources integration. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, pp. 3967–3988.
4. Syafii, Heru Dibyo Laksono, Novizon, Rahmad Fahreza. Optimal sizing of micro hydropower to improve hybrid renewable power system. *7th International Conference on Electrical Engineering, Computer Sciences and Informatics (EECSI)*. Yogyakarta, Indonesia, 2020. pp. 95–99.
5. Sabita Tripathy, Manoj Kumar Debnath, Sanjeeb Kumar Kar. Optimal design of P/PI dual mode controller based on quasi opposition-based learning for power system frequency control. *E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2023, no. 4, pp. 100–135.
6. Popov M.M. *Improving the technical and economic efficiency of microelectric power plants of a derivational type*. Ufa, Limited Liability Company "Scientific Publishing Center "Bulletin of Science", 2023. 66 p. (In Russ.)
7. Zuev V.V., Korotkova E.M., Uymanova V.A., Kurakov S.A. Comparative analysis of hydrometeorological observations of Roshydromet and the autonomous measuring complex "Maima" in the Maima River basin (Gorny Altai). *Water management of Russia*, 2018, no. 5, pp. 65–74. (In Russ.)
8. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed IEEE. *Transactions on Energy Conversion*, 2013, vol. 28, no. 2, pp. 452–459.
9. Kurilin S.P., Denisov V.N. Features of the design and design of synchronous generators for micro hydroelectric power plants. *MEI bulletin*, 2019, no. 4, pp. 78–84. (In Russ.)
10. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Phase adjustable auto ballast systems for stabilization of output parameters of micro hydro power plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 4, pp. 113–118. (In Russ.)
11. Blyashko Ya.I. Experience of MSO INSET on the creation and operation of equipment for micro and small hydroelectric power plants. *Small power engineering*, 2004, no. 1, pp. 26–29. (In Russ.)
12. Lukutin B.V., Obuhov S.G., Shandarova E.B. *Autonomous power supply from Microhydro power plants*. Tomsk, STT, 2001. 120 p. (In Russ.)
13. Lukutin B.V., Shandarova E.B., Popov M.M. Modes of operation of a microhydroelectric power plant with output voltage stabilization using inverter control *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 51–58. (In Russ.)
14. Efimova O.N., Uteulina Zh.B. Multifunctional inverter with a voltage source for the integration of renewable energy sources and ensuring the quality of electricity. *The Scientific Heritage*, 2023, no. 115, pp. 40–56. (In Russ.)
15. Machrus Ali, Muhammad Ruswandi Djalal, Muhammad Fakhrurozi, Kadaryono, Budiman, Dwi Ajiatmo. Optimal design capacitive energy storage (ces) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm. *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*. Batu, Indonesia, 2018. pp. 21–26.
16. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Sarsikeev E.J. Buffer system of electricity storage for renewable energy. *Alternative energy and ecology*, 2012, no. 9 (113), pp. 137–141. (In Russ.)
17. Lukutin B.V., Popov M.M. Improving the technical and economic efficiency of an inverter microhydroelectric power plant of a derivational type. *Omsk Scientific Bulletin*, 2023, no. 3 (187), pp. 68–76. (In Russ.)
18. The range of equipment produced by MNTO INSET. *MNTO INSET*. (In Russ.) Available at: <https://ersd.narod.ru/gidro6.htm> (accessed 15 January 2024).
19. Rolled metal, metal and steel. *Metal and steel*. (In Russ.) Available at: <https://metallas.ru> (accessed 15 January 2024).
20. *Industrial uninterruptible power supplies*. (In Russ.) Available at: <https://www.bespereboynik.ru> (accessed 15 January 2024).
21. Lithium batteries LFP4. *LFP* (In Russ.) Available at: <https://lfp4.ru> (accessed 15 January 2024).
22. Safwat I.M., Li W., Wu X. A novel methodology for estimating state-of-charge of li-ion batteries using advanced parameters estimation. *Energies*, 2017, no. 11 (10), pp. 1751–1767.
23. Nitta N., Wu F., Jung T., Yushin G. Li-ion battery materials present and future. *Materials today*, 2015, no. 18 (5), pp. 252–264.
24. Wei Z., Leng F., He Z., Zhang W., Li K. Online state of charge and state of health estimation for a lithium-ion battery based on a data–model fusion method. *Energies*, 2018, no. 7 (11), pp. 1810–1826.

Information about the authors

Boris V. Lukutin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. lukutin48@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2049-6635>

Elena B. Shandarova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shandarovaelena@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

Mikhail M. Popov, Senior Lecturer National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mix_mix13@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4272-026X>

Received: 10.02.2024

Revised: 06.03.2024

Accepted: 19.04.2024

UDC 631.459.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4289

Estimation of erosion-deposition trends across the Quang Nam coast in the background of the climate variability

Nguyen Tien Thanh✉

Vietnam National University of Science, Ho Chi Minh City, Vietnam

✉ntthanh@hcmus.edu.vn

Abstract. Relevance. In the face of current climate change trends, coastal erosion occurs more frequently in coastal lands. This problem not only causes damage to houses and works, but also affects the lives of coastal people. Quang Nam has a coastline of 125 km, which is an area that has been seriously eroded under the impact of hydrodynamic factors, along with extreme weather phenomena, affecting people's lives, and degrade the local economy. **Aim.** This article presents research on shoreline changes in Quang Nam region using the method of integrating remote sensing and GIS to create a change map. From there, identify erosion and deposition areas to help management agencies pay attention to the protection and development orientation of Quang Nam province in the context of climate change. **Methods.** Shoreline extraction method in combination with GIS to calculate the coastline change and combines with storm statistics to assess the shoreline change. **Results.** In the whole study area, erosion is dominant over deposition. Erosion is concentrated mainly in An Bang, North Cua Dai, Duy Hai and Tam Tien areas, ranging from 3.9–9.2 m/year. Deposition is concentrated mainly in the areas south of Cua Dai and Tam Hoa (near the mouth of Truong Giang river). In addition, the analysis results of shoreline changes in Quang Nam area, when combined with storm data affecting this area, also show a positive correlation. Research results can contribute useful information to local authorities to have solutions for planning and managing coastal areas.

Keywords: shoreline extraction, GIS, erosion, deposition, Quang Nam, MNDWI

Acknowledgements: This research is funded by University of Science, VNU-HCM under grant number T2022-49. In addition, we wish to express our sincere thanks to the anonymous reviewers for their valuable comments, which helped us to improve this draft.

For citation: Nguyen Tien Thanh. Estimation of erosion- deposition trends across the Quang Nam coast in the background of the climate variability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 172–181. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4289

УДК 631.459.2
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4289

Оценка тенденций эрозии и аккреции на побережье Куанг Нама на фоне изменчивости климата

Нгуен Тьен Тхань✉

Вьетнамский национальный университет науки, Вьетнам, г. Хошимин

✉ntthanh@hcmus.edu.vn

Аннотация. Актуальность. Перед лицом нынешних тенденций изменения климата береговая эрозия чаще происходит на прибрежных землях. Эта проблема не только наносит ущерб домам и сооружениям, но и влияет на жизнь прибрежных жителей. Береговая линия Куанг Нама составляет 125 км и является районом, подвергшимся серьезной эрозии под воздействием гидродинамических факторов, наряду с экстремальными погодными явлениями, влияющими на жизнь людей и ухудшающими местную экономику. **Цель.** Используются изображения дистанционного зондирования за 2016–2022 гг. для анализа изменений береговой линии путем интеграции методов (Digital Shoreline Analysis System–DSA) с ГИС, дистанционным зондированием и использованием значений индекса MNDWI для выде-

ления береговых линий. **Методы:** метод выделения береговой линии в сочетании с ГИС для расчета изменения береговой линии в сочетании со статистикой штормов для оценки изменения береговой линии. **Результаты** показывают, что на всей исследуемой территории эрозия преобладает над осаджением, эрозия сосредоточена в основном в районах Ан Банг, Северный Куа Дай, Дуй Хай и Там Тянь в пределах 3,9–9,2 м/год, в то время как осаджение сосредоточено в основном в районах к югу от Куа Дай и Там Хоа (недалеко от устья реки Чыонг Джанг). Кроме того, результаты анализа изменений береговой линии в районе Куанг Нам в сочетании с данными о штормах, воздействующих на этот район, также показывают положительную корреляцию. Результаты исследований могут предоставить полезную информацию местным органам власти для выработки решений по планированию прибрежных районов и управлению ими.

Ключевые слова: выделение береговой линии, ГИС, эрозия, срастание, Quang Nam, MNDWI

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Вьетнамского национального университета науки (грант № T2022-49). Автор благодарит рецензента за полезные комментарии, которые помогли улучшить статью.

Для цитирования: Нгуен Тьен Тхань. Оценка тенденций эрозии и аккумуляции на побережье Куанг Нама на фоне изменчивости климата // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 172–181. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4289

Introduction

Climate change and sea level rise have exacerbated the impacts of natural disasters, while also increasing the negative effects of inundation and coastal erosion in lowland and coastal areas. Coastal erosion is now a global problem. In addition, sea level rise and negative impacts caused by human activities have been exacerbating the risk of coastal erosion and increasing environmental burden in coastal areas [1]. The shoreline change is determined to be due to the combined influence of natural processes (river morphology, geological structure, flow...) and man-made processes (sand extraction, navigation, construction, building dams, reservoirs upstream...) causing erosion or deposition [2].

Quang Nam boasts a 125 km coastline and numerous estuaries, making it a region with significant potential for tourism development and playing an important role in socio-economic growth. In recent years, due to extreme weather conditions, the rainy season is affected by the northeast monsoon, tropical depression and often storms, these factors have a strong impact on the coastal area of Quang Nam province, causing very serious erosion affecting the lives of people in coastal areas [3]. Therefore, monitoring the shoreline change in Quang Nam is necessary for the sustainable management of the coastline in this area in the context of climate change.

Coastal change monitoring technology is widely applied in the world, at present, there have been many studies using remote sensing data to classify land water from multi-time satellite images combined with geographic information system (GIS), and then superimposed to identify and evaluate shoreline changes. Specifically, the authors in used Landsat images combined with GIS to study shoreline changes in the Göksu estuary from 1984 to 2011 [4]. And the authors of extracted shorelines from multi-temporal (7 ETM+) satellite images combined with GIS to study the change of Ma-

rina coastline from 2009 to 2019 [5]. Abdoul et al studied and The research presents the Yanbu coastline change from 1965 to 2019 using Landsat and GIS satellite images [6].

Besides, there have been a lot of studies on shoreline changes done in Vietnam in recent years. Specifically, Nhan et al. calculated the changing speed and trend of the Red River bank from Son Tay to Gia Lam area (Hanoi) using remote sensing images for the period 2007–2016 combined with GIS [7]. Tuan et al. used water indices such as NDWI, MNDWI, AWEI from Landsat 8 remote sensing images to determine water and land boundaries on the West coast of Vietnam [8]. Mau et al. used remote sensing images combined with shoreline survey by DGPS–Promark2, the results show that the erosion rate is higher than the deposition rate in Cua Dai area, mainly due to construction works and impacts of wave [9]. Cham et al. used remote sensing in combination with Delft3D and Mike 11 models to determine the cause and mode of erosion and deposition in Cua Dai area, showing that the process of erosion-deposition occurs in the Northeast winter with the cause of impacts wave motion of the northeast monsoon with wave height of approximately five meters with a frequency of more than 70% [10]. Quang et al. used the Digital Coastal Analysis System (DSAS) technique to statistically calculate the rate of change of the Quang Nam coastline from 1990 to 2019, showing that the Quang Nam coast was eroded and deposited over the past three decades and erosion is most severe in the north of Cua Dai, while shoreline evolution is recorded in the southern region [11]. In the authors used Telemac model combined with hydrodynamic and wave module to study Cua Dai area, showing the main trend of currents and waves towards the south, leading to erosion especially in the northeast monsoon season and deposited in the estuary [12].

In general, the remote sensing method has shown to be effective in monitoring and assessing shoreline

changes over a large scale. Therefore, this paper aims to combine Landsat images with the statistics of storms affecting Quang Nam area, to monitor changes in the coastline of Quang Nam province in the context of climate change in the period from 2016 to 2022.

Research area and methods

Research area

Quang Nam is located at geographical coordinates 14°54' to 16°13' North latitude and 107°3' to 108°45' East longitude, has a natural area of 10,438 km² and a population of 1.46 million people (Fig. 1). The latitude is relatively low, so it receives a rich amount of radiation every year, and it is close to the sea, so it is affected by many different weather and climate factors such as the Northeast and Southwest seasons [13]. In addition, every year storms and low pressure affect Quang Nam at most 2–8 times, less than once a year. The strongest wind speed is from May to November in Tam Ky. In addition, the influence of sea level rise and the impact of climate change have been and are threats to the existence of Hoi An, My Son, and coastal works.

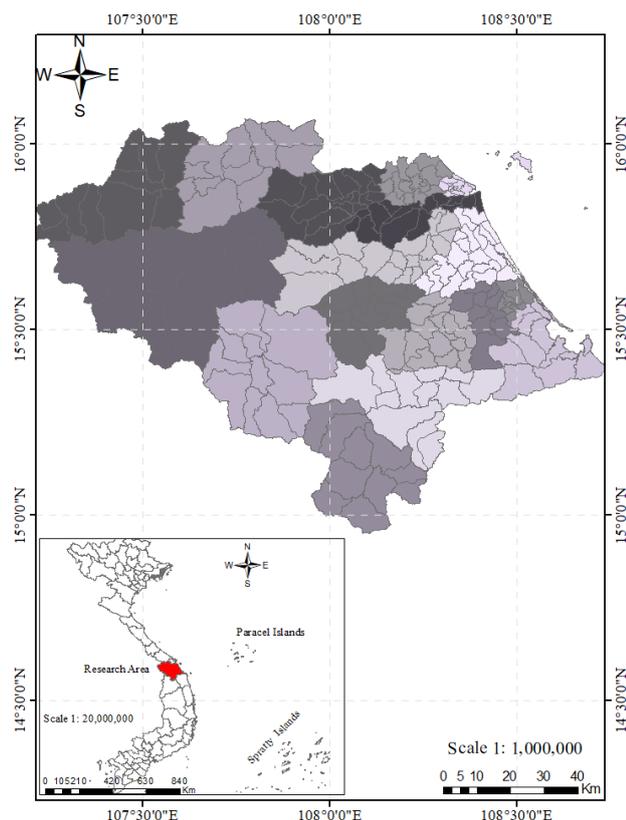


Fig. 1. Location of Quang Nam province

Рис. 1. Расположение провинции Куангнам

To calculate shoreline fluctuations, we divide the study area into three small areas. Cua Dai area from An

Bang to Duy Hai (area 1), Duy Hai to Tam Tien area (area 2) and Tam Tien to Tam Hoa area (area 3) (Fig. 2), in which the area 1 and 3 are the two areas directly affected by the estuary, while area 2 is the area not directly affected by the estuary.

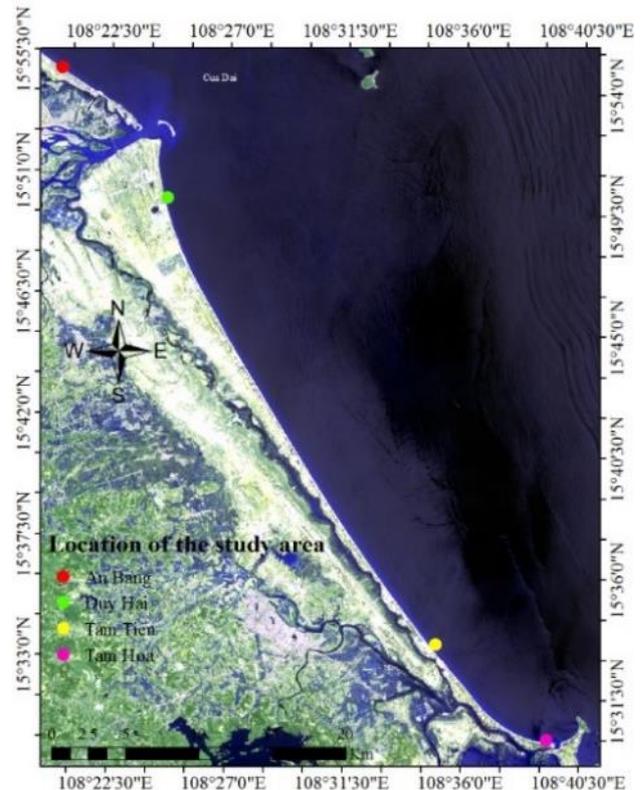


Fig. 2. Research area

Рис. 2. Область исследования

Data and methods

Data

The remote sensing data used in the study are Landsat 8 images that have been corrected and are referenced to the WGS-84 UTM coordinate system, specifically applicable to zone 48. The image quality is very good and less affected by clouds and fog. Landsat image data source is collected from the website of the United States Geological Survey with a resolution of 30 m. In addition to satellite image data, the study also uses Google Earth image data. This data source is usually very high resolution concentrated in urban areas (under 1m) used to process and compare with shoreline extraction results from remote sensing images. Storm data was collected on the KITAMOTO Asanobu website to compare with the shoreline evolution from remote sensing images (Table 1, 2).

Table 1. Collection of remote sensing images

Таблица 1. Сбор изображений дистанционного зондирования

Area Об- ласть	Collection of satel- lite images Сбор спутнико- вых снимков	Spatial resolution Пространственное разрешение	Images landsat Изобра- жения
Quang Nam	14/07/2016	30m	LC08
	17/05/2018	30m	LC08
	09/05/2020	30m	LC08
	13/06/2022	30m	LC08

Methods

The ENVI 5.1 tool is used in the research to process remote sensing images through the following steps:

1. *Geometric correction*: for eliminating the deviations that occur during image capture and return the image to standard coordinates that can be integrated with other data sources.
2. *Digital conversion to spectral reflectance value*: for reducing the discrepancy in spectral reflectance values of objects across various sensor types and images.
3. *Calculation of MNDWI* (modification of normalized difference water index): for clarifying two objects – water and land. The MNDWI index is calculated using the formula

$$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$$

For Landsat 8 OLI/TIRS images:

$$MNDWI = (Band 3 - Band 6) / (Band 3 + Band 6)$$

4. *Using the Reclassify tool in ArcGIS*: for dividing the threshold into two layers, land is the object with value 0 (black) and water has value 1 (white). Due to the limitation of actual survey data, the classification results are corrected with Google Earth images. The shoreline extraction results for each time period are superimposed with the Google Earth image of that time to check the shoreline classification results.
5. *Shoreline change analysis by applying DSAS*: DSAS (Digital Shoreline Analysis System) is a free software integrated with ArcGIS software (ESRI) with the function of analyzing changes in coastline. DSAS generates straight lines that are perpendicular to the baseline and intersect the coastline, which

calculates the rate of change of the coastline. The three basic steps of calculating shoreline change rates include:

- determination of baselines and shorelines;
- determination of length and distance between the transects (line perpendicular to the shoreline);
- calculation of the shoreline change rate.

These results are used to calculate and analyze shoreline changes in the study area.

Computation and threshold of the MNDWI

To identify erosion and deposition, it is necessary to separate the shoreline and monitor it over multiple time points. The study focuses on analyzing and processing satellite images based on indicators showing water characteristics. On satellite images, water has strong absorption and low radiation in the range visible to infrared wavelength. The normalized difference water index NDWI is determined based on the green wavelength region reflectance channel (GREEN) and the near-infrared wavelength region reflectance channel (NIR) as shown in the formula:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$$

This method has the advantage of detecting water in areas without built-up soil. However, the results, when using NDWI, are often confused between construction ground and water surface. In order to overcome the above-mentioned shortcomings of NDWI, the author in introduced the modification of normalized difference water index, MNDWI by shortwave infrared channel – SWIR (band 6) replaces the NIR channel used in the NDWI formula. In this study, Xu also demonstrated the superiority of MNDWI over NDWI by testing both formulations on three different environments, namely the coastal area of Xiamen City, Bayi Lake and Min River of China and gave results with accuracy up to 99% for all three environments. Xu's modified water difference index has the advantage of extracting water in areas with mainly built-up soil or alluvial soils, but has weaknesses in detecting water bodies with low water content high alluvial concentrations and in the waters surrounding the port [14–18]. Therefore, this study used the MNDWI index for shoreline extraction. The overall methodology is summarized in Fig. 3.

Table 2. Collection of data on storms that directly affect Quang Nam area

Таблица 2. Сбор данных о штормах, которые непосредственно влияют на район Куангнам

Year Год	Storms affect on Quang Nam area Влияние штормов на район Куангнам							
	2016	Mirinae	Rai	Sarika				
2017	Talas	Sonca	Doksuri	Damrey	Haikui			
2018	Ewiniar	Son-tinh	Bebinca	Toraji	Usagi			
2019	Mun	Wipha	Podul	Matmo	Nakri			
2020	Sinlaku	Noul	Linfa	Saudel	Molave	Goni	Etau	Vamco
2021	Koguma	Cempaka	Conson	Dianmu	Lionrock	Kompasu	Rai	

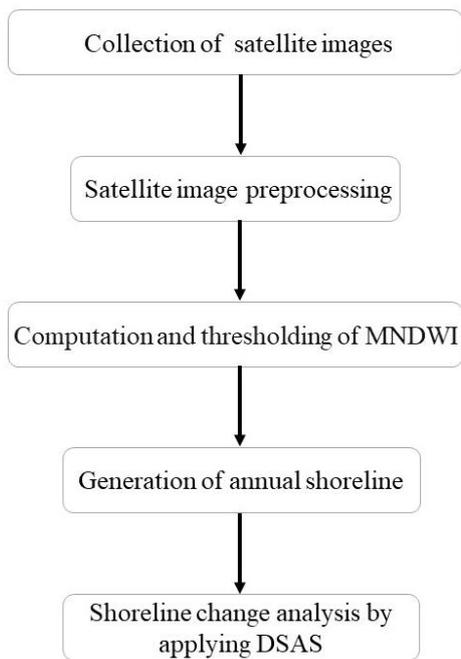


Fig. 3. Flowchart of the research
Рис. 3. Блок-схема исследования

Results and discussion

Shorelines change of area 1

The erosion situation in Quang Nam province in recent years has become more and more serious, especially in Cua Dai coastal area (Hoi An City). During the Northeast monsoon season, most of the coast in this section is directly affected by the impact of waves causing erosion–deposition. In the area from An Bang to North Cua Dai in the years from 2016 to 2022, the shoreline has erosion and deposition, but erosion is more dominant. Specifically, in the 2016–2018 period, the erosion rate was 9.2 m/year and the deposition was 5.1 m/year, in the 2018–2020 period, the erosion rate reached 4.5 m/year and the deposition rate was 3.2 m/year, and the period of 2020–2022 erosion was achieved 3.9 m/year and deposition 2.2 m/year. Erosion is concentrated mainly in An Bang beach area, north of Dai estuary, but the extent is decreasing over the years. From the south of Dai estuary to Duy Hai, erosion and deposition occur, but to a greater extent than from An Bang to the North of Cua Dai. Specifically, 2016–2018 – erosion 12.5 m/year and deposition 8.1 m/year, 2018–2020 – erosion 7.1 m/year and deposition 6.5 m/year, 2020–2022 – erosion 7.9 m /year and deposition 36.7 m/year. In general, erosion and deposition occur interlaced and concentrated mainly in the South Cua Dai area (Fig. 4–6, Table 3). The embankment section interspersed with embankments of coastal resorts running along Au Co street, from Cua Dai towards Da Nang for about 2 km was strongly eroded.



Fig. 4. Change of the area 1 shorelines, 2016–2018
Рис. 4. Изменение береговой линии района 1 в 2016–2018 гг.

The authors of showed that the erosion rate in the area from Dien Ngoc commune to Bac Cua Dai is about 9.31 m/year, the strongest erosion is about 18.6 m/year in the period 2005–2018, in addition, the trend of erosion also increased linearly over the years [19]. The research showed that all four beach areas: An Bang, Ha My, Cua Dai and Duy Hai (Binh Minh Beach), continued to experience erosion, the highest speed reached 120 m in An Bang area [20]. The authors of show that erosion takes place on a broader and more intense scale in the areas of Duy Hai commune [21]. And the research showed that the lowest value of EPR over the period 1990–2019 is –42.4 m/year, highlighting the most significant erosion at the north of Cua Dai estuary, whereas coastline advance is recorded in the south segment [11].

Table 3. Erosion and deposition rates in area 1 (m/year)

Таблица 3. Темпы эрозии и осаднения района 1 (м/год)

Period Период	An Bang–North Cua Dai		South Cua Dai–Duy Hải	
	Erosion Эрозия	Deposition Отложение	Erosion Эрозия	Deposition Отложение
2016–2018	9.2	5.1	12.5	8.1
2018–2020	4.5	3.2	7.1	6.5
2020–2022	3.9	2.2	7.9	36.7



Fig. 5. Change of the area 1 shorelines, 2018–2020
Рис. 5. Изменение береговой линии района 1 в 2018–2020 гг.



Fig. 6. Change of the area 1 shorelines, 2020–2022
Рис. 6. Изменение береговой линии района 1 в 2020–2022 гг.

Shorelines change of area 2

The coastline from Duy Hai to Tam Tien is in the form of erosion–deposition coast. In general, erosion and deposition occur alternately, but mainly still erosion. This coastal group has also been eroded before, but with low intensity. Due to the construction of the Tam Thanh sea embankment, the beach tends to be more stable, indicating a positive impact on erosion control in the area. Specifically, in 2016–2018, the erosion is 5.3 m/year and the deposition is 5.1 m/year, in 2018–2020, the erosion is 4.3 m/year and the deposition is 3.5 m/year. In 2020–2022, erosion will reach 5.1 m/year and deposition will reach 2.7 m/year (Fig. 7–9, Table 4). The research shows that the coastline, stretching from Duy Hai commune to Tam Tien commune, always has the phenomenon of erosion and deposition, taking place interlaced in space and time. However, in some sections, there are shore protection works but still damaged by waves during storms [21].

Table 4. Erosion and deposition rates in area 2 (m/year)

Таблица 4. Темпы эрозии и осаднения района 2 (м/год)

Period/Период	Duy Hai–Tam Tien	
	Erosion Эрозия	Deposition Отложение
2016–2018	5.3	5.1
2018–2020	4.3	3.5
2020–2022	5.1	2.7

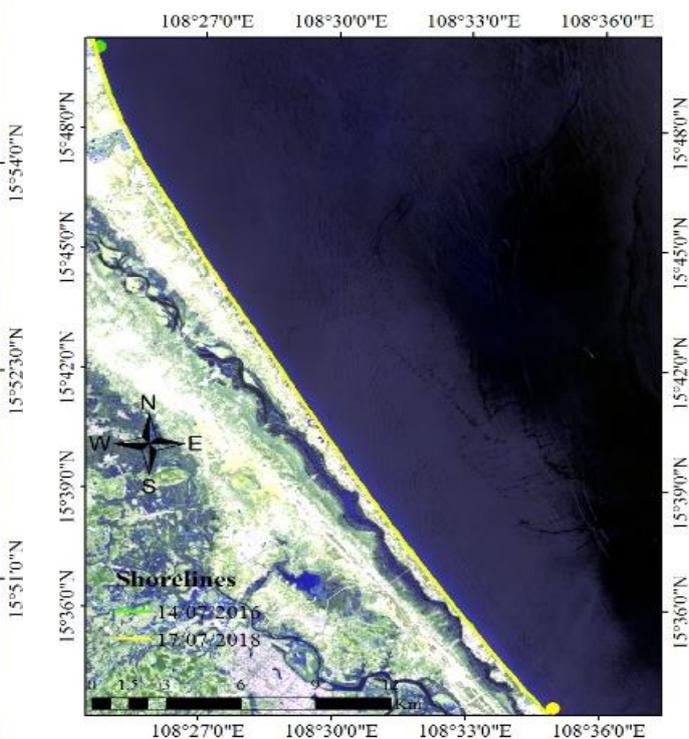


Fig. 7. Change of the area 2 shorelines, 2016–2018
Рис. 7. Изменение береговой линии района 2 в 2016–2018 гг.

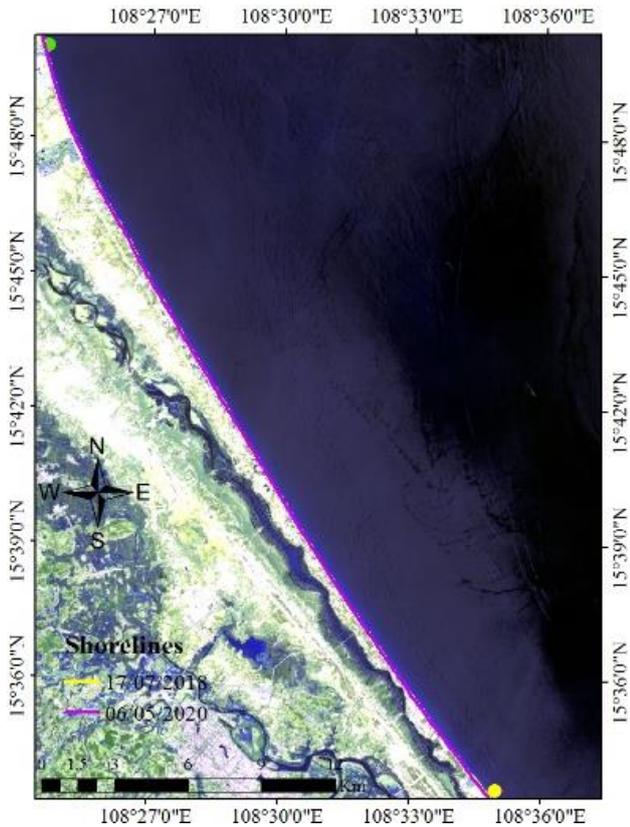


Fig. 8. Change of the area 2 shorelines, 2018–2020
Рис. 8. Изменение береговой линии района 2 в 2018–2020 гг.

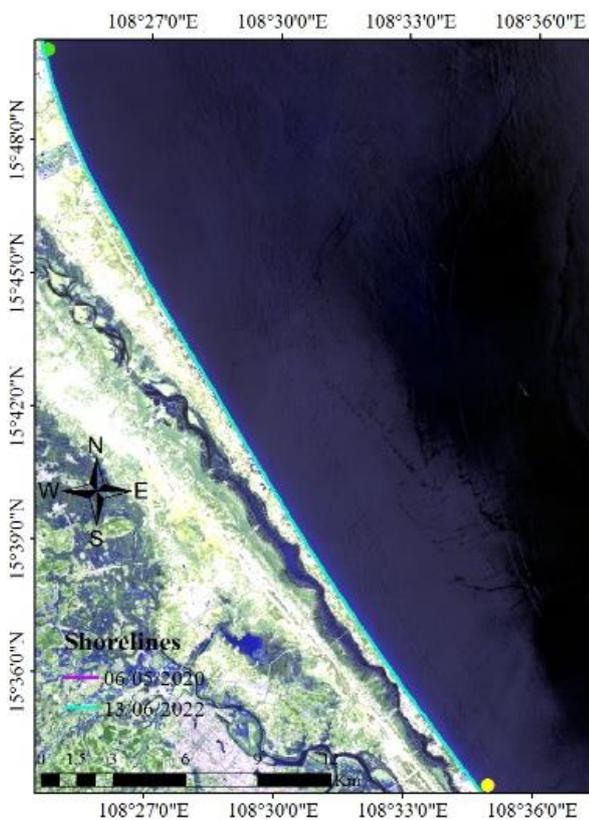


Fig. 9. Change of the area 2 shorelines, 2020–2022
Рис. 9. Изменение береговой линии района 2 в 2020–2022 гг.

Shorelines change of area 3

In the area from Tam Tien to Tam Hoa, erosion and deposition occurs alternately, but erosion still prevails over deposition. Specifically, 2016–2018 – erosion 4.4 m/year and deposition 4.3 m/year, 2018–2020 – erosion 4.8 m/year and deposition reached 4.6 m/year, 2020–2022 – erosion 5.9 m/year and deposition 3.6 m/year. In general, erosion increases gradually over the years, while deposition decreases gradually over the years, and deposition is concentrated mainly in Tam Hoa area (near the mouth of Truong Giang river) (Fig. 10–12, Table 5). The research shows that the coastal area of Tam Tien (Nui Thanh) has a landslide with a length of about 800 m. The recorded erosion rate ranges from 1.23 to –0.27 m/year [11].

In general, the coast of Quang Nam province always has a tendency of erosion–deposition, alternating between seasons of the year. In particular, in recent years, erosion has taken place with continuous frequency with strong intensity and increasingly fierce level.

Table 5. Erosion and deposition rates in area 3 (m/year)
Таблица 5. Темпы эрозии и осаднения района 3 (м/год)

Period Период	Tam Tien–Tam Hoa	
	Erosion/Эрозия	Deposition/Отложение
2016–2018	4.4	4.3
2018–2020	4.8	4.6
2020–2022	5.9	3.6

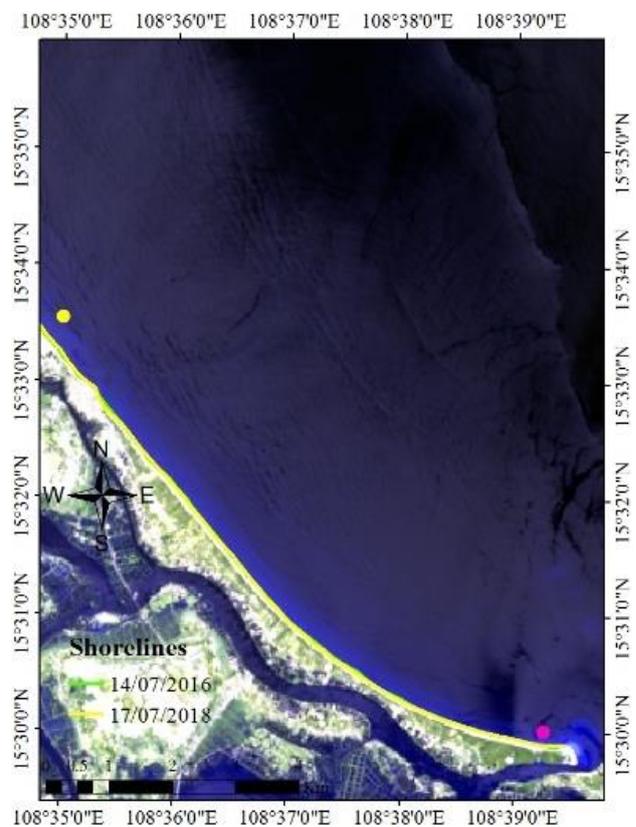


Fig. 10. Change of the area 3 shorelines, 2016–2018
Рис. 10. Изменение береговой линии района 3 в 2016–2018 гг.

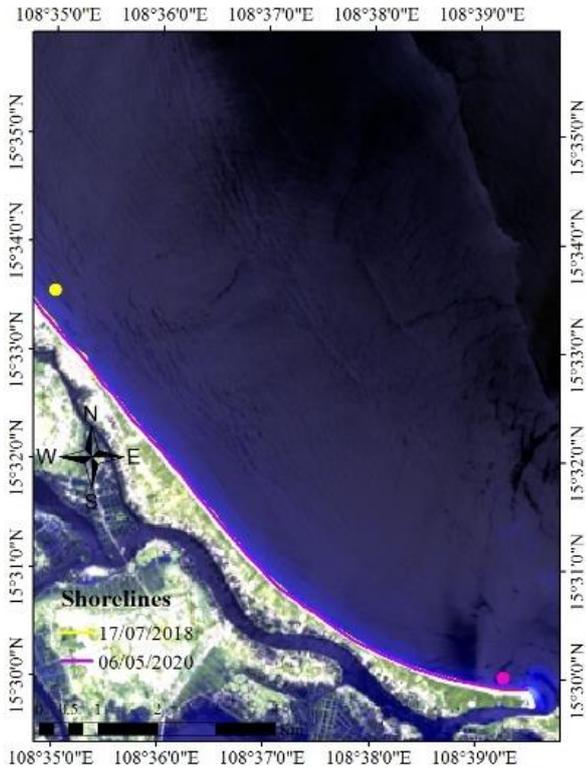


Fig. 11. Change of the area 3 shorelines, 2018–2020
Рис. 11. Изменение береговой линии района 3 в 2018–2020 гг.

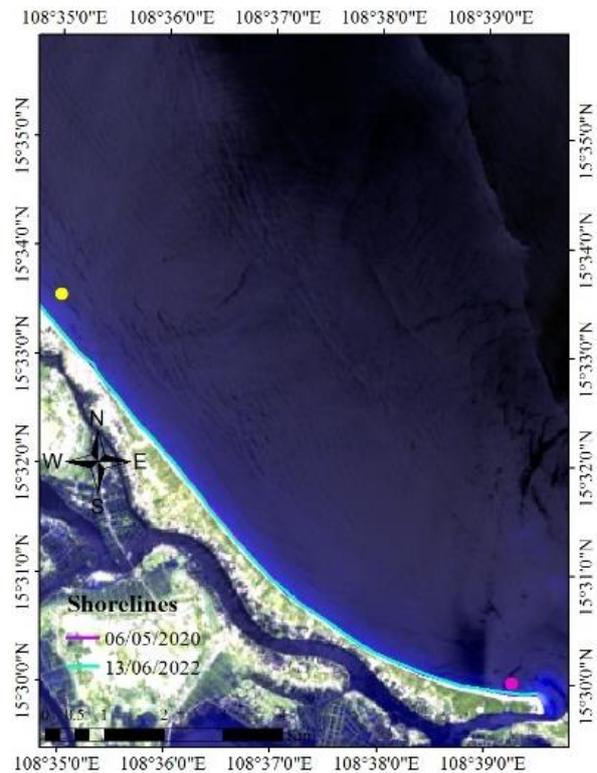


Fig. 12. Change of the area 3 shorelines, 2020–2022 гг.
Рис. 12. Изменение береговой линии района 3 в 2020–2022 гг.

In addition, in the Quang Nam area, during the northeast monsoon season, it often causes large waves and storms are also active during this period, combined with high tide causing flooding and erosion on a large scale. According to statistics in 1961–2014, there were 206 storms and tropical depressions affecting the central region, of which the most were storms from force 8 to 11 accounting for 29% (Fig. 13). The author in also used the SWAN and SuWAT models to calculate the wave height and storm surge of Typhoon Ketsana with the maximum speed of 130 km/h (force 11), showing that the wave height in Quang Nam area has the maximum level of 6.1 m and the maximum storm surge –

1–2 m [22]. In 2016–2021, there were 33 active storms in Quang Nam area, there were 9 storms with speeds above 120 km/h (Fig. 14), showing that the frequency of major storms is increasing adversely affects the coastal area of Quang Nam. Comparison of the results of shoreline erosion combined with storm data also shows a positive correlation. Specifically, in 2016–2018, erosion of 2.0 m/year occurred 8 storms, in 2018–2020, erosion of 2.3 m/year occurs 10 storms, in 2020–2022, erosion of 3.1 m/year occurred 15 storms. Research results are the basis for planning and developing response plans in the context of climate change.

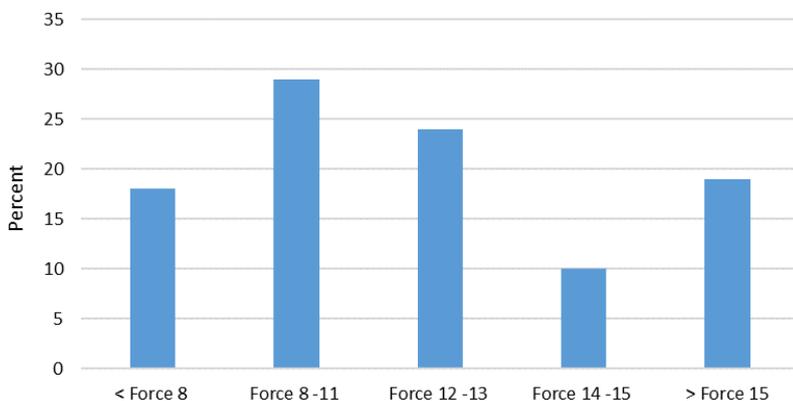


Fig. 13. Beaufort Wind, 1961–2014 [22]
Рис. 13. Ветер Бофорта, 1961–2014 [22]

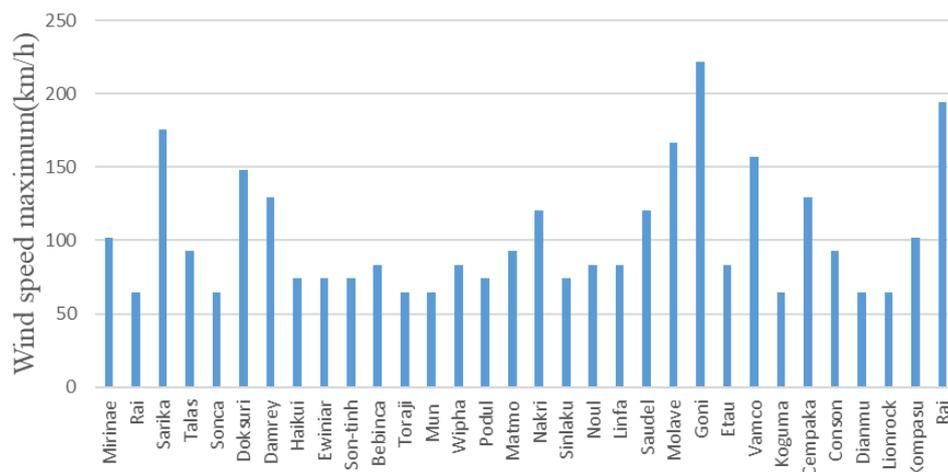


Fig. 14. Storms affect Quang Nam area, 2016–2021

Рис. 14. Штормы, воздействующие на район Куангнам, 2016–2021 гг.

Conclusions

In the coastal area of Quang Nam province, there are two processes – erosion and deposition, however, erosion is more dominant in all three areas, with high erosion rate mainly in Cua Dai area. In particular, through each period, erosion tends to increase, in 2016–2018, the average erosion rate is about 2 m/year, 2018–2020 – average erosion rate is about 2.3 m/year and average erosion rate in 2020–2022 is 3.1 m/year. In addition, when combined with storm data statistics, it also shows a positive correlation with erosion in this region. Thus, indirectly, climate change has had a very significant influence on coastal erosion in Quang Nam area.

From the results obtained, it is necessary to continue to monitor, research and evaluate the shoreline changes in Quang Nam province in the near future to promptly take measures to prevent erosion to limit the impact on infrastructure and people living in coastal areas.

Limitations and development directions

Satellite images have medium spatial resolution, so higher resolution images are required for analysis, as they increase the reliability of the results.

It is necessary to investigate more real data of shoreline measurement in the study area to compare with the results of remote sensing images, thereby adding reliability to the results of extracting shorelines from remote sensing images.

REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cai F., Su X., Liu J., Li B. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Natural Science*, 2009, vol. 19, pp. 415–426.
- Thu H.T., Khoi D.N., Loi P.T., Hong N.V. Analysis of riverbank changes in Ho Chi Minh city in the period 1989–2015. *Science & Technology Development Journal*, 2018, vol. 2 (2), pp. 80–88.
- Binh T.V., Mau L.D. The change of topographic morphology of beaches and material balance along the coast of Quang Nam province. *Institute of Oceanography, Vietnam Academy of Science & Technology*, 2016, vol. 22, pp. 15–28.
- Ciritci D., Türk T. Automatic detection of shoreline change by Geographical Information System (GIS) and remote sensing in the Göksu Delta, Turkey. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 2019, vol. 47 (2), pp. 233–243.
- Thangaperumal S., Cyril Magimai Antoz A., Shivaharan R. Marina shoreline change detection using remote sensing and GIS. *Int. J. Civil Eng. Technol.*, 2020, vol. 11, pp. 85–96.
- Abdoul Jelil N. Monitoring long-term shoreline changes along Yanbu, Kingdom of Saudi Arabia using remote sensing and GIS techniques. *J. Taibah Univ. Sci.*, 2020, vol. 14, pp. 762–776.
- Nhan N.T., Tung N.X., Anh B.T.B., Thanh N.X. Application of remote sensing, gis and digital shoreline analysis system (DSAS) to assess the changes of the red river bank in the area from Son Tay to Gia Lam (Hanoi). *J. Mar. Sci. Technol.*, 2018, vol. 18 (3), pp. 267–277.
- Tuan T.A., Nam L.D., Nguyet N.T.A., Hong P.V., Ngan N.T.A., Phuong V.L. Interpretation of water indices for shoreline extraction from Landsat 8 OLI data on the southwest coast of Vietnam. *J. Mar. Sci. Technol.*, 2018, vol. 18, pp. 339–249.
- Mau L.D., Trung P.B., Binh T.V. Erosion features along Cua Dai beach, Hoi An city, Quang Nam province, Viet Nam. *J. Mar. Sci. Technol.*, 2018, vol. 18, pp. 21–31.
- Cham D.D., Minh N.Q., Lam N.T., Thanh N.T. Identification of erosion–deposition causes and regimes along the Quang Nam Coast, Vietnam. *Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019)*. Hanoi, Vietnam, 2019. pp. 809–814.

11. Quang D.N., Ngan V.H., Tam H.S., Viet N.T., Tinh N.X., Tanaka H. Long-term shoreline evolution using DSAS technique: a case study of Quang Nam province, Vietnam. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2021, vol. 9 (10), pp. 1–18.
12. Thong N., Duc H.T., Hung P.Q., Yen T.H. Numerical study of sediment transport in Thu–Bon estuary and coastal areas of Hoi–An City. *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 964, pp. 1–11.
13. Anh T.A. Analysing and evaluating natural conditions for tourism development in Quang Nam province. *Ho Chi Minh City University of Education – Journal of Science*, 2016, vol. 6 (84), pp. 187–199.
14. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, vol. 17 (7), pp. 1425–1432.
15. Rokni K., Ahmad A., Hazini S. Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6 (5), pp. 4173–4189.
16. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.*, 2006, vol. 27 (14), pp. 3025–3033.
17. Sun F. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.*, 2012, vol. 33 (21), pp. 6854–6875.
18. Yang Y., Liu Y., Zhou M., Zhang S., Zhan W., Sun C., Duan Y. Landsat 8 OLI image based terrestrial water extraction from heterogeneous backgrounds using a reflectance homogenization approach. *Remote Sens. Environ.*, 2015, vol. 171, pp. 14–32.
19. Dong N.H., Thao D.T.P., Hoa D.T.T., Hien T.T. Using Lansat and Sentinel-2 remote sensing images in monitoring shoreline change in Quang Nam province. *Journal of Science on Natural Resources and Environment*, 2019, vol. 28, pp. 16–26.
20. Cao Q.K.N., Hanh P.T.H., Long B.T. Assessment of the shoreline evolution and coastal erosion trends along Cua Dai beach, Hoi An City, Quang Nam. *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 2022, vol. 736 (1), pp. 41–53.
21. Binh T.V., Mau L.D., Phai V.V. Some issues of geomorphology to serve coastal environmental management of Quang Nam province. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 2019, vol. 19 (4A), pp. 79–91.
22. Hoang D.V. *Assessing the effects of storm-induced sea level rise on the coastal area of Quang Nam province in the context of climate change*. MSc Dissertation. Hanoi, 2019. 136 p.

Information about the authors

Nguyen Tien Thanh, Lecturer, Vietnam National University of Science, 227, Nguyen Van Cu, Ward 4, District 5, Ho Chi Minh City, 700000, Vietnam. ntthanh@hcmus.edu.vn; <https://orcid.org/0009-0001-8340-8444>

Received: 07.07.2023

Revised: 07.09.2023

Accepted: 19.04.2024

Информация об авторах

Нгуен Тьен Тхань, лектор, Вьетнамский национальный университет науки, Вьетнам, 700000, г. Хошимин, Нгуен Ван Ку Вард, 227. ntthanh@hcmus.edu.vn; <https://orcid.org/0009-0001-8340-8444>

Поступила в редакцию: 07.07.2023

Поступила после рецензирования: 07.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

УДК 621.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377
Шифр специальности ВАК: 1.3.14

Обзор современных методов сушки углей с оценкой их эффективности

В.В. Саломатов^{1,2}, В.А. Карелин^{1,2}✉

¹ Новосибирский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, г. Новосибирск

✉ vad2hen@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования продиктована необходимостью анализа современного состояния тематики сушки угля для выявления наиболее эффективных способов с точки зрения временных и энергетических затрат, а также экологической безопасности и улучшения качества топлива. Как показывает практика, сушка – это один из самых важных этапов подготовки угля к сжиганию, она способствует повышению термической эффективности, снижению выбросов и загрязнения окружающей среды, увеличению энергетической мощности и улучшению стабильности сгорания. Среди основных способов сушки угля можно выделить сушку с испарением: А) ротационная сушка; Б) сушка в кипящем слое; В) иммерсионная сушка горячим маслом; Г) сушка в микроволновой печи, а также сушку без испарения: А) гидротермальное обезвоживание; Б) механическое/термическое обезвоживание; В) экстракция растворителем. При этом каждый из данных методов постоянно развивается, и требуется оценка влияния динамики этих изменений на ключевые характеристики процесса сушки. **Цель:** обзор и анализ современных способов сушки угля, наиболее эффективных с точки зрения временных и энергетических затрат. **Объектом** исследования является влажный материал – уголь, подверженный различным способам сушки. **Методы:** поиск работ по заявленной тематике с проверкой указания основных параметров сушки: время, энергозатрат и др. На основе полученных данных проведено сравнение различных способов сушки, рекомендованы оптимальные с точки зрения указанных параметров методы. В результате исследования были рассмотрены современные методы сушки угля, дана оценка их эффективности. Было установлено, что наиболее эффективными с точки зрения энергозатрат методами сушки угля являются: ротационная сушка, иммерсионная сушка горячим маслом, механическое/термическое обезвоживание и экстракция растворителем. Также были рассмотрены особенности каждого метода сушки.

Ключевые слова: сушка, уголь, СВЧ-излучение, сушка с испарением, сушка без испарения, теплоизлучение, конвекция, экологическая безопасность

Для цитирования: Саломатов В.В., Карелин В.А. Обзор современных методов сушки углей с оценкой их эффективности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 182–193. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377

UDC 621.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377

Review of modern coal drying methods with the evaluation of their efficiency

V.V. Salomatov^{1,2}, V.A. Karelin^{1,2}✉

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

✉ vad2hen@mail.ru

Abstract. *Relevance.* The need to analyze the current state of the subject of coal drying in order to identify the most effective methods in terms of time and energy costs, as well as environmental safety and improve the quality of fuel. As practice shows,

drying is one of the most important stages in coal preparation for combustion, it helps to increase thermal efficiency, reduce emissions and environmental pollution, increase energy capacity and improve combustion stability. Among the main methods of drying coal, drying with evaporation: A) rotary drying; B) drying in a fluidized bed; C) immersion drying with hot oil; D) drying in a microwave oven, as well as drying without evaporation: A) hydrothermal dehydration; B) mechanical/thermal dehydration; C) solvent extraction, can be distinguished. At the same time, each of these methods is constantly evolving and it is required to evaluate the influence of the dynamics of these changes on the key characteristics of drying. **Aim.** Review and analysis of modern methods of coal drying, the most efficient in terms of time and energy costs. **Object.** Wet material – coal, subjected to various drying methods. **Methods.** Search for works on the stated topic, checking the indication of the main drying parameters: time, energy consumption, etc. Based on the data obtained, a comparison of various drying methods was carried out, and optimal methods were recommended. **Results.** The authors have considered the modern methods of drying coal and assessed their effectiveness. Rotary drying, hot oil immersion drying, mechanical/thermal dehydration and solvent extraction were found to be the most energy efficient methods for drying coal. The paper considers the features of each drying method.

Keywords: drying, coal, microwave radiation, drying with evaporation, drying without evaporation, heat radiation, convection, environmental safety

For citation: Salomatov V.V., Karelin V.A. Review of modern coal drying methods with the evaluation of their efficiency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 182–193. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377

Введение

Уголь, добытый с поверхности или из глубин, редко пригоден для непосредственного использования. Поэтому улучшение качества угля до требуемого уровня является важной международной задачей. Этот процесс включает в себя физические и/или химические методы удаления определенных компонентов и повышения его качества до пригодного для рынка уровня. Технологии, применяемые в обработке угля, могут различаться, но можно выделить четыре основных этапа: предварительная обработка, сепарация, сушка и утилизация отходов. Стоимость подготовки угля зависит от его характеристик, стоимости утилизации отходов, мощности завода по обработке и других факторов.

Очевидно, что дополнительные операции по подготовке угля требуют сложных систем, что приводит к увеличению затрат на его обработку. Процессы очистки угля, основанные на гравитационной сепарации или пенной флотации, обычно приводят к содержанию влаги в пределах 12–25 %, в зависимости от размера частиц. Более мелкие частицы имеют более высокое содержание влаги из-за большей площади поверхности, которая способствует задержке влаги. Высокая влажность угля снижает эффективность работы котла.

Сушка угля перед его сжиганием является важным процессом, который демонстрирует ряд преимуществ и необходим для эффективной работы котла или других систем термической обработки угля. Приведем несколько основных причин, почему важно проводить сушку угля перед сжиганием.

1. Повышение термической эффективности: уголь с высоким содержанием влаги требует больше энергии для его разогрева и испарения в процессе сжигания. Сушка угля снижает его влажность, что в свою очередь улучшает теплопере-

дачу и повышает термическую эффективность системы [1, 2].

2. Снижение выбросов и загрязнение окружающей среды: сжигание влажного угля может вызывать большое количество выбросов, которые могут содержать вредные вещества (NO_x, SO_x и др.). Сухой уголь, как правило, сжигается более чисто, что способствует улучшению качества воздуха и снижению негативного воздействия на окружающую среду [3–5].
3. Увеличение энергетической мощности: процесс сушки угля позволяет повысить его тепловую энергию за счет снижения содержания влаги. Сухой уголь имеет больший калорийный потенциал и может обеспечивать более высокую энергетическую мощность при его сжигании, что важно для эффективной работы тепловых установок [2, 5].
4. Улучшение стабильности сгорания: влажный уголь может вызывать неравномерное сгорание и повышенное образование сажи и других отложений на поверхности котла. Сушка угля помогает создать более стабильные условия сгорания и снизить риск непредвиденных отказов и поломок системы [2, 6].

С 2020 г. растёт уровень инвестиций в ископаемое топливо, в том числе в уголь [7]. Во многом это обуславливается необходимостью повышения эффективности использования угля и снижения выбросов при сжигании. Уголь в ближайшее время будет оставаться одним из самых востребованных видов топлива. Особенно это актуально для стран с развивающейся экономикой, где постоянно растущий спрос на энергию отчасти может быть обеспечен угольным топливом.

Также стоит отметить, что ряд методов сушки угля претерпели существенные изменения за по-

следнее десятилетие, тогда как остальные остались на том же уровне. Поэтому для выбора способа сушки для конкретного вида угля требуется знание особенностей, эффективности и экономической целесообразности современных методов обработки, что и обуславливает актуальность данного исследования.

Классификация видов воды в угле и технологий сушки

Для начала рассмотрим различные типы воды, связанной с углем. Можно выделить пять типов: внутренняя адсорбционная вода, поверхностная адсорбционная вода, межчастичная вода, капиллярная вода и адгезионная вода (рис. 1). Капиллярная вода содержится в капиллярах и мелких щелях, находящихся между различными частицами. Межчастичная вода находится между различными частицами, а адгезионная вода образует слой пленки вокруг поверхности конкретных частиц. Внутренняя адсорбционная вода содержится в микропорах и микрокапиллярах внутри каждой угольной частицы и откладывается в процессе формирования. Поверхностно-адсорбционная вода примыкает к молекулам угля, но только на поверхности частиц.

Некоторое количество воды можно легко удалить с помощью обычных методов, таких как ваку-

умные фильтры и центрифуги; другую воду необходимо испарить, нагревая уголь до более высокой температуры. Низкосортные угли сжимаются и растрескиваются после удаления большей части воды, что существенно повышает интенсивность процесса сушки [8, 9].

Для эффективной сушки угля существует большое количество методов, которые продолжают совершенствоваться. Выбор определенного метода должен быть обусловлен начальными характеристиками угля (влажность, электрофизические и теплофизические параметры, размер частиц и др.) и желательными конечными параметрами (влажность и размер частиц). Также немаловажными являются скорость процесса сушки, энергозатраты, экологическая безопасность. Только после определения данных параметров можно делать выбор в пользу того или иного метода сушки.

Технологии сушки угля можно разделить на сушку с испарением и без испарения [10, 11]. При этом для сушки с испарением используют ротационную сушку (вращающиеся барабаны), сушку погружением в горячее масло и микроволновую сушку. Сушка без испарения происходит с использованием гидротермического обезвоживания, механического термического обезвоживания и экстракции растворителем.

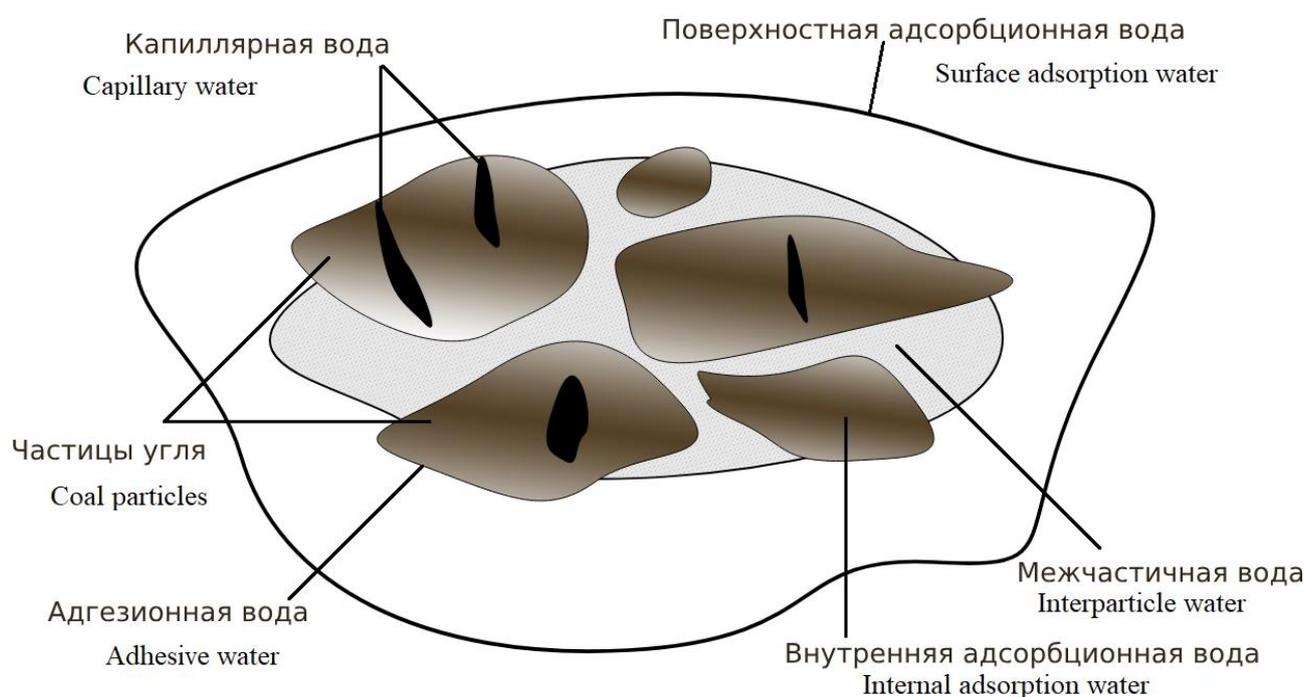


Рис. 1. Пять типов воды, связанных с углем
Fig. 1. Five types of water associated with coal

Сушка с испарением

А) Ротационная сушка

Технология ротационной сушки уже достаточно давно широко применяется в различных сферах [12, 13]. Основной особенностью этой технологии является способность сушилки вращаться во время процесса. В настоящее время наиболее распространены два типа вращающихся сушилок: с вращающимся барабаном и с вращающейся трубой. Оба устройства обычно имеют слегка наклонную конструкцию, и угол наклона может быть отрегулирован в диапазоне от 1 до 10 градусов. В системе с вращающимся барабаном сырой уголь загружается в барабан с помощью питателя. Сушилки с вращающимся барабаном могут быть разделены на системы с прямым и непрямым контактом в зависимости от того, как происходит взаимодействие угля с дымовыми газами [14].

Среди современных работ можно выделить исследование характеристик сушки угля с помощью продувки котла в роторной сушилке угля [15]. Схема используемой роторной сушилки в данной работе представлен на рис. 2.

В этой конструкции сушилки использован принцип теплопередачи в наборе из четырех паровых змеевиков. Продувка котла из барабана отработавшего пара поступала в паровые змеевики и нагревала сжатый воздух. Нагретый воздух прохо-

дил по четырем трубам, поступал во вращающийся барабан и сушил влажный уголь за счет непосредственного контактного теплообмена. Наконец, высушенный уголь и пыль отделяются в конце вращающегося барабана. Вращающийся барабан был изготовлен из нержавеющей стали без теплоизоляции, поэтому возможна потеря тепла при сушке. Сухой уголь собирался в отдельном контейнере, а пыль скапливалась в мешочном фильтре. При этом было изучено влияние на эффективность сушки и теплотворную способность угля следующих параметров: размера частиц угля (0,595, 1,18, 4,75 мм) и скорости подачи угля.

На основании экспериментальных данных при проведении процедур изменения расхода и крупности угля при фиксированных переменных: горячем воздухе 70 °С, расходе воздуха 37 кг/ч, давлении 0,03 МПа и типе угля, установлено, что наиболее существенное снижение влажности угля (на 20,7 %) было при расходе угля 20 кг/ч и размере 0,595 мм. Наиболее значительный прирост теплотворной способности угля был также при расходе 20 кг/ч и 0,595 мм с увеличением на 3680246,4 Дж/кг. Наилучшее значение КПД при проведении испытаний на роторной сушилке угля составило 86,98 % при энергетических потерях 13,02 %.

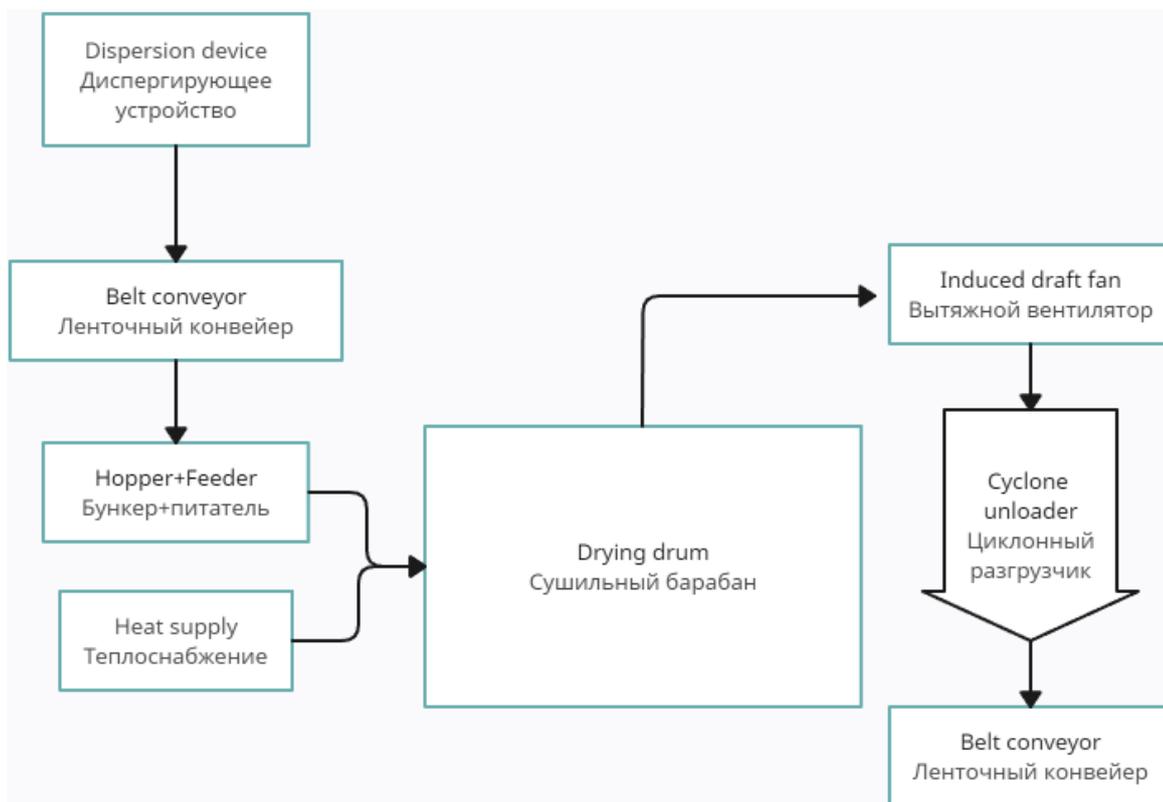


Рис. 2. Схема роторной сушилки
Fig. 2. Rotary dryer diagram

Б) Сушка в кипящем слое

Сушка в псевдооживленном слое означает, что процесс сушки происходит в слое, который содержит сушильную среду со свойствами жидкости [16]. Этот процесс может происходить периодически (что особенно эффективно для небольших объемов производства или материалов, чувствительных к теплу) или непрерывно. В сушильной системе используется сушильная среда, которая может быть горячим воздухом, дымовыми газами или перегретым паром. Уголь подается в сушилку сверху, а горячая сушильная среда выводится снизу псевдооживленного слоя. Горячая сушильная среда постоянно проходит через уголь, вызывая псевдооживление, и затем уголь подвергается сушке.

В одной из современных работ [17] приведено описание сушки с использованием вихревого аппарата с псевдооживленным слоем, как показано на рис. 3.

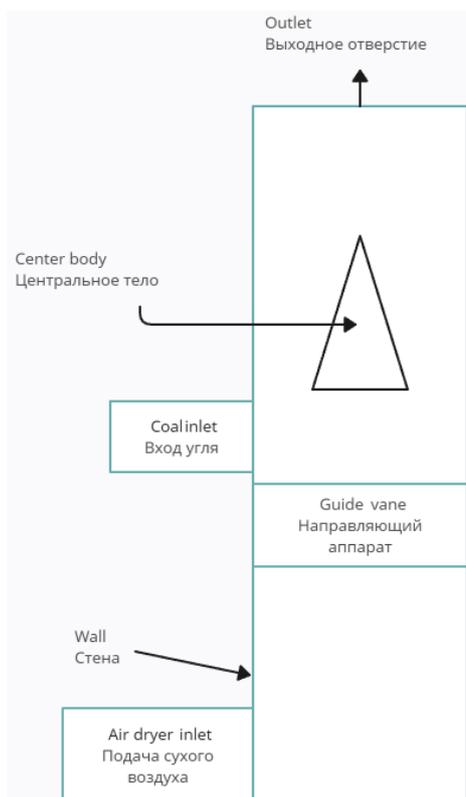


Рис. 3. Вихревая сушилка с псевдооживленным слоем
 Fig. 3. Swirl fluidized bed dryer

Сушильная камера имеет диаметр 20 мм, длину 360 мм, посередине имеется конус высотой 200 мм для предотвращения накопления частиц. Начальная часть конуса имеет диаметр 110 мм. Камера изготовлена из акриловой трубы. Сухой воздух поступает в тангенциальном направлении, а затем выходит через расположение лопастей. Расположение

лопастей имеет угол наклона 10° при количестве 30 штук. На выходе имеется фильтр для предотвращения вылета частиц угля из камеры в процессе сушки. В эксперименте использовался индонезийский низкосортный уголь влажностью 25,17 %. Уголь в виде кусков дробят, а затем сортируют до крупности около 6 мм. Электрический нагреватель, которым можно управлять с помощью термостата, используется для нагрева воды в резервуаре, а затем циркулирует в двух радиаторах. Эти два радиатора нагревают окружающий воздух до 55 °С [17]. Воздуходувка всасывает сухой воздух и использует его для сушки частиц угля в камере. Температура и относительная влажность воздуха осушителя измеряются на входе и выходе из камеры.

При этом эффективность сушки при низкой температуре за каждую минуту рассчитывается по уравнению:

$$\varepsilon_D = \frac{\text{Энергия для испарения в момент времени } t}{\left(\begin{array}{l} \text{Поступающая энергия} - \\ - \text{Энергия, уносимая воздухом} \end{array} \right) \text{ в момент времени } t}$$

При проведении экспериментов расход воздуха на сушку составил 216 кг/ч при относительной влажности воздуха 10,4 % и температуре 55 °С. Наиболее эффективная сушка происходила в течение первых 300 секунд с максимальным КПД 78,3 %. Сушка в течение 300 секунд может уменьшить коэффициент влажности с 1,0 до 0,28.

В) Иммерсионная сушка горячим маслом

Метод иммерсионной сушки в горячем масле представляет собой процесс, при котором низкосортный уголь погружается в нагретое масло. Японские исследователи предложили начать использование этого метода в начале 1990-х гг. [18]. Во время сушки погружением в горячее масло влажные материалы добавляются к маслу, которое нагревается до температуры, выше точки кипения воды, что создает сильный турбулентный поток на поверхности материала. Этот метод сушки очень эффективен, так как поверхностная вода и влага внутри материала могут быстро испаряться. Техника сушки погружением в горячее масло напоминает приготовление во фритюре и часто называется «сушкой-жаркой». Она особенно эффективна для материалов с высоким содержанием влаги, таких как мясо, овощи и органический шлам [19].

Описание одной из таких установок приведено в работе [20]. Цилиндрический реактор (высота 230 мм, диаметр 200 мм) и сетчатый приемник с квадратной сеткой для подачи углей в реактор (ширина 100 мм, длина 100 мм, высота 25 мм) изготовлены из нержавеющей стали. Массу масла в реакторе измеряли электронными весами, расположенными под сушильным аппаратом. Для точного контроля

температуры в реакторе был предусмотрен автоматический регулятор температуры. Ноутбук записывал изменения температуры и веса в зависимости от времени нагревания масла и времени высыхания угля. Масло предварительно нагревали до стабильной температуры 120, 130 или 140 °С перед добавлением 50 г угля на литр масла. Каждый эксперимент по обжарке–сушке проводился в течение 600 секунд. После сушки угли переносили в центробежный сепаратор на 600 секунд, после чего измеряли количество отделившегося масла. Для оценки эффективности сушки в каждом из условий реакции содержание влаги измеряли с помощью электрической печи в образцах, отобранных до и после процесса сушки и измельченных до однородного размера 0,25 мм. Измерения влажности были завершены в тот же день, чтобы исключить изменения содержания влаги. Для всех измеряемых параметров рассчитывали среднее арифметическое трех экспериментов.

При этом за последние годы достаточно мало работ по данной тематике. Связано это может быть со следующим обстоятельством. При достаточно высокой энергетической эффективности иммерсионной сушки горячим маслом (~ 95 %) этот метод сушки имеет ряд проблем, связанных с непрактичностью и высокой стоимостью использования масла [21].

Г) Сушка в микроволновой печи

Микроволны широко используются для сушки из-за своей высокой скорости нагрева и сокращения времени обработки [22, 23]. Сушка в микроволновой печи осуществляется путем преобразования электромагнитной энергии в тепловую. Микроволновая энергия представляет собой электромагнитное излучение с частотами от 300 МГц до 300 ГГц, или длинами волн от 1 до 300 мкм [24, 25]. Микроволновая сушка имеет множество преимуществ, включая быстрый и точечный нагрев, равномерное распределение тепла, гибкую модульную конструкцию, экологически безопасное применение, быстрое включение и выключение, а также высокую эффективность [26]. Микроволны могут проходить насквозь, поглощаться или отражаться, и не оказывают существенного воздействия на металлы, поскольку высокая проводимость отражает микроволны. Типичная схема установки по микроволновой сушке приведена на рис. 4 [27].

Для достижения оптимальной энергоэффективности микроволнового нагрева/сушки необходим индивидуальный подбор параметров микроволнового излучения, который основывается на диэлектрических и теплофизических свойствах конкретного угля. Одномодовая СВЧ-система, генерирующая определенную частоту и мощность, обладает более высокой энергоэффективностью по сравнению с многомодовыми СВЧ-системами.

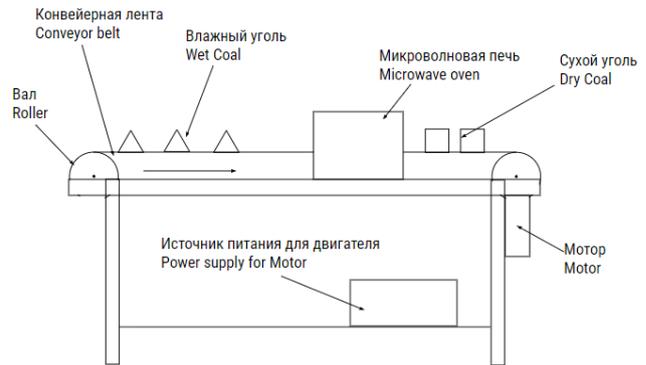


Рис. 4. Схема установки по микроволновой сушке
Fig. 4. Microwave drying plant diagram

Пилотные и полномасштабные системы одномодового типа обычно имеют эффективность более 80 %, в то время как эффективность многомодовых систем может составлять всего 40 % [28]. При этом более низкая микроволновая частота позволяет достичь большей глубины проникновения, но при этом несет меньше энергии. Малая мощность СВЧ приводит к низкой скорости нагрева, в то время как большая мощность может вызвать перегрев поверхностного слоя. Кроме того, эффект нагрева/сушки различных угольных образцов может сильно различаться при использовании одного и того же микроволнового устройства. Предыдущие исследования показали, что высокосортные угли обладают лучшим и более стабильным эффектом микроволнового нагрева, а микроволновая печь наилучшим образом работает с углями, содержащими низкое количество влаги и высокое содержание металлических минералов.

Сушка без испарения

А) Гидротермальное обезвоживание

Гидротермальное обезвоживание (ГТО) является методом сушки низкосортных углей без использования испарения. Сырой низкосортный уголь помещается в реактор без предварительной обработки и герметизируется азотом при определенном давлении и температуре окружающей среды [29]. Затем сырой уголь нагревается и перемешивается, при этом температура реакции автоматически регулируется до необходимого значения. В процессе гидротермального обезвоживания вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования. Кроме того, большая часть растворимого в воде неорганического вещества будет вымываться, что приведет к снижению содержания неорганических компонент в угле [30].

В одной из последних работ по данной тематике [31] был использован ГЭР (глубокий эвтектический растворитель, состоящий из ChCl и ZnCl_2) для улучшения процесса обогащения лигнита путем

удаления влаги и кислорода методом ГТО. Изменение физико-химического состава обогащенных углей не только улучшило качество бурого угля, но и значительно повлияло на характеристики горения. Основные результаты исследования: 1. При добавлении ГЭР в количестве от 0,0 до 3,0 г кривые горения бурого угля, модернизированного при 280 °С, смещались и задерживались в сторону более высокой температурной зоны. По сравнению с методом ГТО, использование ГЭР–ГТО подавляет тенденцию к самовозгоранию и увеличивает способность лигнита к реакции при горении; 2. Для бурого угля, модернизированного 3,0 г ГЭР ($\text{ChCl}_2:\text{ZnCl}_2=1:1$) при 250–300 °С, кривые горения сначала сместились в низкотемпературную, а затем в высокотемпературную зону. Метод ГЭР–ГТО способствовал повышению качества бурого угля без ухудшения преимуществ с точки зрения характеристик горения; 3. Для лигнита, обогащенного 3,0 г ГЭР при 300 °С, улучшенные угли имели аналогичные характеристики воспламенения при увеличении содержания ZnCl_2 в ГЭР. При увеличении содержания ZnCl_2 соответствующая стадия горения немного продвигалась вперед. При этом, как отме-

чают авторы, эффективность сушки увеличилась с 65,02 % (без добавления ГЭР) до 71,31 % (с добавлением 3,0 г ГЭР).

Б) Механическое/термическое обезвоживание

С целью повышения эффективности электростанций, работающих на буром угле, была разработана техника механического/термического обезвоживания. В этом процессе тепловая и механическая энергия были объединены, что позволило достичь быстрого обезвоживания и снизить затраты на вложение. На рис. 5 представлена схема установки для механического/термического обезвоживания [32]. Эта установка состоит из камеры для образцов из нержавеющей стали, пористой спеченной фритты и камеры для сбора воды. Процесс обезвоживания обычно выполняется в четыре этапа: установка лигнита в камеру, нагрев угля до заданной температуры для достижения термического обезвоживания, сжатие до постоянного давления для механического обезвоживания и охлаждение угля путем мгновенного испарения воды. При этом энергоэффективность данного метода может составлять 80–90 %.

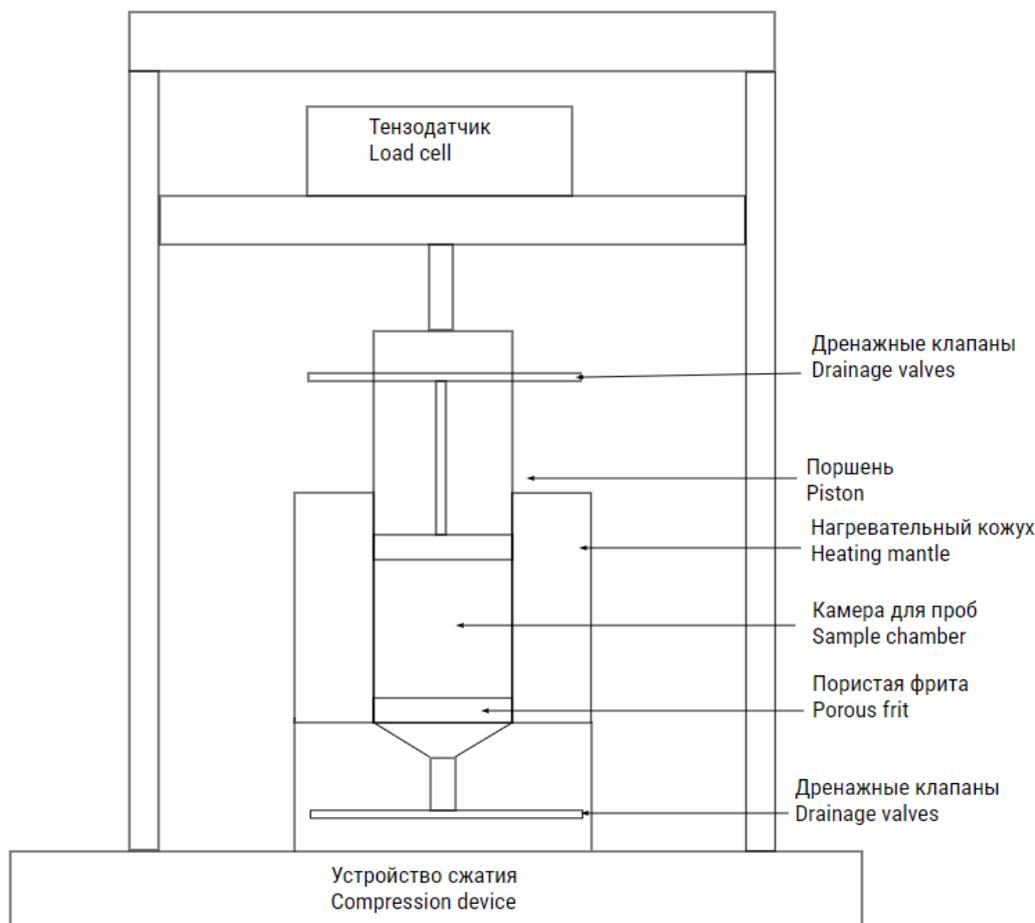


Рис. 5. Установка на основе метода механического/термического обезвоживания
Fig. 5. Plant based on mechanical/thermal dewatering method

Однако, как отмечается в работе [21], основная проблема этой технологии заключается в том, что она влияет на физико-химические свойства материалов. Кроме того, добываемая вода становится непригодной для многих сценариев повторного использования из-за ее кислого, соленого и углеродного характера. Поэтому требуется дальнейшее развитие этой перспективной технологии, чтобы минимизировать изменение свойств полезных ископаемых и увеличить возможность повторного использования добываемой воды, что имеет большое значение при переработке полезных ископаемых.

В) Экстракция растворителем

Метод экстракции растворителем представляет собой способ удаления воды из низкокачественных углей без испарения. Этот энергосберегающий метод обезвоживания может проводиться при очень низких температурах. Исходный метод, предложенный в [33], заключается в том, что слой угля подвергается воздействию проточного неполярного растворителя при температуре ниже 200 °С. В ходе процесса происходит освобождение водородных связей воды, содержащейся в угле, под воздействием тепла, а затем выделенная вода поглощается растворителем, который должен быть удален из угля. Затем смесь воды и растворителя охлаждается до комнатной температуры, чтобы уменьшить их растворимость в воде и отделить их друг от друга. Экстракция растворителем также используется при переработке минерального сырья, такого как руды редких земель, цинк-свинцовая руда, литий, ванадий и марганец.

В одной из актуальных работ [34] был предложен метод деградационной экстракции растворителем для облагораживания низкосортных углей для их каскадной утилизации в высокодисперсной среде. Полученные продукты показали значительно улучшенные свойства по сравнению с исходными данными углей.

Для проведения экспериментов использовался реактор периодического действия, подробно описанный в работе [34]. Реактор состоял из автоклава и резервуара, соединенных промежуточным клапаном. Фильтр (0,5 мкм) был установлен на дне автоклава для разделения при высокой температуре. В каждом опыте в реактор помещали 25 г угля и 250 мл 1-МН для лучшего диспергирования. Реактор трижды продувался азотом, чтобы проверить герметичность при давлении 0,2 МПа. Затем реактор нагревали до 350 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин и выдерживали в течение 60 минут. После завершения программы нагрева промежуточный клапан открывали, и жидкость при 350 °С, содержащая растворитель и экстрагируемые вещества, стекала в резервуар под действием давления. Часть экстрактов осаждалась при комнатной температуре в ре-

зервуаре и отделялась фильтрацией, остальные экстракты, растворимые при комнатной температуре, перегонялись вакуумом. Осадки были высушены в вакуумной печи при 150 °С в течение 12 часов для удаления растворителя. Газообразные продукты собирались в газовых мешках для последующих испытаний. Выходы твердых продуктов рассчитывались по их массе, а суммарный выход жидких и газообразных продуктов рассчитывался по массовому балансу.

В целом данный метод, помимо повышения качества угля, обладает высокой эффективностью сушки. Тем не менее эта технология все еще находится на стадии разработки концепции, и необходимы дальнейшие исследования и разработки, чтобы процесс можно было масштабировать и использовать в промышленных приложениях.

В таблице приведено итоговое сравнение по КПД процессов сушки, а также основные особенности, позволяющие подобрать оптимальный режим в зависимости от рассматриваемого вида угля и других входных данных.

Заключение

На основе проведенного анализа можно заключить, что в настоящий момент наиболее эффективными с точки зрения энергозатрат методами сушки угля являются: ротационная сушка, иммерсионная сушка горячим маслом, механическое/термическое обезвоживание и экстракция растворителем. При этом каждый из приведенных способов обладает рядом дополнительных особенностей. Так, сушка горячим маслом связана с необходимостью утилизации отработавшего масла. Микроволновый способ требует достаточно высоких электрофизических параметров угля для эффективной сушки, однако обладает высокой скоростью процесса и может быть использован для повышения производительности производства сухого угля. Ротационный способ и сушка на основе кипящего слоя, как правило, используют воздух, что существенно упрощает конструкцию установки. Гидротермальный способ и экстракция растворителем требуют дополнительной подготовки угля, но могут быть интересны тем, что вода удаляется в жидком виде. При необходимости предварительного измельчения и деформации угля может быть интересен метод механического/термического обезвоживания. При этом с точки зрения низких временных затрат наиболее подходящими методами сушки угля являются: микроволновая сушка, сушка в кипящем слое и иммерсионная сушка горячим маслом. Для окончательного выбора метода сушки требуется учет не только высокого КПД, но и дополнительных особенностей каждого метода сушки в относительности выбранного вида угля.

Таблица. Результаты сравнения современных методов сушки
Table. Results of comparison of modern drying methods

Метод сушки Drying method	Максимальный КПД, % Maximum efficiency, %	Особенности Peculiarities
Ротационная сушка Rotary drying	87	<ul style="list-style-type: none"> • Равномерный процесс сушки/Uniform drying • Сложная компоновка системы/Complex system layout • Утечка пара является большой проблемой из-за вращающихся и неподвижных частей Steam leakage is a big problem due to rotating and stationary parts
Сушка в кипящем слое Fluidized bed drying	78	<ul style="list-style-type: none"> • Обеспечивает быструю и однородную сушку/Provides fast and uniform drying • Эффективна при низкой температуре/Effective at low temperatures • Низкие затраты на техническое обслуживание, меньше время простоя Low maintenance costs, less downtime • Неравномерная структура потока/Uneven flow pattern • Вероятность накопления электростатического заряда может быть высокой There may be a high chance of electrostatic charge accumulation
Иммерсионная сушка горячим маслом Hot oil immersion drying	95	<ul style="list-style-type: none"> • Высокий КПД/High efficiency • Непрактичность/Impractical • Высокая стоимость использования масла/High cost of oil use
Сушка в микроволновой печи Microwave drying	80	<ul style="list-style-type: none"> • Быстрый, объёмный и точечный нагрев/Fast, volumetric and spot heating • Равномерное распределение тепла/Even heat distribution • Гибкая модульная конструкция/Flexible modular design • Низкая тепловая инерционность/Low thermal inertia • Возможное повышение энергозатрат из-за неэффективности магнетрона и линий передач Possible increase in energy costs due to inefficiency of the magnetron and transmission lines
Гидротермальное обезвоживание Hydrothermal dehydration	71	<ul style="list-style-type: none"> • Вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования Water is removed in liquid form to retain the latent heat of vaporization • Дорогое оборудование/Expensive equipment • Высокие температуры/High temperatures
Механическое/термическое обезвоживание Mechanical/thermal dehydration	90	<ul style="list-style-type: none"> • Высокий КПД/High efficiency • Высокая скорость/High speed • Низкие затраты/Low costs • Вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования Water is removed in liquid form to retain the latent heat of vaporization • Влияет на физико-химические свойства материалов Affects the physical and chemical properties of materials • Добываемая вода становится непригодной для повторного использования из-за ее кислого, соленого и углеродного характера Produced water becomes unsuitable for reuse due to its acidic, salty and carbon-rich nature
Экстракция растворителем Solvent extraction	87	<ul style="list-style-type: none"> • Вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования Water is removed in liquid form to retain the latent heat of vaporization • Возможно облагораживание низкосортных углей Upgrading of low-grade coals is possible • Технология все еще находится на стадии разработки концепции Technology is still in concept stage

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A novel method for low-rank coal drying using steam transient flash evaporation / S. Zongsheng, Z. Yuemin, Y. Guanghui, Y. Huatuo, Z. Mingrui, Z. Bo // Fuel. – 2023. – Vol. 354. – P. 1–10.
2. Low-rank coal drying behaviors under negative pressure: thermal fragmentation, volume shrinkage and changes in pore structure / R. Lingkun, X. Jinghao, W. Xiaoping, S. Jialei, J. Fengjun, C. Mo // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 272. – № 1. – P. 1–10.
3. Thermogravimetric study and modeling for the drying of a Chinese lignite / A. Tahmasebi, J. Yu, Y. Han, H. Zhao, S. Bhattacharya // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 8. – P. 793–803.
4. Kabir K.B., Hein K., Bhattacharya S. Process modelling of dimethyl ether production from Victorian brown coal integrating coal drying, gasification and synthesis processes // Computers & Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 48. – P. 96–104.
5. A comprehensive analysis of a thermal energy storage concept based on lowrank coal pre-drying for reducing the minimum load of coal-fired power plants / S. Yang, X. Cheng, X. Tuantuan, X. Gang, Y. Yongping // Applied Thermal Engineer. – 2019. – Vol. 156. – P. 77–90.
6. Investigation of technical and economic aspects of pre-dried lignite utilisation in a modern lignite power plant towards zero CO₂ emissions / M. Agraniotis, A. Koumanakos, A. Doukelis, S. Karellas, E. Kakaras // Energy. – 2012. – Vol. 45. – P. 134–141.
7. IEA, Annual investment in fossil fuels and clean energy, 2015–2023, IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-investment-in-fossil-fuels-and-clean-energy-2015-2023> (дата обращения 25.08.2023).

8. Karthikeyan M., Zhonghua W., Mujumdar A.S. Low-rank coal drying technologies – current status and new developments // *Drying Technology*. – 2009. – Vol. 27. – P. 403–415.
9. Karr C. *Analytical methods for coal and coal products*. – New York: Academic Press, 1978. – 580 p.
10. Tian J., Liu B. Progress and application of Lignite drying technologies // *Coal Chemistry Industry*. – 2012. – Vol. 3. – P. 1–5.
11. Experimental study on drying and reabsorption of the lignite of Ximeng / W.G. Shen, J.Z. Liu, Y.J. Yu, J.F. Zhu, J.H. Zhou, K.F. Cen // *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. – 2013. – Vol. 33. – P. 64–71.
12. Lignite drying with steam tube rotary dryer and its heat transfer characteristics / X.H. Yu, H.Y. Liao, J.P. Zhai, Z.F. Zhan, X. Zhao // *Clean Coal Technology*. – 2013. – Vol. 19. – P. 52–54.
13. Kakaras E., Ahladas P., Syrmopoulos S. Computer simulation studies for the integration of an external dryer into a Greek lignite-fired power plant // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81. – P. 583–593.
14. Development and application situation of lignite drying technology / B. Jiang, S. Li, J.R. Gao, G.L. Liang, H. Meng, Z.G. Yang // *Clean Coal Technology*. – 2011. – Vol. 17. – P. 69–72.
15. Marbun A.G., Dwiyantoro B.A., Tarmizi A.M. Study of coal drying characteristics using boiler blowdown in a rotary coal dryer // *JMES The International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. – 2022. – Vol. 6. – № 1. – P. 37–45.
16. Syahrula S., Hamdullahpurb F., Dincer I. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles // *Applied Thermal Engineering*. – 2002. – Vol. 22. – № 15. – P. 1763–1775.
17. Experimental and numerical study of coal swirl fluidized bed drying on 10° angle of guide vane / M.E. Simanjuntak, Prabowo, W.A. Widodo, Sutrisno, M.B.H. Sitorus // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – Vol. 33. – № 11. – P. 5499–5505.
18. A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology / T.I. Ohm, J.S. Chae, J.E. Kim, H.K. Kim, S.H. Moon // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 168. – № 1. – P. 445–450.
19. The evaporative drying of sludge by immersion in hot oil: effects of oil type and temperature / T.I. Ohm, J.S. Chae, K.S. Lim, S.H. Moon // *Journal of Hazardous Materials*. – 2010. – Vol. 178. – P. 483–488.
20. Evaluation of a hot oil immersion drying method for the upgrading of crushed low-rank coal / T.I. Ohm, J.S. Chae, J.H. Lim, S.H. Moon // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2012. – Vol. 26. – № 4. – P. 1299–1303.
21. Advances in dewatering and drying in mineral processing / B.A. Chaedir, J.C. Kurnia, A.P. Sasmito, A.S. Mujumdar // *Drying Technology*. – 2021. – Vol. 39. – № 11. – P. 1–18.
22. Fakhreddin S. Recent Progress and application of freeze dryers for agricultural product drying // *ChemBioEng Reviews*. – 2023. – Vol. 10. – № 5. – P. 618–627.
23. Effect of pre-treatments assisted microwave drying on kinetics and energy aspects of dragon fruit / C. Necati, G. Seda, K. Kevser, S. Cevdet // *Current Trends in Natural Sciences*. – 2022. – Vol. 11. – № 21. – P. 79–87.
24. Uslu T., Atalay Ü. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite // *Fuel Processing Technology*. – 2004. – Vol. 85. – № 1. – P. 21–29.
25. Barba A.A., Dalmoro A., D'Amore M. Microwave assisted drying of cellulose derivative (HPMC) granular solids // *Powder Technology*. – 2013. – Vol. 237. – P. 581–585.
26. Карелин В.А., Саломатов В.В. Математическая модель переноса тепла в слое диэлектрика при СВЧ-облучении // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2023. – Т. 30. – № 2. – С. 375–380.
27. Seehra M.S., Kalra A., Manivannan A. Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves // *Fuel*. – 2007. – Vol. 86. – № 5–6. – P. 829–834.
28. Improving coal permeability using microwave heating technology – a review / J. Huang, G. Xu, Y. Liang, G. Hu, P. Chang // *Fuel*. – 2020. – Vol. 266. – P. 1–16.
29. Mursito A.T., Hirajima T., Sasaki K. Upgrading and dewatering of raw tropical peat by hydrothermal treatment // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89. – № 3. – P. 635–641.
30. Favas G., Jackson W.R. Hydrothermal dewatering of lower rank coals. 1. Effects of process conditions on the properties of dried product // *Fuel*. – 2003. – Vol. 82. – P. 53–57.
31. Combustion performance of lignite after efficient upgrading via deep eutectic solvent-assisted hydrothermal dewatering / J. Li, Y. Yu, R. Huang, X. Yao, Y. Tang, Y. He // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 18. – № 3. – P. 1–13.
32. Hulston J., Favas G., Chaffee A.L. Physico-chemical properties of Loy Yang lignite dewatered by mechanical thermal expression // *Fuel*. – 2005. – Vol. 84. – P. 1940–1948.
33. Dewatering of Coal through Solvent Extraction / K. Miura, K. Mae, R. Ashida, T. Tamura, T. Ihara // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81. – № 11. – P. 1417–1422.
34. Degradative solvent extraction of low-rank coal: role of water on pyrolysis mechanism of low-rank coal in a highly-dispersed medium / Z. Hu, X. Zhang, X. Li, W. Qian, G. Luo, H. Liu, H. Hu, N. Worasuwannarak, H. Yao // *Carbon Resources Conversion*. – 2022. – Vol. 5. – № 2. – P. 111–118.

Информация об авторах

Владимир Васильевич Саломатов, доктор технических наук, профессор кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; главный научный сотрудник института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. salomatov.vv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8072-3246>

Вадим Александрович Карелин, старший преподаватель кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; инженер института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. vad2hen@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4813-8872>

Поступила в редакцию: 05.09.2023

Поступила после рецензирования: 13.02.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Zongsheng S., Yuemin Z., Guanghui Y., Huatuo Y., Mingrui Z., Bo Z. A novel method for low-rank coal drying using steam transient flash evaporation. *Fuel*, 2023, vol. 354, pp. 1–10.
2. Lingkun R., Jinghao X., Xiaoping W., Jialei S., Fengjun J., Mo C. Low-rank coal drying behaviors under negative pressure: thermal fragmentation, volume shrinkage and changes in pore structure. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 272, no. 1, pp. 1–10.
3. Tahmasebi A., Yu J., Han Y., Zhao H., Bhattacharya S. Thermogravimetric study and modeling for the drying of a Chinese lignite. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2013, vol. 8, pp. 793–803.
4. Kabir K.B., Hein K., Bhattacharya S. Process modelling of dimethyl ether production from Victorian brown coal integrating coal drying, gasification and synthesis processes. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, vol. 48, pp. 96–104.
5. Yang S., Cheng X., Tuantuan X., Gang X., Yongping Y. A comprehensive analysis of a thermal energy storage concept based on low rank coal pre-drying for reducing the minimum load of coal-fired power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 156, pp. 77–90.
6. Agraniotis M., Koumanakos A., Doukelis A., Karellas S., Kakaras E. Investigation of technical and economic aspects of pre-dried lignite utilisation in a modern lignite power plant towards zero CO₂ emissions. *Energy*, 2012, vol. 45, pp. 134–141.
7. IEA, *Annual investment in fossil fuels and clean energy, 2015–2023*. IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-investment-in-fossil-fuels-and-clean-energy-2015-2023> (accessed 25 August 2023).
8. Karthikeyan M., Zhonghua W., Mujumdar A.S. Low-rank coal drying technologies – current status and new developments. *Drying Technology*, 2009, vol. 27, pp. 403–415.
9. Karr C. *Analytical methods for coal and coal products*. New York, Academic Press, 1978. 580 p.
10. Tian J., Liu B. Progress and application of Lignite drying technologies. *Coal Chemistry Industry*, 2012, vol. 3, pp. 1–5.
11. Shen W.G., Liu J.Z., Yu Y.J., Zhu J.F., Zhou J.H., Cen K.F. Experimental study on drying and reabsorption of the lignite of Ximeng. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2013, vol. 33, pp. 64–71.
12. Yu X.H., Liao H.Y., Zhai J.P., Zhan Z.F., Zhao X. Lignite drying with steam tube rotary dryer and its heat transfer characteristics. *Clean Coal Technology*, 2013, vol. 19, pp. 52–54.
13. Kakaras E., Ahladas P., Syrmopoulos S. Computer simulation studies for the integration of an external dryer into a Greek lignite-fired power plant. *Fuel*, 2002, vol. 81, pp. 583–593.
14. Jiang B., Li S., Gao J.R., Liang G.L., Meng H., Yang Z.G. Development and application situation of lignite drying technology. *Clean Coal Technology*, 2011, vol. 17, pp. 69–72.
15. Marbun A.G., Dwiyantoro B.A., Tarmizi A.M. Study of coal drying characteristics using boiler blowdown in a rotary coal dryer. *International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 37–45.
16. Syahrula S., Hamdullahpurb F., Dincer I. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22, no. 15, pp. 1763–1775.
17. Simanjuntak M.E., Prabowo, Widodo W.A., Sutrisno, Sitorus M.B. H. Experimental and numerical study of coal swirl fluidized bed drying on 10° angle of guide vane. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, no. 11, pp. 5499–5505.
18. Ohm T.I., Chae J.S., Kim J.E., Kim H.K., Moon S.H. A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 168, no. 1, pp. 445–450.
19. Ohm T.I., Chae J.S., Lim K.S., Moon S.H. The evaporative drying of sludge by immersion in hot oil: effects of oil type and temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 178, pp. 483–488.
20. Ohm T.I., Chae J.S., Lim K.S., Moon S.H. Evaluation of a hot oil immersion drying method for the upgrading of crushed low-rank coal. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, no. 4, pp. 1299–1303.
21. Chaedir B.A., Kurnia J.C., Sasmito A.P., Mujumdar A.S. Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology*, 2021, vol. 39, no. 11, pp. 1–18.
22. Fakhreddin S. Recent progress and application of freeze dryers for agricultural product drying. *ChemBioEng Reviews*, 2023, vol. 10, no. 5, pp. 618–627.
23. Necati C., Seda G., Kevser K., Cevdet S. Effect of pre-treatments assisted microwave drying on kinetics and energy aspects of dragon fruit. *Current Trends in Natural Sciences*, 2022, vol. 11, no. 21, pp. 79–87.
24. Uslu T., Atalay Ü. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite. *Fuel Processing Technology*, 2004, vol. 85, no. 1, pp. 21–29.
25. Barba A.A., Dalmoro A., D'Amore M. Microwave assisted drying of cellulose derivative (HPMC) granular solids. *Powder Technology*, 2013, vol. 237, pp. 581–585.
26. Karelin V.A., Salomatov V.V. Mathematical model of heat transfer in a dielectric layer under microwave irradiation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 375–380.
27. Seehra M.S., Kalra A., Manivannan A. Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves. *Fuel*, 2007, vol. 86, no. 5–6, pp. 829–834.
28. Huang J., Xu G., Liang Y., Hu G., Chang P. Improving coal permeability using microwave heating technology – a review. *Fuel*, 2020, vol. 266, pp. 1–16.
29. Mursito A.T., Hirajima T., Sasaki K. Upgrading and dewatering of raw tropical peat by hydrothermal treatment. *Fuel*, 2010, vol. 89, no. 3, pp. 635–641.
30. Favas G., Jackson W.R. Hydrothermal dewatering of lower rank coals. Effects of process conditions on the properties of dried product. *Fuel*, 2003, vol. 82, pp. 53–57.

31. Li J., Yu Y., Huang R., Yao X., Tang Y., He Y. Combustion performance of lignite after efficient upgrading via deep eutectic solvent-assisted hydrothermal dewatering. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 1–13.
32. Hulston J., Favas G., Chaffee A.L. Physico-chemical properties of Loy Yang lignite dewatered by mechanical thermal expression. *Fuel*, 2005, vol. 84, pp. 1940–1948.
33. Miura K., Mae K., Ashida R., Tamura T., Ihara T. Dewatering of Coal through Solvent Extraction. *Fuel*, 2002, vol. 81, no. 11, pp. 1417–1422.
34. Hu Z., Zhang X., Li X., Qian W., Luo G., Liu H., Hu H., Worasuwannarak N., Yao H. Degradative solvent extraction of low-rank coal: role of water on pyrolysis mechanism of low-rank coal in a highly-dispersed medium. *Carbon Resources Conversion*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 111–118.

Information about the authors

Vladimir V. Salomatov, Dr. Sc., Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Senior Researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. salomatov.vv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8072-3246>

Vadim A. Karelin, Senior Lecturer, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Engineer, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. vad2hen@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4813-8872>

Received: 05.09.2023

Revised: 13.02.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 66.088

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4634

Шифр специальности ВАК: 2.6.13

Технология плазменного разрядного синтеза нитрит-ионов для очистки сточных вод от водорастворимых соединений реакционного азота

А.А. Цхе¹✉, А.В. Мостовщиков², Н.В. Пилипец², Ал.Ал. Цхе³

¹ООО «Инжиниринговый химико-технологический центр», Россия, г. Томск

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

³Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, г. Томск

✉tskhe@ect-center.com

Аннотация. В настоящее время критическая ситуация по содержанию водорастворимых соединений азота наблюдается в водоемах большинства стран. В мировой практике принято считать, что наиболее перспективным методом удаления соединений азота из сточных вод является анаммокс-технология, основанная на биохимическом процессе окисления аммония нитритом в бескислородных условиях. В общем виде в ходе бактериального анамнокса происходит рекомбинация нитрит-иона и иона аммония, в результате которой они превращаются в молекулярный азот. Однако анаммокс-бактерии отличаются низкой скоростью роста и требуют специфических условий выращивания. В качестве альтернативы бактериальной анаммокс-технологии предложена технология плазменного СВЧ-разрядного синтеза нитрит-ионов NO_2^- из воздуха, осуществляемого в плазме СВЧ-разряда в плазмотроне магнетронного типа для очистки сточных вод от водорастворимых соединений реакционного азота. Уникальные возможности неравновесной низкотемпературной плазмы, как среды для протекания химических реакций, и, в частности, плазмы СВЧ-разряда, являются основой новых перспективных технологий. В условиях турбулентности СВЧ-разряда ионизированные молекулы азота N_2^+ и кислорода O_2^- , приблизившись друг к другу, взаимодействуют, запуская лавинообразный каскад реакций с образованием двух молекул монооксида азота NO , что является пусковым для перехода из электронно-ударной стадии плазмохимических реакций в стадию лавинообразного фотолитического синтеза оксидов азота NO_x . Исходя из результатов изучения концентрации конечных продуктов плазмохимических реакций в зоне СВЧ-разряда, преобладающее значение имеет синтез нитрит-ионов NO_2^- . Проведены экспериментальные исследования воздействия полученного на выходе плазмотрона потока нитрит-ионов NO_2^- на модельный раствор гидрата аммиака (NH_4OH) в концентрации 150 мг/л. Наиболее оптимальным явилось время воздействия ионизированного газа на модельный раствор в течение 5 минут, эффективность удаления ионов аммония при этом составила 99,83 %. Таким образом, технология плазменного СВЧ-разрядного синтеза нитрит-ионов NO_2^- может являться альтернативой биологической анаммокс-технологии и отличается простотой технической реализации.

Ключевые слова: азот, сточные воды, анаммокс-технология, гидрат аммиака, плазма СВЧ-разряда, синтез нитрит-ионов

Благодарности: Выражаем особую благодарность за содействие в работе и ценные рекомендации кандидату химических наук Алексею Павловичу Смирнову, кандидату технических наук Алексею Григорьевичу Жерлицыну и кандидату физико-математических наук Владимиру Петровичу Шиян.

Для цитирования: Технология плазменного разрядного синтеза нитрит-ионов для очистки сточных вод от водорастворимых соединений реакционного азота / А.А. Цхе, А.В. Мостовщиков, Н.В. Пилипец, Ал.Ал. Цхе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 194–201. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4634

UDC 66.088

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4634

Plasma discharge synthesis of nitrite ions for wastewater treatment from water-soluble compounds of reactive nitrogen

A.A. Tskhe¹✉, A.V. Mostovshchikov², N.V. Pilipets², Al.Al. Tskhe³

¹ LLC «Engineering Chemical Technology Center», Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russian Federation

✉ tskhe@ect-center.com

Abstract. Currently, there is a critical situation of high matter of water-soluble nitrogen compounds in water bodies of developed countries. In world practice, it is believed that the most promising method for removing nitrogen compounds from wastewater is anammox technology based on the biochemical process of oxidizing ammonium with nitrite under anoxic conditions. Bacterial anammox is based on the reaction between nitrite ion and ammonium ion, which converts them to molecular nitrogen. However, anammox bacteria are characterized by a low growth rate and require specific growing conditions. As an alternative to the bacterial anammox technology, there is proposed a technology of plasma microwave-discharge synthesis of nitrite ions NO_2^- from air, carried out in a microwave plasma in a magnetron-type plasmatron for purifying waste water from water-soluble compounds of reaction nitrogen. The unique possibilities of non-equilibrium low-temperature plasma, as a medium for chemical reactions, and, in particular, in microwave plasma, are the basis of new promising technologies. Under the conditions of microwave discharge turbulence, ionized molecules of nitrogen N_2^+ and oxygen O_2^- , approaching each other, interact, it triggers an avalanche-like cascade of reactions with the formation of two molecules of nitrogen monoxide NO, which is starting for the transition from the electron shock stage of plasma chemical reactions to the stage of avalanche-like photolytic synthesis of nitrogen oxides NO_x . Based on the results of studying the concentration of the final products of plasma chemical reactions in the microwave discharge zone, the synthesis of nitrite ions of NO_2^- is predominant. Experimental studies were carried out on the effect of the NO_2^- nitrite ion stream obtained at the plasmatron outlet on a model solution of ammonia hydrate (NH_4OH) at a concentration of 150 mg/l. The most optimal was the time of exposure of ionized gas to the model solution for 5 minutes, while the efficiency of removing ammonium ions was 99.83%. Thus, plasma microwave-discharge synthesis of nitrite ions NO_2^- can be an alternative to biological anammox technology and is characterized by simple and compact installation.

Keywords: nitrogen, wastewater, anammox technology, ammonia hydrate, microwave discharge plasma, synthesis of nitrite ions

Acknowledgements: The authors express special gratitude to Aleksey P. Smirnov, Cand. Sc., Aleksey G. Zherlitsyn, Cand. Sc., and Vladimir P. Shiyon, Cand. Sc., for assistance in the work and valuable recommendations.

For citation: Tskhe A.A., Mostovshchikov A.V., Pilipets N.V., Tskhe Al.Al. Plasma discharge synthesis of nitrite ions NO_2^- for wastewater treatment from water-soluble compounds of reactive nitrogen. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 194–201. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4634

Азот является основным компонентом земной атмосферы, а анаммокс – один из ключевых микробных процессов в его круговороте.

Проблема загрязнения рек и озёр водорастворимыми соединениями реакционного азота носит глобальный характер. Критическая ситуация по превышению их концентрации наблюдается практически во всех водоёмах развитых стран [1]. Известно [2, 3], что основными источниками загрязнения гидросферы водорастворимыми соединениями реакционного азота являются хозяйственно-бытовые и промышленные стоки, поверхностные и внутрипочвенные смывы азотных удобрений, а также разложение отмерших организмов и органики растительного про-

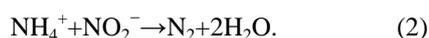
исхождения. Конечным продуктом природного катаболизма азотсодержащих соединений является химически устойчивый гидрат аммиака $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (NH_4OH), который в растворе обладает способностью диссоциировать на ион аммония NH_4^+ и гидроксильную группу OH^- , процесс его образования находится в соответствии с реакцией (1):



Накопление иона аммония NH_4^+ наносит значительный вред окружающей среде и здоровью людей.

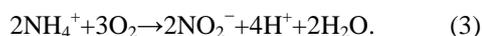
Мировая практика очистки сточных вод от органических загрязнений и загрязнений воды от водорастворимых соединений реакционного азота, в

частности, представлена методикой биологической очистки, в основу которой положен способ отстаивания загрязнённых стоков в резервуарах-отстойниках, где посредством добавки коагулянтов и других реагентов связываются и осаждаются находящиеся в стоках вредные примеси. Это длительный и энергозатратный процесс, который не может обеспечить в короткие сроки качественную очистку больших объёмов загрязнённых стоков. Поэтому с конца XX в. приобретает популярность более прогрессивный метод очистки сточных вод от водорастворимых соединений реакционного азота – метод бактериального анаммокса [4, 5], основанный на окислении анаэробными бактериями ионов аммиака, где главную роль играют анаммокс-бактерии, относящиеся к типу планктомицетов. Следует отметить, что эти бактерии были случайно открыты в 90-е гг. прошлого века [6]. Открытие анаммокс-бактерий запустило процесс развития новых технологий удаления азота из сточных вод, характеризующихся высоким содержанием аммония. Использование процесса анаммокс при очистке фильтрационных вод полигонов твердых бытовых отходов, иловой воды метантенков, стоков пищевой промышленности позволяет исключить стадию денитрификации и значительно уменьшает стоимость аэробной нитрификации. Технологический аспект функционирования анаммокс-бактерий к настоящему времени изучен хорошо и является достаточно эффективным способом борьбы с реакционным азотом в сточных водах, что и позволило на его основе реализовать различные технологии удаления азота из стоков с применением анаммокс-процесса, а именно Sharon-anammox, Canon, Deamox и т. д. В его основе лежит биохимический процесс. Анаэробные анаммокс-бактерии получают энергию за счет анаэробного окисления аммония нитрит-анионом NO_2^- , вырабатываемым аммоксосомой – специализированной бактериальной оргanelлой, имеющейся только у этих бактерий. В результате реакционный азот, взятый из внешнего субстрата, связывается нитрит-ионом биохимического генезиса в молекулы химически инертного молекулярного азота по обобщённой реакции (2):



При более детальном рассмотрении бактериального анаммокса можно видеть, что он состоит из двух отдельных процессов.

Первый заключается в нитрификации анаммокс-бактериями, окисляющими аммиак, половины исходного аммония до нитрита (3):



Далее остатки аммония и нитриты в ходе бактериального анаммокса, осуществляемого второй

группой бактерий, превращаются в нитрит и молекулярный азот (4):



Оба процесса реализуются бактериями двух разных групп в специальных танках-реакторах. Выращивание гранулярной биомассы или биоплёнки из бактерий для анаммокса требует специфических условий (температура, давление, газовый состав и т. д.), при несоблюдении которых бактерии погибают. Анаммокс-бактерии отличаются поразительно низкой скоростью роста: время удвоения численности составляет от 7 до 22 дней. Поэтому достаточный для анаммокса объём бактериальной культуры выращивается как минимум на протяжении 20 дней [7–9]. Таким образом, целью является разработка научных основ и экспериментальная проверка возможности плазменного разрядного синтеза нитрит-ионов для очистки сточных вод от водорастворимых соединений реакционного азота.

Экспериментальная часть

Учитывая, что бактериальный анаммокс функционирует исключительно благодаря биогенному синтезу нитрит-ионов, научный коллектив Томского политехнического университета разработал альтернативный метод технического синтеза нитрит-ионов NO_2^- из воздуха, осуществляемый в плазме СВЧ-разряда в плазмотроне магнетронного типа [10], который способен полностью заменить функцию анаммокс-бактерий по генерации нитрит-ионов.

В основе предлагаемого метода лежит механизм синтеза оксидов азота NO_x в плазме СВЧ-разряда, где плазмообразующим газом является воздух. Химический состав воздуха: N_2 78 %, O_2 21 %, другие газы 1 %.

Процесс генерации нитрит-ионов NO_2^- начинается с образования в разрядной камере плазмотрона электронно-ударных ионов. При некотором статистическом допущении одна из ста молекул азота, проходящего через плазмотрон воздуха, не возбуждается как остальные 99 молекул, а ионизируется с образованием иона N_2^+ . Одновременно с этим в плазме СВЧ-разряда существует высокая вероятность образования из воздуха и ионизированной молекулы кислорода (5) [11, 12]:

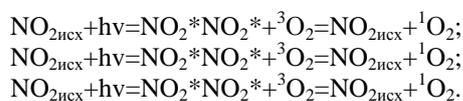


Тогда в условиях турбулентности СВЧ-разряда эти ионы, приблизившись друг к другу, взаимодействуют, запуская лавинообразный каскад реакций, в основе которого лежит контакт этих единичных ионов: N_2^+ и O_2^- , в результате образуются две молекулы монооксида азота NO , что является пусковым для перехода из электронно-ударной стадии

плазмохимических реакций в стадию лавинообразного фотолитического синтеза оксидов азота NO_x [13–17].

Единичные молекулы монооксида азота NO окисляются возбуждённым кислородом O_2^* , образуя молекулы диоксида азота NO_2 . После этого синтез оксидов азота в плазме СВЧ-разряда мог бы закончиться, но, так как возбуждённые электроны в плазме СВЧ-разряда являются вторичными, а переменное электромагнитное поле первичным плазмформирующим фактором, основным энергоносителем в плазме всегда будет электромагнитное поле с заданными параметрами, которое определяется энергией дискретных частиц плазмы фотонов-квантов. Следовательно, основная функция по образованию и преобразованию вещества в плазме принадлежит именно фотонам-квантам [18, 19]. Таким образом, вновь образованные в результате ударной ионизации ионы азота и кислорода, объединившиеся в единичное количество молекул диоксида азота NO_2 , начнут выполнять функцию «затравочных» ионов в стадии фотолитических лавинообразных реакций синтеза оксидов азота NO_x . Объясняется это тем, что молекулы диоксида азота NO_2 по своей физической природе являются активными сенсбилизаторами (S) (накопителями) энергии электромагнитного излучения. Они в широком частотном диапазоне поглощают кванты электромагнитного излучения, которые с избытком генерируют возбуждённые электромагнитным излучением метастабильные молекулы и атомы плазмообразующего воздуха.

Молекулы диоксида азота NO_2^* генерируют кванты электромагнитного излучения со строго определённой длиной волны – 260 нм, которые избирательно поглощаются молекулами триплетного кислорода O_2 , в результате чего изменяется их электронная конфигурация с образованием синглетного кислорода $^1\text{O}_2$, обладающего мощнейшим реакционным потенциалом:



Из приведённых выше физико-химических реакций видно, что одна и та же молекула диоксида азота $\text{NO}_{2\text{исх}}$ последовательно участвует в образовании трёх молекул синглетного кислорода $^1\text{O}_2$. А так как концентрация высокоэнергетических квантов в плазме СВЧ-разряда чрезвычайно высокая и скорость плазмохимических реакций измеряется долями наносекунд, то те единичные молекулы NO_2 , которые образовались на начальном этапе плазмохимических реакций, практически мгновенно переводят весь находящийся в объёме разрядника плазмотрона триплетный кислород $^3\text{O}_2$ в его

синглетную модификацию $^1\text{O}_2$, который мгновенно вступает в реакцию с молекулами присутствующего в зоне СВЧ-разряда метастабильного азота N_2^* [20–23].

Таким образом, реакция перевода триплетного кислорода $^3\text{O}_2$ квантами возбуждённых молекул диоксида азота NO_2^* в молекулы синглетного кислорода $^1\text{O}_2$ приобретает лавинообразный характер, и нарастание этого процесса ограничивается только скоростью протока исходного молекулярного кислорода через плазмотрон и его концентрацией в плазмообразующем газе. Так как скорость плазмохимических реакций в зоне СВЧ-разряда (в плазмотроне) не превышает наносекунды, то теоретическая продуктивность реакций фотолитического синтеза синглетного кислорода в плазме СВЧ-разряда очень высокая. В результате в плазме СВЧ-разряда появляется большое количество синглетного кислорода $^1\text{O}_2$, и после начальной электронно-ударной стадии ионизации небольшого числа исходных молекул кислорода и азота процесс фотолитического синтеза диоксидов азота NO_x приобретает лавинообразный характер [24, 25].

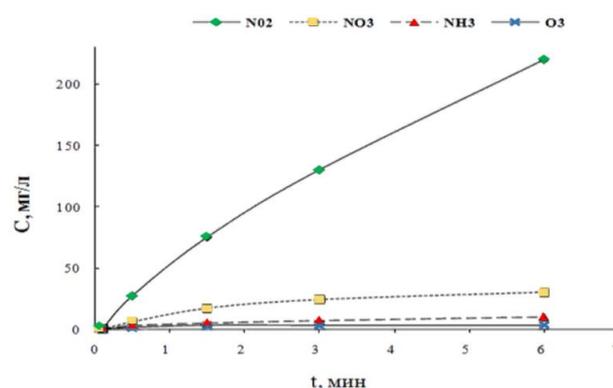


Рис. 1. Скорость нарастания концентрации нитрит-ионов в плазмообразующем газе в зависимости от разогрева плазмотрона

Fig. 1. Rate of increase in concentration of nitrite ions in the plasma-forming gas depending on plasmatron heating

Исходя из результатов изучения концентрации конечных продуктов плазмохимических реакций в зоне СВЧ-разряда, представленных на рис. 1, преобладающее значение имеет синтез нитрит-ионов NO_2^- . Их концентрация на порядок превышает концентрацию образующихся нитрат-ионов NO_3^- . Следует отметить, что в результате диссоциации в зоне СВЧ-разряда молекулярного азота N_2 (не более 1 %) происходит и синтез аммиака NH_3 , но ввиду того, что его концентрация чрезвычайно низкая, процесс носит побочный характер. Также в результате диссоциации в зоне СВЧ-разряда незна-

чительного количества молекулярного кислорода O_2 образуется озон O_3 , но его концентрация настолько мала, что присутствие озона в продуктах плазмохимических реакций носит следовой характер [26–29].

Основным аппаратом экспериментальной установки явился СВЧ-плазмотрон, спроектированный и сконструированный в Лаборатории «Радиационные и плазменные технологии» НИ ТПУ. Схема СВЧ-плазмотрона представлена на рис. 2 [10].

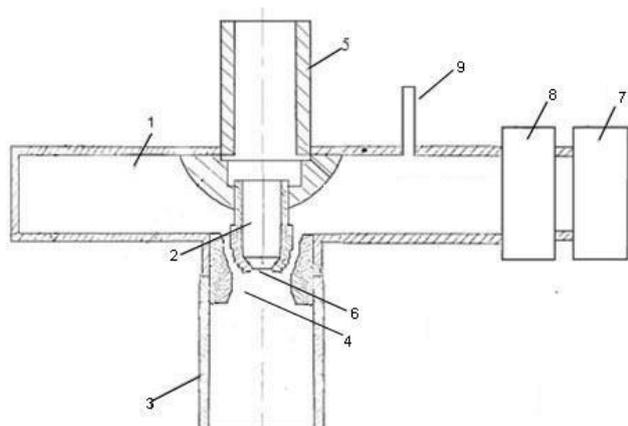


Рис. 2. Схема СВЧ-плазмотрона: 1 – прямоугольный волновод; 2 – внутренний проводник коаксиальной линии; 3 – внешний проводник коаксиальной линии; 4 – разрядная камера; 5 – трубопровод; 6 – сопло; 7 – магнетрон; 8 – циркулятор; 9 – патрубок

Fig. 2. Microwave plasmatron circuit: 1 is the rectangular waveguide; 2 is the inner conductor of a coaxial line; 3 is the outer conductor of a coaxial line; 4 is the discharge chamber; 5 is the pipeline; 6 is the nozzle; 7 is the magnetron; 8 is the circulator; 9 is the branch pipe

Экспериментальная установка работает следующим образом. В разрядной камере – 4 включается система инициирования СВЧ-разряда. По трубопроводу – 5 через сопло – 6 в разрядную камеру подается воздух и включается магнетрон. По волноводу – 1 через коаксиально-волноводный переход СВЧ-энергия от магнетрона подается в разрядную камеру. В зоне сопла – 6 из-за падающей и отраженной электромагнитных волн происходит увеличение напряженности электрического поля до пробивного значения. В результате загорается СВЧ-разряд в атмосфере воздуха и образуется неравновесная низкотемпературная плазма [10].

В качестве модельного раствора был выбран водный раствор гидрата аммиака (NH_4OH) в концентрации 150 мг/л как пример основной азотсодержащей примеси в сточных водах. Плазмообразующий газ – воздух.

Один литр модельного раствора в течение 1, 3, 5, 10 минут барботировали полученным на выходе плазмотрона потоком нитрит-ионов NO_2^- . Усреднённая концентрация доставляемых в модельный раствор нитрит-ионов составила 50 мг в минуту.

Результаты эксперимента представлены в таблице и на рис. 3.

Таблица. Изменение концентрации гидрата аммиака после взаимодействия с ионизированным газом

Table. Change in ammonia hydrate concentration after interaction with ionized gas

Исходная концентрация, мг/л Initial concentration, mg/L	Концентрация после барботирования ионизированным газом, мг/л Concentration after bubbling with ionized gas, mg/L			
	1 мин/мин	3 мин/мин	5 мин/мин	10 мин/мин
150	117,6	51,1	1,1	0,3

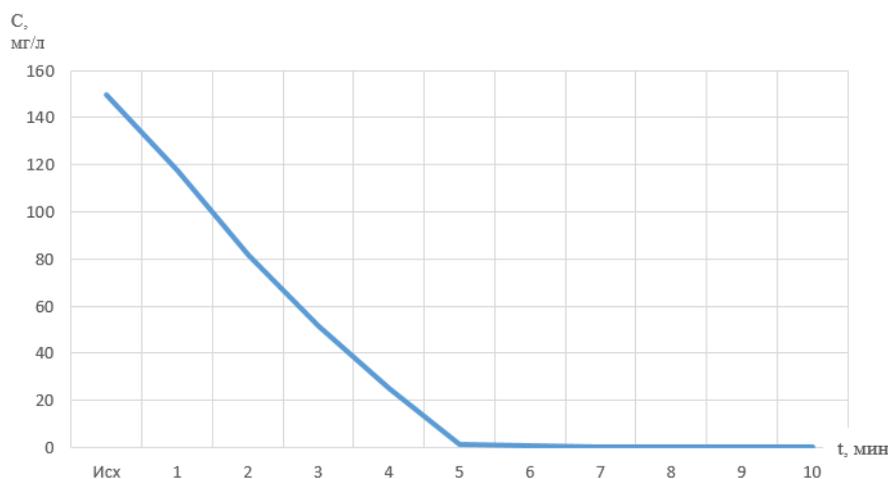


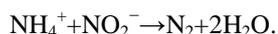
Рис. 3. Результаты взаимодействия исследуемого раствора с ионизированным газом в течение 1, 3, 5, 10 минут

Fig. 3. Results of the test solution interaction with ionized gas within 1, 3, 5, 10 minutes

Исходя из результатов эксперимента, наиболее оптимальным явилось воздействие ионизированного газа на модельный раствор в течение 5 минут, в дальнейшем, при увеличении времени контакта раствора с нитрит-ионами, наблюдалось незначительное снижение концентрации ионов аммония. Эффективность удаления ионов аммония составила 99,83 %.

Заключение

Таким образом, эффективность удаления ионов аммония обусловлена генерацией ионизированных нитрит-ионов в плазме СВЧ-разряда, которые нейтрализуют ионы аммония в воде по реакции:



Основой биологической анаммокс-технологии является бактериальный синтез нитрит-иона NO_2^- . Для этого требуется специальное оборудование и крайне специфические условия при выращивании бактериальной массы. Длительные сроки и непредсказуемость результатов процесса не создают предпосылок для широкого применения такой технологии, а значит, не решают проблемы устранения водорастворимых соединений азота в водоёмах.

Разработанная и апробированная технология плазменного СВЧ-разрядного синтеза нитрит-ионов NO_2^- , которая ввиду простоты конструкции и эксплуатации лишена этих недостатков, является альтернативой этим процессам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmed J., Thakur A., Goyal A. Biological treatment of industrial wastewater // The Royal Society of Chemistry. – 2022. – P. 1–14.
2. Кондратьева Л.М. Экологический риск загрязнения водных экосистем / под ред. К.П. Караванова. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 299 с.
3. Analysis of the content of nitrogen-containing compounds in waste and surface waters in the urbanized territories of the Kaluga region / K. Gorbunov, A.Yu. Loginova, N.A. Silaeva, S.A. Kusacheva, M.E. Safronova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2647. – № 1. DOI: 10.1063/5.0106100.
4. Candidatus «*Jettenia moscovienalis*» sp.nov. – новый вид бактерий, осуществляющих анаэробное окисление аммония / Ю.А. Николаев, М.Н. Козлов, М.В. Кеврина, А.Г. Дорофеев, Н.В. Пименов, А.Ю. Каллистова, В.А. Грачев, Е.А. Казакова, А.В. Жарков, Б.Б. Кузнецов, Е.О. Патугина, Б.К. Бумажкин // Микробиология. – 2015. – Т. 84. – № 2. – С. 236–243.
5. Cho S., Kambey C., Nguyen V. Performance of anammox processes for wastewater treatment: a critical review on effects of operational conditions and environmental stresses // Water. – 2019. DOI: 10.3390/w12010020.
6. Nitrogen removal by a nitrification-anammox bioreactor at low temperature / Z. Hu, T. Lotti, M. de Kreuk, R. Kleerebezem, M. van Loosdrecht, J. Kruit, M.S. Jetten, B. Kartal // Appl. Environ. Microbiol. – 2013. – Vol. 79. – № 8. – P. 2807–2812. DOI: 10.1128/AEM.03987-12.
7. Внесение экзогенного активного ила как способ повышения эффективности удаления азота в процессе Анаммокс / Н.В. Пименов, Ю.А. Николаев, А.Г. Дорофеев, В.А. Грачев, А.Ю. Каллистова, Т.А. Канапацкий, Ю.В. Литти, Е.В. Груздев, Ш.А. Бегматов, Н.В. Равин, А.В. Марданов. // Микробиология. – 2022. – Т. 91. – № 4. – С. 410–418.
8. Anammox bacteria enrichment and characterization from municipal activated sludge / J.C. Araujo, A.C. Campos, M.M. Correa, E.C. Silva, M.H. Matte, G.R. Matte, M. von Sperling, C.A. Chernicharo // Water Science and Technology. – 2011. – Vol. 64. – № 7. – P. 1428–1434.
9. Инновационная энергоэффективная и ресурсосберегающая технология очистки сточных вод от аммония в анаэробно-аноксидных условиях / Ю.А. Николаев, М.Н. Козлов, А.М. Гаврилин, М.В. Кеврина, Н.В. Пименов, А.Г. Дорофеев, А.М. Агарев, А.Ю. Каллистова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 10. – С. 30–35.
10. Деструкция органических соединений в газовой и жидкой средах в плазме СВЧ-разряда / А.Г. Жерлицын, В.П. Шиян, Л.Н. Шиян, С.О. Магомадова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 65–71.
11. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Химия плазмы / под ред. Б.М. Смирнова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – № 11. – 216 с.
12. Быков Ю.В. Диссоциация кислорода и образование озона в самостоятельном СВЧ-разряде // Химия высоких энергий. – 1984. – Т. 18. – № 4. – С. 347–351.
13. Глинка Н.Л. Общая химия / под ред. А.И. Ермакова. – М.: Интеграл-Пресс, 2003. – 728 с.
14. Messerle V.E., Ustimenko A.V. Plasma // Encyclopedia of Plasma Technology / Ed. by J. Leon Shohet. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – P. 269–283.
15. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибкое В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. – М.: Нефть и газ, 1996. – 203 с.
16. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы. – Л.: Химия, 1981. – 248 с.
17. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. – М.: Наука, 1984. – 415 с.
18. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / под ред. Ю.А. Лебедева. – М.: ЯНУС, 2005. – Т. VIII. – 576 с.
19. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков / под ред. В.А. Курнаева. – М.: МИФИ, 2007. – 368 с.
20. Identification of mechanisms for decomposition of air pollutants by non-thermal plasma processing / B. Penetrante, M.C. Hsiao, J.N. Bardyless, V.T. Merrit, G.E. Vogtlin, A. Kuthi, C.P. Burkhart, J.R. Bayless // Plasma Sources Sci. Technol. – 1997. – Vol. 6. – P. 251–259.
21. Pulsed microwave discharge at atmospheric pressure for NOx decomposition / M. Baeva, H. Gier, A. Pott, J. Uhlenbusch, J. Hoschele, J. Steinwandel // Plasma Sources Sci. Technol. – 2002. – Vol. 11. – P. 1–9.

22. Non-thermal plasma remediation of SO₂/NO using a dielectric-barrier discharge / W. Sun, B. Pashai, S.K. Dhali, F.I. Honea // *Appl. Phys.* – 1996. – Vol. 79. – P. 3438–3444.
23. Gordiets B., Ricard A. Production of N, O and NO in N₂-O₂ flowing discharges Plasma // *Sources Sci. Technol.* – 1993. – Vol. 2. – P. 158–163.
24. Influence of nitrogen on the oxygen dissociation in a DC discharge / A.R. de Souza, C.M. Mahlmann, J.L. Muzart, C.V. Speller // *Appl. Phys.* – 1993. – Vol. 26. – P. 2164–2167.
25. Foner S.N., Hudson R.I. Metastable oxygen molecules produced by electrical discharges // *Chem. Phys.* – 1956. – Vol. 25. – P. 601–602.
26. Азотное удобрение и способ его получения: пат. № 2650545С1 Российская Федерация, МПК C05C11/00, A01N59/00, A01N25/02, B01J19/08; заявл. 03.05.2017; опубл. 16.04.2018. – Бюл. № 11. – 15 с.
27. Асанина С.Г., Корнеева М.А. Многомодовый режим генерации плазмы СВЧ-разряда в открытой магнитной ловушке // *Физика плазмы.* – 2022. – Т. 48. – № 2. – С. 116–120.
28. Lee H.R., Lee Y.S. Antimicrobial effects of microwave plasma-activated water with skin protective effect for novel disinfectants in pandemic era // *Scientific Reports.* – 2022. – Vol. 12.
29. Plasma generation by household microwave oven for surface modification and other emerging applications / B.K. Barnes, H. Ouro-Koura, J. Derickson, S. Lebart, J. Omidokun, N. Bane, O. Suleiman, E. Omagamre, M.J. Fotouhi, A. Ogunmolasuyi, A. Dominguez, L. Gonick, K.S. Das. // *Am. J. Phys.* – 2021. – Vol. 89. – № 4. – P. 372–382.

Информация об авторах

Анна Александровна Цхе, помощник директора, ООО «Инжиниринговый химико-технологический центр», Россия, 634028, г. Томск, Московский тракт, 57. tskhe@ect-center.com

Андрей Владимирович Мостовщиков, доктор технических наук, профессор отделения химической инженерии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. pasembellum@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6401-9243>

Наталья Викторовна Пилипец, кандидат технических наук, заведующая лабораторией НПЛ «Чистая вода», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30. chemu@tpu.ru

Александр Алексеевич Цхе, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и инженерных систем в строительстве, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2. pkbtb23@mail.ru

Поступила в редакцию: 13.03.2024

Поступила после рецензирования: 09.04.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Ahmed J., Thakur A., Goyal A. Biological treatment of industrial wastewater. *The Royal Society of Chemistry*, 2022. pp. 1–14.
2. Kondratyeva L.M. *Environmental risk of pollution of aquatic ecosystems*. Ed. by K.P. Karavanov. Vladivostok, Dalnauka, 2005. 299 p. (In Russ.)
3. Gorbuonov A.K., Loginova A.Yu., Silaeva N.A., Kusacheva S.A., Safronova M.E. Analysis of the content of nitrogen-containing compounds in waste and surface waters in the urbanized territories of the Kaluga region. *AIP Conference Proceedings*, 2022. vol. 2647, no. 1. DOI: 10.1063/5.0106100.
4. Nikolaev Yu.A., Kozlov M.N., Kevbrina M.V., Dorofeev A.G., Pimenov N.V., Kallistova A.Yu., Grachev V.A., Kazakova E.A., Zharkov A.V., Kuznetsov B.B., Patutina E.O., Shumkin B. C. Candidatus "Jettenia moscovienalis" sp.nov. – a new type of bacteria performing anaerobic oxidation of ammonium. *Microbiology*, 2015, vol. 84, no. 2, pp. 236–243. (In Russ.)
5. Cho S., Kambey C., Nguyen V. Performance of anammox processes for wastewater treatment: a critical review on effects of operational conditions and environmental stresses. *Water*, 2019. DOI: 10.3390/w12010020.
6. Hu Z., Lotti T., De Kreuk M., Kleerebezem R., Van Loosdrecht M., Kruit J., Jetten M.S., Kartal B. Nitrogen removal by a nitrification-anammox bioreactor at low temperature. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2013, vol. 79, no. 8, pp. 2807–2812. DOI: 10.1128/AEM.03987-12.
7. Pimenov N.V., Nikolaev Yu.A., Dorofeev A.G., Grachev V.A., Kallistova A.Y., Kanapatsky T.A., Littl Yu.V., Gruzdev E.V., Begmatov S.A., Ravin N.V., Mardanov A.V. Introduction of exogenous active sludge as a method for increasing the efficiency of nitrogen removal in the Anammox process. *Microbiology*, 2022, vol. 91, no. 4, pp. 410–418. (In Russ.)
8. Araujo J.C., Campos A.C., Correa M.M., Silva E.C., Matte M.H., Matte G.R., Von Sperling M., Chernicharo C.A. Anammox bacteria enrichment and characterization from municipal activated sludge. *Water Science and Technology*, 2011, vol. 64, no. 7, pp. 1428–1434.
9. Nikolaev Yu.A., Kozlov M.N., Gavrilin A.M., Kevbrina M.V., Pimenov N.V., Dorofeev A.G., Agarev A.M., Kallistova A.Yu. Innovative energy-efficient and resource-saving technology for treating wastewater from ammonium in anaerobic-anoxide conditions. *Water supply and sanitary equipment*, 2016, no. 10, pp. 30–35. (In Russ.)
10. Zherlitsyn A.G., Shiyan V.P., Shiyan L.N., Magomadova S.O. Destruction of organic compounds in gas and liquid media in microwave plasma. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 65–71. (In Russ.)

11. Zhivotov V.K., Rusanov V.D., Fridman A.A. *Plasma Chemistry*. Ed. by B.M. Smirnov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. No. 11, 216 p. (In Russ.)
12. Bykov Yu.V. Oxygen dissociation and ozone formation in an independent microwave discharge. *High energy chemistry*, 1984, vol. 18, no. 4, pp. 347–351. (In Russ.)
13. Glinka N.L. *General chemistry*. Ed. by A.I. Ermakov. Moscow, Integral-Press, 2003. 728 p. (In Russ.)
14. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma. *Encyclopedia of Plasma Technology*. Ed. by J. Leon Shohet. Boca Raton, CRC Press, 2017. pp. 269–283.
15. Zarin A.C., Kuzovnikov A.A., Shibkoy V.M. *Free localized microwave discharge in the air*. Moscow, Oil and gas Publ., 1996. 203 p. (In Russ.)
16. Krapivina S.A. *Plasmochemical technological processes*. Leningrad, Khimiya Publ., 1981. 248 p. (In Russ.)
17. Rusanov V.D., Friedman A.A. *Physics of chemically active plasma*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 415 p. (In Russ.)
18. Lebedev Yu.A. *Encyclopedia of low temperature plasma*. Moscow, JANUS Publ., 2005. Vol. VIII, 576 p. (In Russ.)
19. Zhdanov S.K., Kurnaev V.A., Romanovsky M.K., Tsvetkov I.V. Ed. by V.A. Kurnaev. *Basics of physical processes in plasma and plasma installations*. Moscow, MEFPhI, 2007. 368 p. (In Russ.)
20. Penetrante B., Hsiao M.C., Bardyles J.N., Merrit B.T., Vogtlin G.E., Kuthi A., Burkhart C.P., Bayless J.R. Identification of mechanisms for decomposition of air pollutants by non-thermal plasma processing. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1997, vol. 6, pp. 251–259.
21. Baeva M., Gier H., Pott A., Uhlenbusch J., Hoschele J., Steinwandel J. Pulsed microwave discharge at atmospheric pressure for NOx decomposition. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2002, vol. 11, pp. 1–9.
22. Sun W., Pashai B., Dhali S.K., Honea F.I. Non-thermal plasma remediation of SO₂/NO using a dielectric-barrier discharge. *Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, pp. 3438–3444.
23. Gordiets B., Ricard A. Production of N, O and NO in N₂-O₂ flowing discharges plasma. *Sources Sci. Technol.*, 1993, vol. 2, pp. 158–163.
24. De Souza A.R., Mahlmann C.M., Muzart J.L., Speller C.V. Influence of nitrogen on the oxygen dissociation in a DC discharge. *Appl. Phys.*, 1993, vol. 26, pp. 2164–2167.
25. Foner S.N., Hudson R.I. Metastable oxygen molecules produced by electrical discharges. *Chem. Phys.*, 1956, vol. 25, pp. 601–602.
26. Golovatskaya I.F., Efimova M.V., Boyko E.V., Vidershpan A.N., Smirnov A.P., Reznikov I.V., Gerlitsyn A.G., Shiyan V.P. *Nitrogen fertilizer and method of its production*. Patent RF, no. 2650545C1, 2018. (In Russ.)
27. Asanina S.G., Korneeva M.A. Multimode mode of microwave discharge plasma generation in an open magnetic trap. *Plasma physics*, 2022, vol. 48, no. 2, pp. 116–120.
28. Lee H.R., Lee Y.S. Antimicrobial effects of microwave plasma-activated water with skin protective effect for novel disinfectants in pandemic era. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12.
29. Barnes B.K., Ouro-Koura H., Derickson J., Lebart S., Omidokun J., Bane N., Suleiman O., Omagamre E., Fotouhi M.J., Ogunmolasuyi A., Dominguez A., Gonick L., Das K.S. Plasma generation by household microwave oven for surface modification and other emerging applications. *Am. J. Phys.*, 2021, vol. 89, no. 4, pp. 372–382.

Information about the authors

Anna A. Tskhe, Assistant Director, LLC «Engineering Chemical Technology Center», 57, Moskovsky trakt, Tomsk, 634028, Russian Federation. tskhe@ect-center.com

Andrey V. Mostovshchikov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. pasembellum@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6401-9243>

Natalia V. Pilipets, Cand. Sc., Head of the Laboratory RPL "Clean Water", National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. chemy@tpu.ru

Aleksander A. Tskhe, Cand. Sc., Associate Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russian Federation. pkbt23@mail.ru

Received: 13.03.2024

Revised: 09.04.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 622.279.72

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4366

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Компьютерное моделирование технологических параметров и методов предотвращения образования гидратов

О.В. Савенок^{1✉}, Н.Х. Жарикова¹, А.Е. Верисокин², А.С. Арутюнян³, М. Хадид⁴

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

² Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, г. Ставрополь

³ Кубанский государственный технологический университет, Россия, г. Краснодар

⁴ Университет Аль-Баас, Сирийская Арабская Республика, Дамаск

✉ Savenok_OV@pers.spmi.ru

Аннотация. Актуальность. Как и множество месторождений Западной и Восточной Сибири, месторождения о. Сахалин (рассматриваемое Восточно-Луговское газовое месторождение) столкнулись с проблемой образования газовых гидратов во внутрискважинном оборудовании и наземных сетях сбора и подготовки к транспорту. Гидратообразования закупоривают скважины, шлейфы и газопроводы, снижая площадь их рабочего сечения, что ведёт к снижению дебита или полной остановке работы оборудования. Также нарушается работа клапанов, измерительных приборов, сепараторов и штуцеров. Всё это приводит к значительным экономическим потерям и снижает эффективность ведения процесса разработки и эксплуатации месторождения. Наибольшему влиянию подвержены месторождения, находящиеся на поздних стадиях эксплуатации, ввиду невозможности обеспечения безгидратного режима работы скважин. С точки зрения рациональности ведения процесса разработки выгоднее предотвратить образование гидратов, нежели бороться с уже образовавшимися отложениями. Стоит также отметить целесообразность переноса места локализации отложения гидратов из скважины на поверхность, где бороться с данным осложнением гораздо проще и экономически эффективнее, чем в скважине. Этого можно добиться, воздействуя на параметры процесса образования отложения, из которых на состав газа влиять невозможно. Смещение равновесных условий образования гидратов за счёт повышения минерализации также неэффективно, поскольку возрастает риск отложения солей и коррозии. Так, возможным остаётся регулирование термобарических параметров путём изменения технологического режима работы скважины, теплоизоляции или покрытие внутренней части насосно-компрессорных труб материалами, а также скважинными электронагревателями, исключающими возможность образования отложения. **Цель:** обоснование технологии повышения эффективности эксплуатации добывающих скважин в условиях гидратообразования. **Объекты:** газовые скважины, работающие в условиях гидратообразования, а также связи и зависимости режимных параметров работы скважины и других технологических параметров на потенциальную возможность образования гидратов. **Методы:** анализ геолого-физических условий и состояния разработки Восточно-Луговского газового месторождения; компьютерное и математическое моделирование работы скважин на месторождении в условиях образования гидратов; анализ способов предотвращения образования гидратов и выбор технологического решения. **Результаты.** Проблема образования гидратов широко распространена на газовых месторождениях. Гидраты могут частично или полностью перекрывать рабочее сечение добывающих скважин, снижая или полностью прекращая добычу, вследствие чего добывающие скважины простаивают в среднем 18 часов в месяц, что влечёт за собой экономические потери и мешает стабильной работе скважины. Показано, что ввиду специфики работы скважин Восточно-Луговского газового месторождения изменение технологического режима на безгидратный на данный момент невозможно. По результатам моделирования работы скважины основные потери температуры происходят за счёт отвода тепла через насосно-компрессорные трубы. Из способов предотвращения образования гидратов рассмотрены: теплоизоляция насосно-компрессорных труб, частичное силикатно-эмалевое покрытие, применение греющего кабеля и использование метанола. По результатам оценки экономической и технологической эффективности выбрана технология греющего кабеля с установкой турбодетандера для компенсации затрат на электроэнергию, а также спуск второго ряда насосно-компрессорных труб до глубины потенциального образования гидратов с целью повышения эффективности нагрева и проведения закачки теплоносителя или ингибитора непосредственно в интервал образования гидратов.

Ключевые слова: построение модели и входные параметры модели, равновесные условия гидратообразования, моделирование технологических режимов, определение места потенциального начала образования гидратов, моделирование теплоизоляции НКТ, применение внутреннего покрытия и электрообогрева НКТ, расчёт потребного количества метанола

Для цитирования: Компьютерное моделирование технологических параметров и методов предотвращения образования гидратов / О.В. Савенок, Н.Х. Жарикова, А.Е. Верисокин, А.С. Арутюнян, Х. Махмуд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 202–218. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4366

UDC 622.279.72

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4366

Computer simulation of technological parameters and methods for preventing hydrate formation

O.V. Savenok¹✉, N.Kh. Zharikova¹, A.E. Verisokin², A.S. Arutyunyan³, M. Hadid⁴

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation

³ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

⁴ Al-Baath University, Damascus, Syrian Arab Republic

✉ Savenok_OV@pers.spmi.ru

Abstract. Relevance. Like many deposits of Western and Central Siberia, the Sakhalin Island deposits (the considered Vostochno-Lugovskoe gas field) faced the problem of gas hydrate formation in wellbores, well plumes and equipment integrated into the technological chain. Hydrate formations clog wells, pipelines and gas pipelines, reducing their working cross-section area. This leads to decrease in flow rate or a complete stop of equipment operation. The operation of valves, measuring instruments, separators and fittings is also disrupted. All this leads to significant economic losses and reduces the efficiency of the field development and operation. The fields that are at the late stages of operation are subject to the greatest influence due to the impossibility of ensuring a hydrate-free operation of wells. From the point of view of the development rationality, it is more profitable to prevent the formation of hydrates than to deal with already formed deposits. It is also worth noting the expediency of transferring the location of hydrate deposition from the well to the surface, where it is much easier and more cost-effective to deal with this complication than in the well. This can be achieved by influencing the parameters of the deposit formation, from which it is impossible to influence the gas composition. Shifting the equilibrium conditions for the formation of hydrates by increasing salinity is also inefficient, since the risk of salt deposition and corrosion increases. Thus, it remains possible to regulate thermobaric parameters by changing a well technological mode of operation, thermal insulation or coating the inside of the tubing with materials, as well as downhole electric heaters, which exclude the possibility of deposit formation. **Aim.** To substantiate the technology for increasing the efficiency of production wells in the conditions of hydrate formation. **Objects.** Gas wells operating in the conditions of hydrate formation, as well as the relationship and dependence of the operating parameters of the well and other technological parameters on the potential for the formation of hydrates. **Methods.** Analysis of the geological and physical conditions and the state of development of the Vostochno-Lugovskoe gas field; computer and mathematical modeling of well operation in the field under conditions of hydrate formation; analysis of ways to prevent the formation of hydrates and the choice of technological solutions. **Results.** The problem of hydrate formation is widespread in gas fields. Hydrates can partially or completely block the working section of production wells, reducing or completely stopping production. As a result production wells are idle for an average of 18 hours per month. This entails economic losses and interferes with the stable operation of the well. It is shown that due to the specifics of the operation of wells of the Vostochno-Lugovskoe gas field, changing the technological regime to hydrate-free at the moment is impossible. According to the results of well operation simulation, the main temperature losses occur due to heat removal through the tubing. Among the ways to prevent the formation of hydrates, thermal insulation of tubing, partial silicate-enamel coating, the use of a heating cable and methanol are considered. Based on the results of the evaluation of economic and technological efficiency, a heating cable technology was selected with the installation of a turbo-expander to compensate the cost of electricity, as well as the descent of the second row of tubing to the depth of the potential place of hydrate formation in order to increase the heating efficiency and injection coolant or inhibitor directly into the hydrate formation interval.

Keywords: model building and model input parameters, equilibrium conditions of hydrate formation, modeling of technological regimes, determining the location of the potential start of hydrate formation, modeling of tubing thermal insulation, application of tubing internal coating and electrical heating, calculation of the required amount of methanol

For citation: Savenok O.V., Zharikova N.Kh., Verisokin A.E., Arutyunyan A.S., Hadid M. Computer simulation of technological parameters and methods for preventing hydrate formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 202–218. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4366

Введение

Для обеспечения растущего спроса Сахалинской области на газ в 2021 г. было выведено из консервации Восточно-Луговское газовое месторождение,

которое столкнулось с проблемой образования газовых гидратов в стволах и шлейфах скважин, а также оборудовании, интегрированном в технологическую цепочку.

Гидратообразования закупоривают скважины, шлейфы и газопроводы, снижая площадь их рабочего сечения, что ведёт к снижению дебита или полной остановке работы оборудования, также нарушается работа клапанов, измерительных приборов, сепараторов и штуцеров. Всё это приводит к значительным экономическим потерям и снижению эффективности ведения процесса разработки и эксплуатации месторождения.

Наибольшему влиянию подвержены месторождения, находящиеся на поздних стадиях эксплуатации ввиду невозможности обеспечения безгидратного режима работы скважин.

На сегодняшний день существует достаточно широкий спектр методов борьбы с данным осложнением, но наиболее популярным остаётся использование метанола в качестве ингибитора гидратообразования. Однако метанол – очень токсичное вещество, вызывающее загрязнение окружающей среды и тяжёлое токсикологическое отравление, как при попадании внутрь, так и при вдыхании паров. Помимо этого, для его применения на месторождении необходимо выполнить достаточно обширный ряд условий с целью обеспечения требуемых норм по безопасности. Также при наличии высокоминерализованной воды в скважинной продукции будет происходить снижение его эффективности, и будут образовываться соли.

Несмотря на все преимущества метанола, одним из перспективных направлений является развитие безингибиторных методов борьбы с образованием гидратов в стволах скважин.

С точки зрения рациональности и ведения процесса разработки оптимальным является предотвращение образования гидратов, нежели борьба с уже образовавшимися отложениями. Стоит также отметить целесообразность переноса места локализации отложения гидратов из скважины на поверхность, где бороться с данным осложнением гораздо проще и экономически эффективнее, чем в скважине. Этого можно добиться, влияя на параметры процесса образования гидратов, причём на состав газа влиять невозможно, смещение равновесных условий образования гидратов за счёт повышения минерализации также неэффективно, поскольку возрастает риск отложения солей и коррозии. Единственным возможным направлением остаётся регулирование термобарических параметров путём изменения технологического режима работы скважины, теплоизоляции или покрытия материалами внутренней части насосно-компрессорных труб, а также скважинными электронагревателями, исключающими возможность образования отложения.

Учитывая, что весь добываемый газ поставляется напрямую потребителю, это исключает возмож-

ность менять технологический режим в широких пределах.

Целью работы является обоснование повышения эффективности эксплуатации добывающих скважин в условиях гидратообразования путём моделирования их работы.

Общие сведения о месторождении

Восточно-Луговское газовое месторождение, находящееся в южной части острова Сахалин и непосредственной близости к Охотскому морю, по величине остаточных запасов – 409 млн м³ – является мелким.

Продуктивные пласты месторождения антиклинального строения осложнены сильной расчленённостью, часть пластов является водоплавающими.

На сегодняшний день месторождение введено в разработку после консервации с 2011 г. Основным эксплуатационным объектом, содержащим 58 % от запасов месторождения, является VII объект, объединяющий 5 газоносных пластов, которые вскрыты скважиной № 12.

Газ по своим свойствам относится к классу сухих газов, по содержанию азота и углекислого газа ранжируется от минимальной категории до средней. Также газ является низкогелевым. Сероводород отсутствует.

Эксплуатационный фонд составляет 4 добывающие скважины. Режим разработки упруговодонапорный. Коэффициент эксплуатации скважин 0,155–0,638.

Компания АО «Сахалинская нефтяная компания», имеющая целью газификацию Сахалинской области, занимается эксплуатацией газотранспортных систем, а также добычей природного газа. Весь добываемый газ поступает на нужды региона, что объясняет динамику дебитов на скважине по сезонам. Для обеспечения растущего спроса на газ компанией в 2021 году выведено из консервации Восточно-Луговское газовое месторождение.

Основной проблемой при эксплуатации скважин является гидратообразование в стволе скважин, шлейфах и блоке подготовки газа, в среднем скважина простаивает 18 часов в месяц из-за образования отложений [1–4]. Борьба с осложнением велась путём продувок, что, безусловно, является малоэффективным и технологически неоправданным.

Построение модели

Важнейшей прикладной задачей в нефтегазовой отрасли является моделирование работы скважин и систем промыслового сбора и подготовки флюида с целью обеспечения технологической и экономической эффективности процесса, а также его безопасности [5–7].

Программное обеспечение PIPESIM обладает передовыми возможностями моделирования за счёт реализации современных научных подходов к процессам движения многофазных потоков, теплопередачи, конструкционных исполнений и работы оборудования. Также существующее дополнение к программному продукту Multiflash позволяет быстро производить узловой анализ поведения флюида, в том числе в условиях образования гидратов, и точно рассчитывать необходимые термодинамические и химико-физические параметры (переменные и константы), играющие большую роль в дальнейшем моделировании [8–10].

Наличие сетевого моделирования позволяет построить точную цифровую копию месторождения, коррелирующуюся с привязкой к картам объекта. В качестве объекта исследования выбраны добывающие скважины №№ 12, 20 и 22, относящиеся к VII, XII и XIII пластам. Скважина № 21 в расчёт не бралась, исходя из схожести условий со скважиной № 22.

В связи с небольшим размером месторождения и фондом скважин выделять конкретную не имеет смысла. Учитывая, что скважины относятся к разным пластам и имеют разную глубину, будут различны и равновесные кривые гидратообразования, распределения давления и температуры по стволу.

По результатам проведённых на Восточно-Луговском месторождении геофизических исследований скважины находятся в хорошем техническом состоянии [11–14].

Моделирование выполнено для трёх скважин месторождения ввиду однотипности действий, пример задания основных параметров в модели представлен по скважине № 12.

Входные параметры модели

Конструкция скважины № 12 задана в соответствии с технологической схемой разработки месторождения. Модель скважины представлена на рис. 1. Зелёным цветом указан путь движения флюида, отметки в футах соответствуют значениям спуска обсадных колонн, НКТ и пакера.

Определение компонентного состава флюида производится с помощью вкладки **Fluid Manager**, где выбираются необходимые компоненты и корреляции, после чего происходит привязка к скважине и определение компонентного состава с привязкой к термобарическим условиям (рис. 2, 3). Также после задания состава газа автоматически рассчитываются равновесные условия гидратообразования, плотность, вязкость и т. д. [15–17].

Теплопередача через НКТ, а также температуры почвы на уровне устья заданы из ГОСТ и данных технологической схемы разработки (рис. 4).

Профиль скважины задан в соответствии с конструкцией скважины (рис. 5).

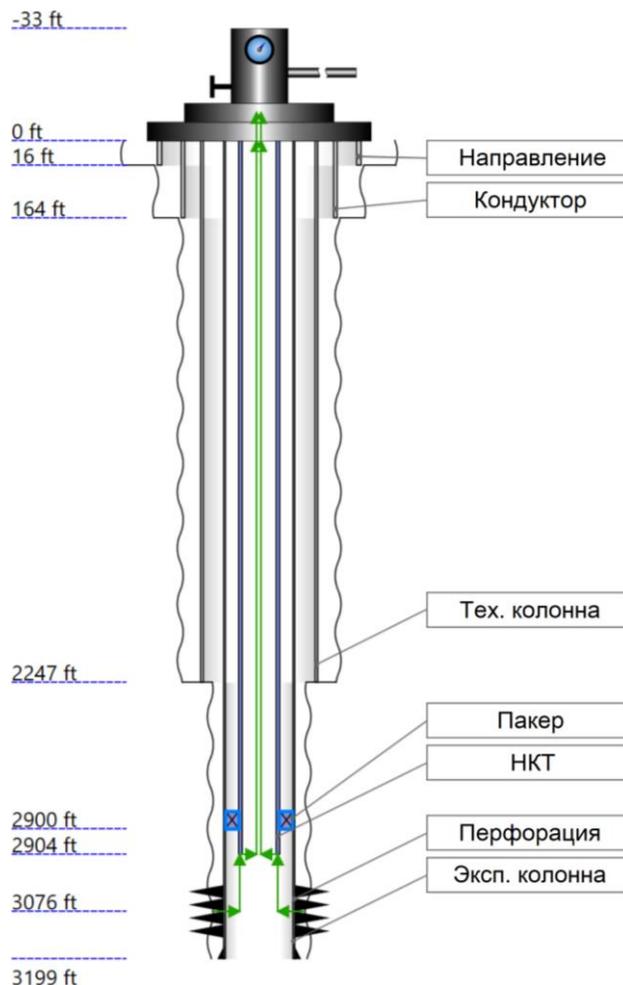


Рис. 1. Конструкция скважины № 12

Fig. 1. Design of well no. 12

Далее задаётся значение середины интервала перфорации, значение количества отверстий на метр и общий интервал перфорации. Помимо этого, в данном разделе происходит привязка флюида, задаются термобарические условия пласта и данные о выносе песка (рис. 6) [18–20].

Построение P/T профиля в PIPESIM

После задания всех необходимых параметров, описанных выше, а также задания пластовых условий можно выполнить ряд симуляций, например: P/T анализ, узловой анализ, анализ механизированной или газлифтной добычи и т. д. Для вычисления интервала гидратообразования необходимо определить пересечение кривой образования гидратов с P/T профилем [21–23]. Этапы моделирования приведены на рис. 7, 8.

PIPESIM предоставляет возможность расчёта ряда зависимостей и параметров, таких как температура, давление, глубина скважины, риск коррозии, скорость потока, расход флюида (массовый/объёмный), вязкость и др.

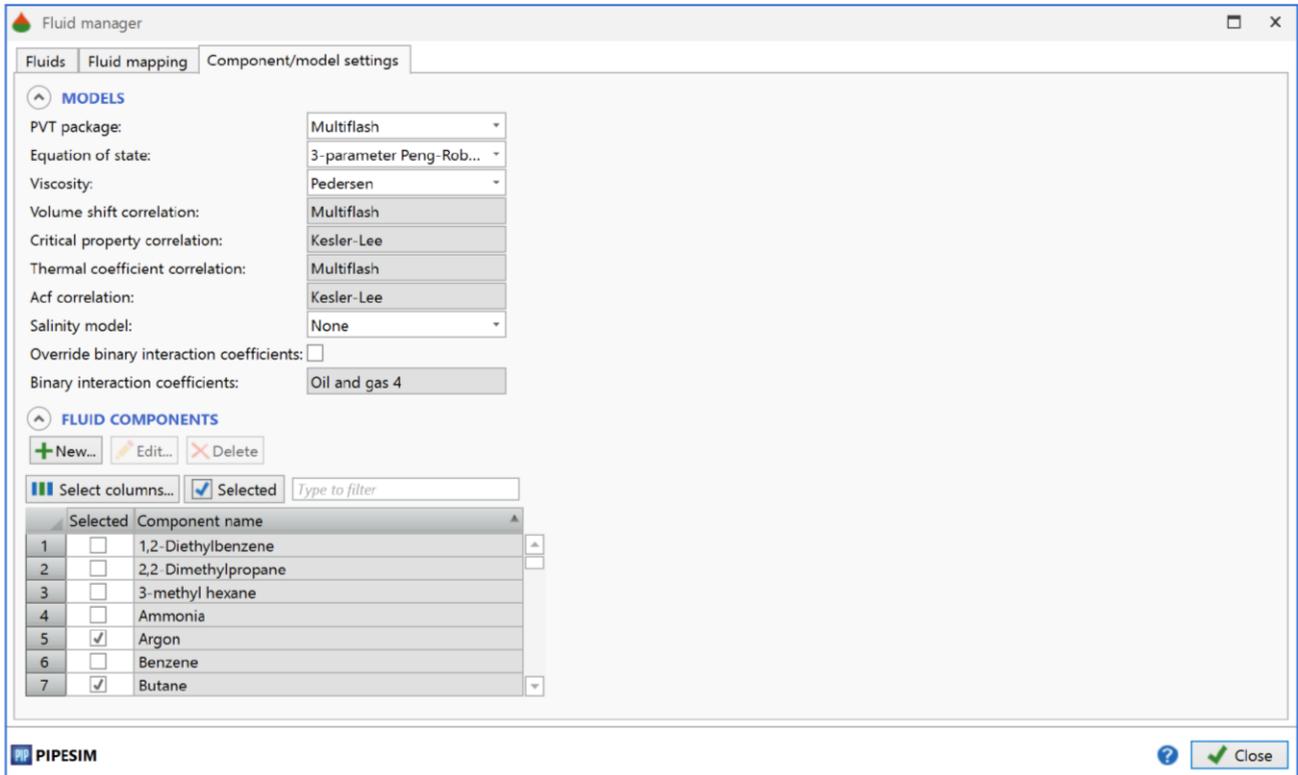


Рис. 2. Формирование компонентного состава газа
 Fig. 2. Formation of gas composition

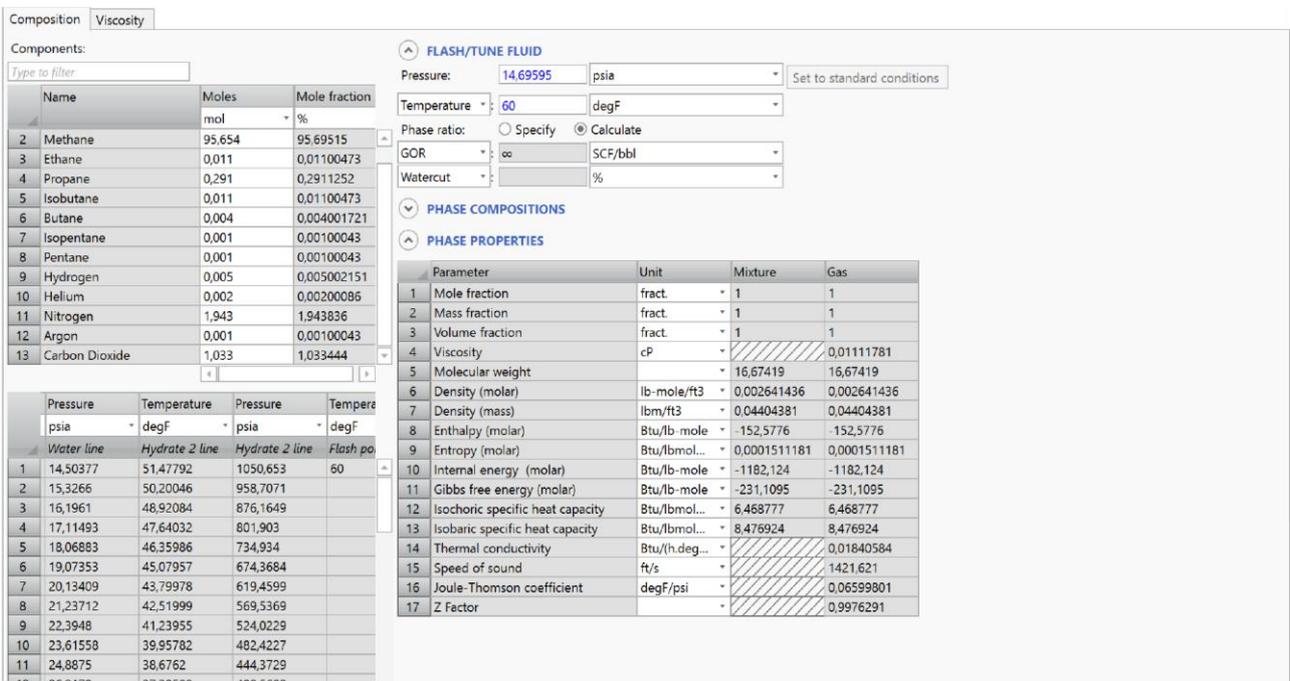


Рис. 3. Задание компонентного состава газа
 Fig. 3. Setting gas composition

General Tubulars Deviation survey Downhole equipment Artificial lift Heat transfer Completions Surface equipment

U Value input: Single Multiple

Heat transfer coefficient: Btu/(h.degF.ft2)

Ambient temperature input: Single Multiple

Soil temperature at wellhead: degF

Рис. 4. Теплопередача насосно-компрессорных труб
Fig. 4. Heat transfer of tubing

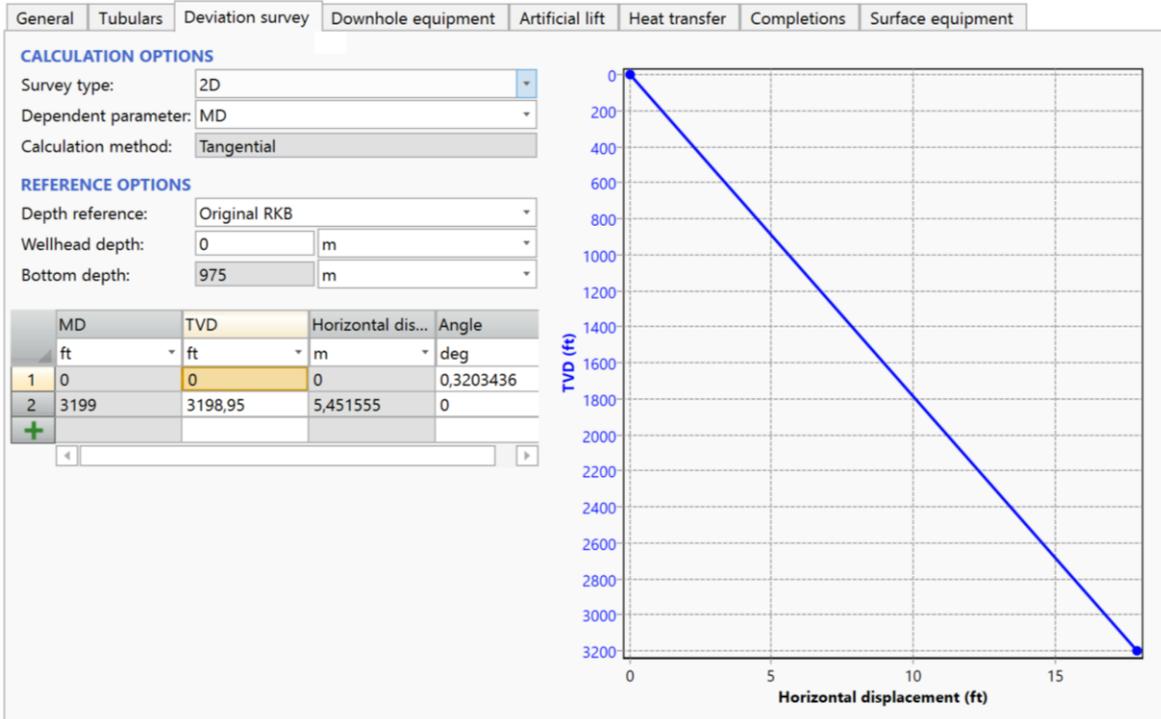


Рис. 5. Профиль скважины
Fig. 5. Well profile

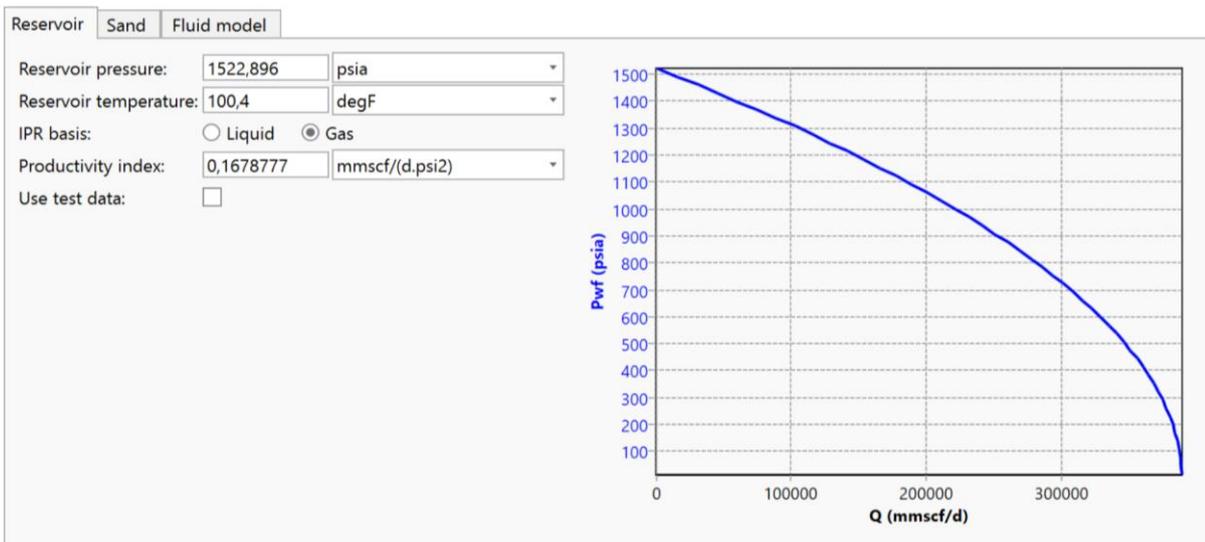


Рис. 6. Задание термобарических параметров скважины и коэффициента продуктивности
Fig. 6. Setting the thermobaric parameters of the well and the productivity factor

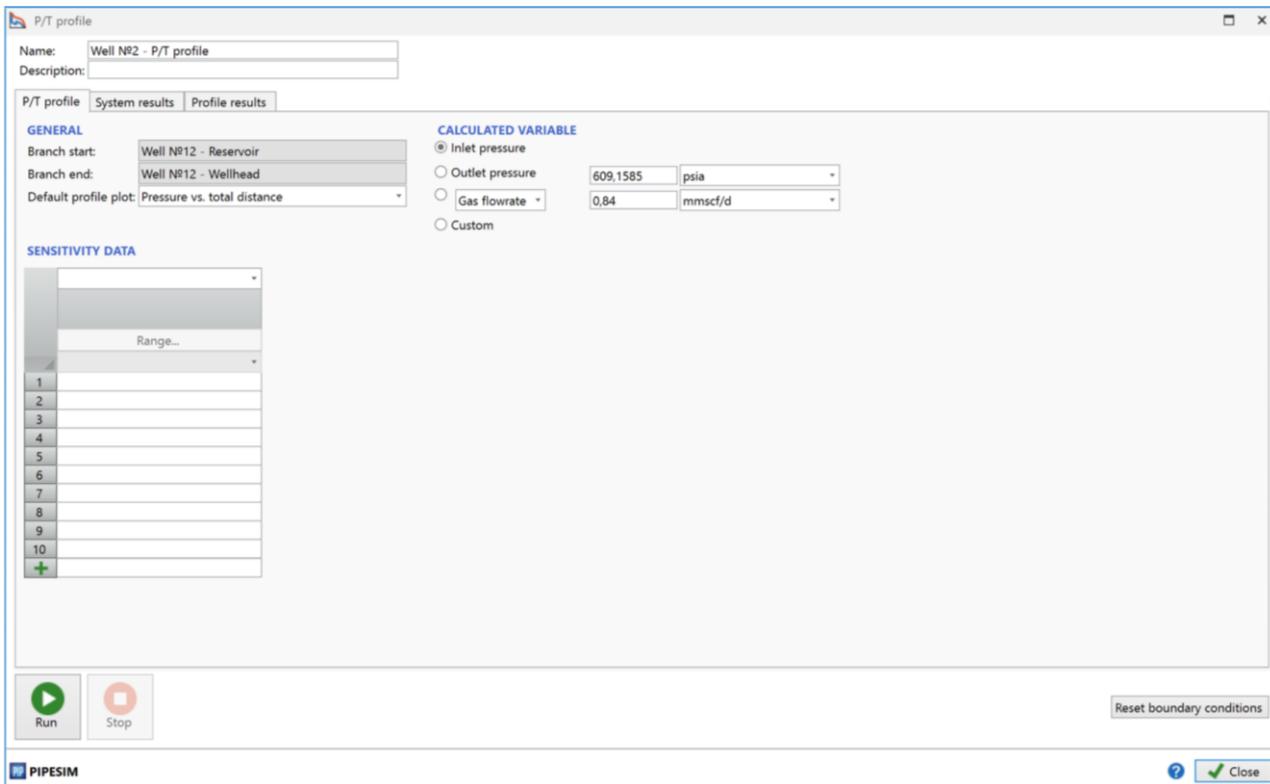


Рис. 7. Задание входных параметров
Fig. 7. Setting the input parameters

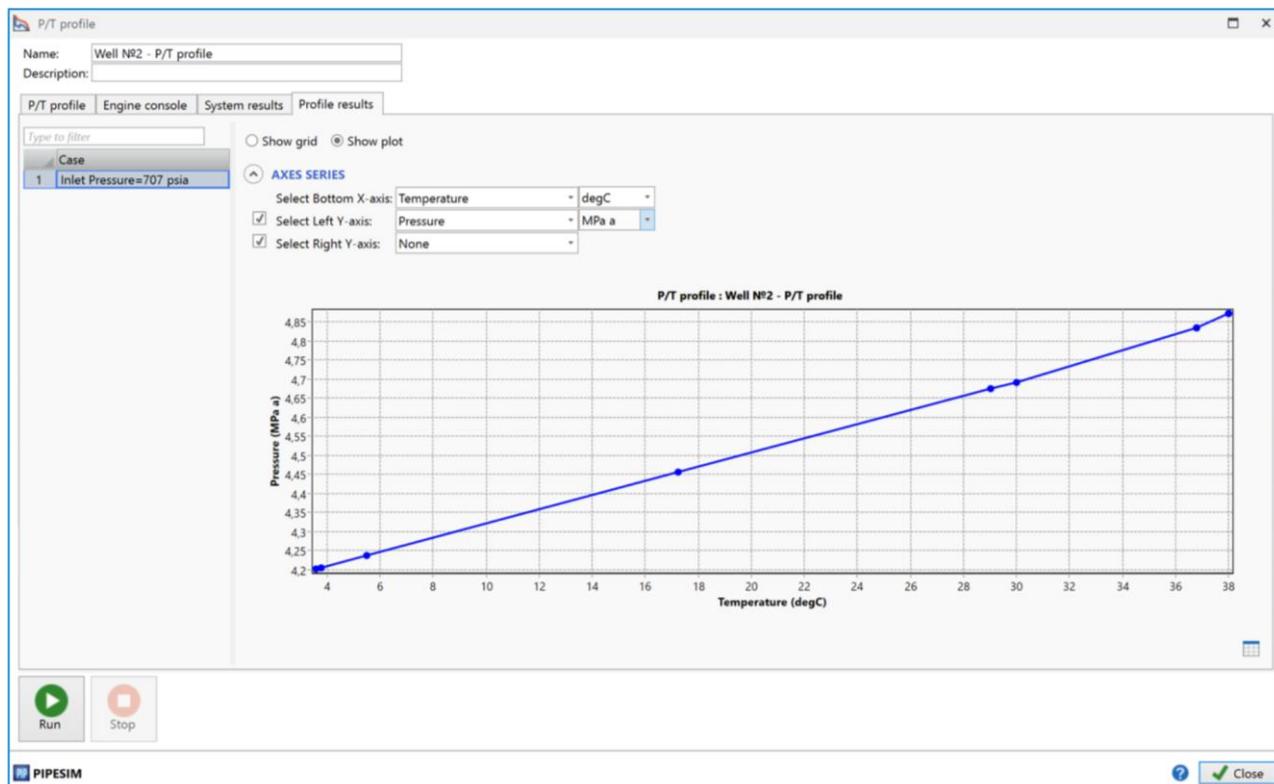


Рис. 8. Результаты P/T моделирования
Fig. 8. Results of P/T modeling

Также существует возможность моделирования искомых параметров для различных конструктивных параметров (диаметр НКТ) или технологических режимов (дебит, забойное или устьевое давления). Для выполнения моделирования помимо уже заданных параметров требуется задать два из трёх компонентов:

- 1) дебит скважины;
- 2) забойное давление;
- 3) устьевое давление.

Для построения существующей модели нами заданы дебит и устьевое давление в соответствии с рапортом скважины. Получившееся забойное давление (рис. 8) соответствует действительному значению по технологической схеме разработки.

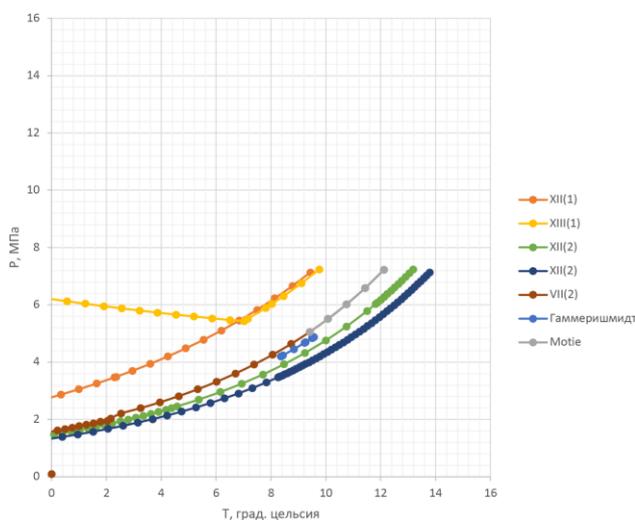


Рис. 9. Равновесные кривые гидратообразования для пластов XII, VII и XIII

Fig. 9. Equilibrium curves of hydrate formation for layers XII, VII and XIII

Равновесные условия гидратообразования

Кривые равновесных условий образования гидратов построены с использованием ПО PIPESIM [24–26]. При этом в пластах XII и XIII из-за состава газа могут образовываться гидраты как I, так и II структур. Равновесные кривые гидратообразования для пластов XII, VII и XIII приведены на рис. 9 (цифры в скобках указывают на тип образующихся гидратов, римскими цифрами указаны номера пластов).

Из рис. 9 видно, что присутствуют два участка кривых гидратов, построенных по зависимостям **Motie** и **Makagon**. Первая зависимость даёт минимальное отклонение, и для упрощения расчётов (в случаях с не сернистым газом) можно пользоваться ей. Вторая зависимость является более старой и простой корреляцией. Кривые показывают термобарические условия, при которых гидрат находится

в равновесном состоянии [27–29]. Область, которая находится левее, – там гидрат не будет образовываться, область правее – гидраты могут существовать в стабильном состоянии.

Моделирование технологических режимов

Одним из способов смещения точки начала образования гидратов является подбор оптимального дебита скважины, при котором гидраты не будут образовываться в стволе скважины. Рост устьевой температуры происходит за счёт уменьшения теплообмена, но стоит отметить процесс дросселирования, который приводит к обратному эффекту. Зависимость температуры и давления по стволу скважины при различных дебитах приведена на рис. 10 (значение подписей – дебит скважины в тыс. м³/сут.).

Изменение технологического режима не приводит к выводу скважин XII и XIII пластов из зоны образования гидратов. Однако для пласта VII установление значения дебита скважины выше 84,8 тыс. м³/сут. приведёт к установлению безгидратного режима.

Нами проведено моделирование влияния различного диаметра НКТ на вывод скважины из зоны стабильного существования гидратов (рис. 11).

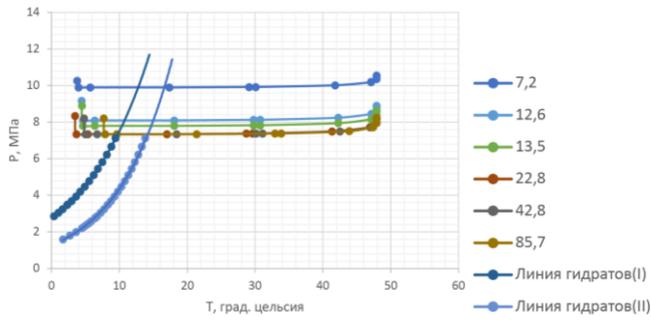
Из графиков видно, что замена НКТ может оказать небольшое положительное воздействие при замене их на трубы диаметром 60 мм, но проблему образования гидратов это не решает. Для скважин других пластов подобное заключить нельзя, определённую тенденцию выявить сложно, ввиду чего графики для этих пластов не приведены.

Определение места начала потенциального образования гидратов

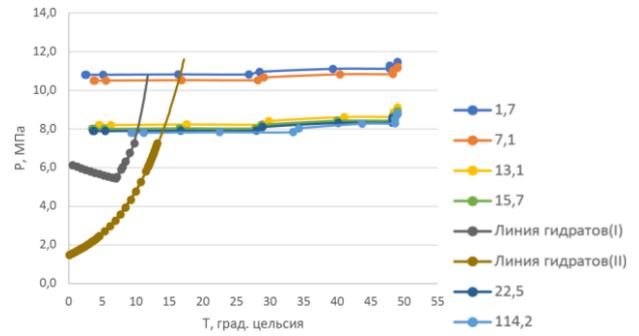
Место потенциального начала выпадения гидратов можно определить как точку пересечения кривой равновесных условий гидратообразования и распределения термобарических условий по стволу скважины. Данные зависимости представлены рис. 10–12.

Определение точной глубины проводилось графоаналитическим методом, также определены требуемые значения повышения устьевой температуры для выноса точки гидратообразования из скважины. Результаты приведены в табл. 1.

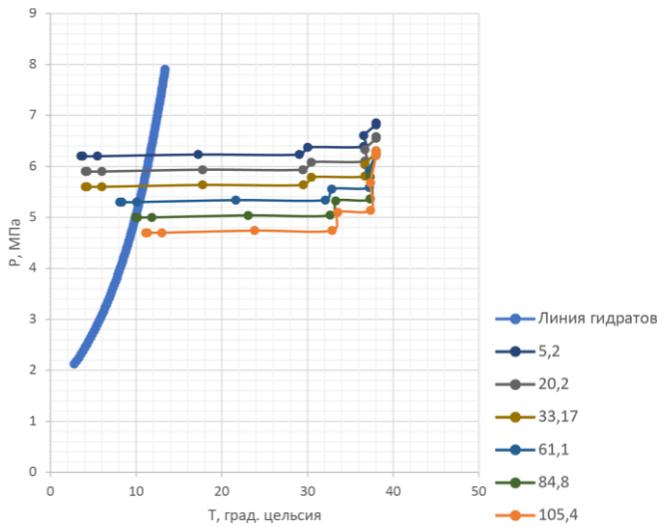
По рассматриваемому месторождению максимальная глубина начала потенциального образования гидратов скважины № 12 составляет 211 м, минимальная глубина – 5 м. Для технологического режима, на котором эксплуатируются скважины, значения составляют соответственно 187,47 м (скважина № 12), 91,37 м (скважина № 20) и 106,03 м (скважина № 22). Небольшие значения глубин позволяют рассматривать больший спектр методов борьбы с гидратообразованием.



(пласт XII)



(пласт XIII)



(пласт VII)

Рис. 10. P/T зависимость при различных режимах
 Fig. 10. P/T dependence in various modes

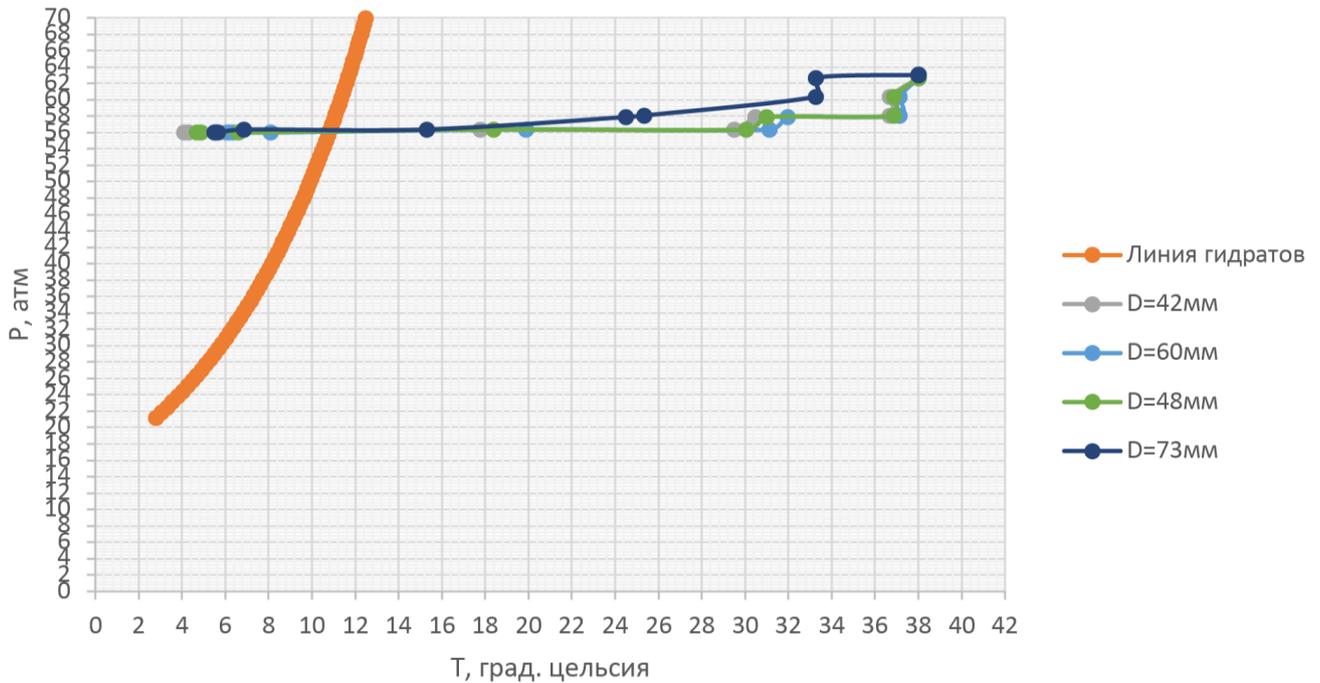


Рис. 11. P/T зависимость при различных диаметрах насосно-компрессорных труб для скважины VII пласта
 Fig. 11. P/T dependence for different tubing diameters for well VII of the layer

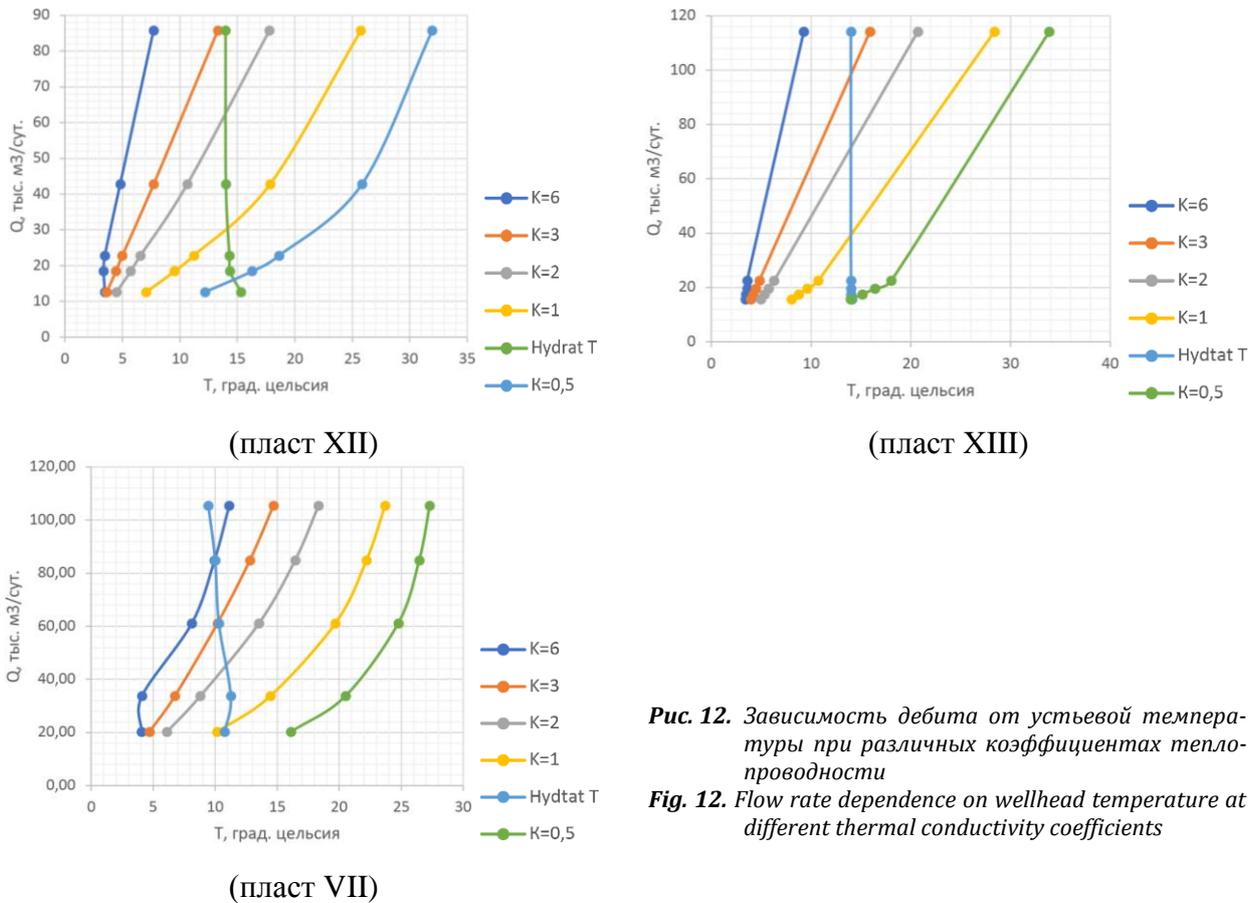


Рис. 12. Зависимость дебита от устьевой температуры при различных коэффициентах теплопроводности
Fig. 12. Flow rate dependence on wellhead temperature at different thermal conductivity coefficients

Таблица 1. Глубина образования гидратов и требуемое повышение устьевой температуры
Table 1. Depth of hydrate formation and required wellhead temperature rise

Q , тыс. м ³ /сут. Q , thousand m ³ /day	ΔT , °C Temperature change, °C	H , м Depth, m
Пласт VII, скважина № 12 Layer VII, well no. 12		
5,3	8,03	211,41
20,2	7,16	187,47
33,7	6,71	176,65
61,1	2,18	66,28
84,9	0,05	5,21
Пласт XII, скважина № 20 Layer XII, well no. 20		
7,2	13,14	107,21
12,6	11,85	91,37
13,5	10,44	80,61
22,8	10,83	92,56
42,8	9,21	68,52
85,7	6,28	44,48
Пласт XIII, скважина № 22 Layer XIII, well no. 22		
1,7	14,08	114,11
7,1	12,72	106,03
12,6	11,87	98,49
13,1	9,86	82,84
15,7	10,65	88,63
22,5	10,43	86,79
114,2	4,72	43,61

Моделирование теплоизоляции НКТ

Теплоизоляция колонны направлена на снижение коэффициента теплопроводности насосно-компрессорных труб [30–32]. В программном комплексе PIPESIM нет возможности задать материал изоляции, но есть возможность изменить значение удельной теплопроводящей способности уже существующей НКТ.

Расчёт выполнен при значении коэффициента, равном 6 BTU/(hft²·°F), что соответствует теплопроводности стали по ГОСТ, а также при значениях 3, 2, 1 и 0,5. Последнее значение соответствует изоляции с коэффициентом теплопроводности 0,87 Вт/м·°К (для сравнения – значение того же коэффициента для полимерного покрытия составляет порядка 0,04 Вт/м·°К). Результаты приведены на рис. 12.

Кривые Hydrat T показывают зависимость необходимого увеличения температуры устья от дебита скважины для вывода её из гидратной зоны. Соответственно справа от этой кривой находится зона, где выполняются условия безгидратного режима [33–35].

Из графиков (рис. 12) видно, что применение теплоизоляции НКТ является эффективным решением даже при больших значениях коэффициента теплопроводности, что связано с превалирующим влиянием потерь температуры газа за счёт теплообмена. Это подтверждает незначительный перепад давления между устьевым и забойным давлениями. На примере скважины № 12 при существующем технологическом режиме эта величина составляет 0,7 МПа. Оценка удельного снижения температуры (°С/атм.) производится по коэффициенту Джоуля–

Томпсона (JT Coefficient), для расчёта которого использовалось программное обеспечение Multiflash. Результаты расчёта коэффициента приведены на рис. 13.

Общее снижение температуры за счёт снижения давления по стволу НКТ получилось равным 3,9 °С.

Применение внутреннего покрытия и электрообогрева НКТ

Существует множество материалов для внутреннего покрытия НКТ, но наиболее широкое применение получило силикатно-эмалевое. Преимуществами данного покрытия являются:

- 1) высокая степень адгезии к металлу;
- 2) широкий температурный диапазон использования;
- 3) большой срок службы;
- 4) отсутствие шероховатости.

С точки зрения процесса гидратообразования отсутствие шероховатости позволит исключить возможность образования центров кристаллизации, что в свою очередь позволит переместить процесс борьбы с осложнением на поверхность. Поскольку потенциально процесс гидратообразования может начаться вблизи устья скважины, целесообразно заменить только соответствующую часть насосно-компрессорных труб, но даже в этом случае технология требует достаточно больших капитальных вложений.

Существуют несколько основных способов нагрева скважинной продукции:

- 1) индукционный нагреватель;
- 2) греющий кабель;
- 3) ТЭН-нагреватель.

Phase Properties		
	OVERALL	GAS
Thermal Conductivity (W/m/K)		0,03073558448
Cp (J/mol/K)	36,05763887	35,68617793
Cv (J/mol/K)	27,23905426	26,79174868
Compressibility (1/atm)	0,1809147034	0,1809216914
Expansivity (1/°C)	0,003779723406	0,003779863303
JT Coefficient (°C/atm)	0,5349941852	0,5456343642
Sound Speed (m/s)	420,4995832	423,7474288
Inter. Tension (N/m)		

Рис. 13. Результаты расчёта коэффициента Джоуля–Томсона
 Fig. 13. Results of calculation of the Joule–Thomson coefficient

Индукционные нагреватели хоть и обладают более высоким КПД и меньшими энергозатратами, но технология предусматривает спуск устройства на забой скважины, что будет неэффективно ввиду больших теплопотерь. Также стоит отметить, что значения коэффициента полезного действия, приведённые на сайтах изготовителей и статьях, представлены для движения вязкой нефти, а не газа.

Греющие кабельные линии обладают меньшим КПД за счёт большего рассеивания полезной энергии и большими энергозатратами, однако для прогрева небольшого участка в данных условиях могут оказаться более эффективными.

ТЭН-нагреватели не рассматривались ввиду больших энергозатрат и низкого КПД.

По данным, приведённым в табл. 1, рассчитана необходимая мощность для нагрева флюида, длина кабеля соответствует глубине потенциального места начала образования гидратов (табл. 2).

Таблица 2. Потребная мощность кабельной линии

Table 2. Required power of the cable line

Дебит скважины Q , тыс. м ³ /сут. Well flow rate Q , thousand m ³ /day	Мощность греющего кабеля P , кВт Heating cable power P , kWatt	Длина кабельной линии L , м Cable line length L , m	Удельная мощность линии, Вт/м Line specific power, Watt/m
Пласт VII, скважина № 12 Layer VII, well no. 12			
5,3	3,42	211,413	0,674
20,2	11,73	187,468	2,608
33,7	18,33	176,653	4,323
61,1	10,78	66,284	6,778
84,9	0,34	5,301	2,843
Пласт XII, скважина № 20 Layer XII, well no. 20			
7,2	5,62	107,214	2,184
12,6	8,18	91,365	3,732
13,5	10,62	80,604	5,491
22,8	13,48	92,563	6,067
42,8	21,47	68,519	13,053
85,7	29,28	44,476	27,433
Пласт XIII, скважина № 22 Layer XIII, well no. 22			
1,7	2,07	114,104	0,756
7,1	5,61	106,028	2,204
12,6	10,25	98,488	4,337
13,1	10,08	82,844	5,068
15,7	12,18	88,633	5,725
22,5	13,06	86,789	6,268
114,2	31,43	43,604	30,035

Графическая зависимость потребной мощности для требуемого поднятия температуры на устье при разных дебитах представлена на рис. 14. Для оптимизации затрат электроэнергии на практике используют установки турбодетандеров. Данная технология была успешно применена на малодебитном месторождении Ракитное.

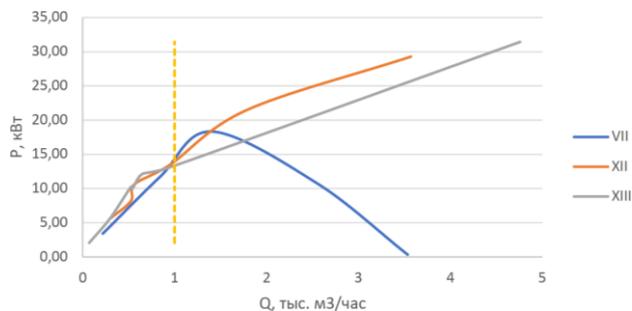


Рис. 14. Зависимость мощности греющего кабеля от дебита скважины

Fig. 14. Dependence of the heating cable power on the well flow rate

Очевидно, что на необходимую мощность греющей линии оказывает влияние дебит газа и требуемое повышение температуры. Перегиб для скважины № 12 (пласт VII) можно объяснить за счёт меньших значений ΔT . Также при существующем технологическом режиме эксплуатации скважин (1 тыс. м³/ч) суммарная мощность для всех четырёх скважин составляет 55,26 кВт, установка турбодетандера будет выбираться из значения данной величины.

Расчёт потребного количества метанола

Расчёт потребного количества метанола производился по методике Газпром ВНИИГАЗ, полученные результаты сведены в табл. 3.

Рассчитывается разница влагосодержания в пластовых и устьевых условиях, по номограммам определяется отношение содержания метанола в газе, необходимого для насыщения газа, к концентрации метанола в жидкости A . Далее по графическим зависимостям определяется требуемая концентрация метанола C по требуемому снижению температуры. В табл. 3 приведены значения при различных дебитах, соответствующие значениям из табл. 2.

Выводы и рекомендации

Анализируя результаты выполненного моделирования и расчётов, можно сделать выводы, что наиболее эффективными методами предотвращения образования гидратов за счёт переноса точки потенциального образования отложений из скважины являются следующие:

- 1) теплоизоляция насосно-компрессорных труб;
- 2) силикатно-эмалевое покрытие части насосно-компрессорных труб;
- 3) использование греющего кабеля с установкой турбодетандера.

Для условий рассматриваемого Восточно-Луговского газового месторождения для предотвращения образования гидратов в стволе скважины рекомендуется использовать греющий кабель с установкой турбодетандера и компрессора на выходе из установки комплексной подготовки газа.

Таблица 3. Расчёт требуемого количества метанола

Table 3. Calculation of the required amount of methanol

Пласт XII, скважина № 20 Layer XII, well no. 20						
Забойное давление $P_{заб}$, МПа Bottomhole pressure, МПа	10,80	8,70	8,20	8,00	7,88	7,80
Устьевая температура $T_{уст}$, °С Wellhead temperature, °С	3,76	4,44	4,46	3,47	4,80	7,69
Требуемая концентрация метанола C , % Required methanol concentration, %	26,0	22,0	20,0	20,0	20,0	12,0
Изменение влагосодержания в пластовых и устьевых условиях ΔW , кг/1000 м ³ Change in moisture content in reservoir and wellhead conditions, kg/1000 m ³	1,03	1,16	1,20	1,23	1,24	1,18
Отношение содержания метанола в газе к концентрации метанола в жидкости A Ratio of methanol content in gas to methanol concentration in liquid	12,0	13,0	14,0	13,0	14,0	18,0
Потребное количество метанола Q , кг/сут. Required amount of methanol, kg/day	4,81	8,03	8,08	14,31	24,33	45,60
Пласт VII, скважина № 12 Layer VII, well no. 12						
Забойное давление $P_{заб}$, МПа Bottomhole pressure, МПа	6,50	5,90	5,60	5,30	0	0
Устьевая температура $T_{уст}$, °С Wellhead temperature, °С	3,60	4,07	4,10	8,12	0	0
Требуемая концентрация метанола C , % Required methanol concentration, %	19,0	18,0	17,0	7,0	0	0
Изменение влагосодержания в пластовых и устьевых условиях ΔW , кг/1000 м ³ Change in moisture content in reservoir and wellhead conditions, kg/1000 m ³	0,81	0,86	0,89	0,83	0	0
Отношение содержания метанола в газе к концентрации метанола в жидкости A Ratio of methanol content in gas to methanol concentration in liquid	14,0	15,0	12,5	23,0	0	0
Потребное количество метанола Q , кг/сут. Required amount of methanol, kg/day	2,47	15,86	8,20	13,88	0	0
Пласт XIII, скважина № 22 Layer XIII, well no. 22						
Забойное давление $P_{заб}$, МПа Bottomhole pressure, МПа	10,80	10,50	8,70	8,20	8,00	7,88
Устьевая температура $T_{уст}$, °С Wellhead temperature, °С	2,42	3,68	4,33	4,44	3,45	3,59
Требуемая концентрация метанола C , % Required methanol concentration, %	26,0	23,0	22,0	20,0	20,0	20,0
Изменение влагосодержания в пластовых и устьевых условиях ΔW , кг/1000 м ³ Change in moisture content in reservoir and wellhead conditions, kg/1000 m ³	1,03	1,04	1,16	1,20	1,23	1,24
Отношение содержания метанола в газе к концентрации метанола в жидкости A Ratio of methanol content in gas to methanol concentration in liquid	11,0	12,0	12,5	13,0	12,5	12,5
Потребное количество метанола Q , кг/сут. Required amount of methanol, kg/day	1,15	4,32	7,87	7,60	9,06	13,04

Данная схема имеет широкое распространение. В России имеется несколько заводов-изготовителей детандерного оборудования с параметрами, обеспечивающими необходимую мощность при существующем расходе газа, входных давлениях и температуре. Установка компрессора уже предусмотрена в проектно-технологическом документе «Дополнение к технологической схеме разработки» для транспортировки продукции на газораспределительную станцию.

Кабельная линия планируется постоянной мощностью, для равномерного прогрева всего участка насосно-компрессорных труб, с фотополимерной

изоляция, для обеспечения требуемого уровня безопасности.

Также необходимо рассмотреть вариант спуска двухрядной колонны до потенциальной глубины гидратообразования для повышения эффективности кабельной линии за счёт уменьшения рассеивания полезной энергии. Коэффициент сопротивления теплопередачи при этом увеличится на 20 %.

Стоит отметить возможность заполнения межтрубного пространства теплоносителем для повышения эффективности обогрева участка, что позволит проводить в аварийных случаях закачку ингибиторов гидратообразования или промывку горячим теплоносителем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргунова К.К., Бондарев Э.А., Рожин И.И. Определение интервала гидратообразования в скважинах, пробуренных в многолетнемерзлых породах // Наука и образование. – 2008. – № 1. – С. 13–19.

2. Грунвальд А.В. Использование метанола в газовой промышленности в качестве ингибитора гидратообразования и прогноз его потребления в период до 2030 года // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2007. – № 2. – С. 1–25. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Grunvald/Grunvald_1.pdf (дата обращения 15.05.2023).
3. Джиоева А.К., Бригида В.С. Пространственная нелинейность динамики метановыделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 245. – С. 522–530. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.3>
4. Ильинова А.А., Ромашева Н.В., Стройков Г.А. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 244. – С. 493–502. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.12>
5. Жарикова Н.Х., Горпинченко А.Н., Садыкова И.Р. Анализ эффективности методов борьбы с гидратами на Уренгойском нефтегазоконденсатном месторождении // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. – 2022. – № 3. – С. 81–97.
6. Запорожец Е.П., Шостак Н.А. Расчёт эффективности одно- и многокомпонентных антигидратных реагентов // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 238. – С. 423–429. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.4.423>
7. Направления современных исследований газовых гидратов / В.А. Истомин, В.С. Якушев, В.Г. Квон, С.И. Долгаев, Е.М. Чувилин // *Газохимия*. – 2009. – № 5. – С. 56–63.
8. Истомин В.А. Федулов Д.М. Термодинамика призабойной зоны пласта с учётом минерализации остаточной воды в коллекторе и возможности гидратообразования // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. – 2013. – № 4 (15). – С. 6–14.
9. Николаев Н.И., Лю Тяньлэ. Современные технологии бурения и крепления скважин при разведке газовых гидратов // *Записки Горного института*. – 2016. – Т. 218. – С. 206–214.
10. Прошутинский М.С., Раупов И.Р. Химические методы предупреждение гидратообразования в системах добычи нефти и газа // *Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых учёных*. – СПб, 15–21 мая 2022. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 73–75.
11. Обидина А.А., Жарикова Н.Х., Кусова Л.Г. Обзор мировых технологий предотвращения гидратообразования в системе добычи природного газа // *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. – 2023. – № 2. – С. 257–266.
12. Vasilev B.Yu., Mardashov D.V. Technical solutions for ecologically safe and sustainable development of shelf deposits // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 10. – № 2. – P. 1501–1506.
13. Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries / Z. Wei, X. Dai, X. Wang, S. Zhu, L.M. Yapanto, I.R. Raupov // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 2751–2758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.002>
14. Research progress on hydrate self-preservation effect applied to storage and transportation of natural gas / Y.G. Wen, Q.X. Chen, Y.W. Chen, S.S. Fan // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 772. – P. 795–801.
15. Study on fluid-solid coupling of physical variation of gas hydrate reservoirs during natural gas development / Y. Cheng, H. Shen, Y. Zhao, J. Zhang, Y. Xia // *Shiyou Xuebao*. – 2010. – Vol. 31. – № 4. – P. 607–611.
16. Generation of methane gas hydrate equilibrium curve for the thermodynamic gas hydrate inhibitor propylene glycol / B. Deka, A. Barifcani, A. Al Helal, D. Badi, H. Vuthaluru, V. Mahto // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 199. – P. 108312.
17. Facilitating gas hydrate dissociation kinetics and gas migration in clay interlayer by surface cations shielding effects / B. Fang, T. Lü, F. Ning, J. Pang, Z. He, J. Sun // *Fuel*. – 2022. – Vol. 318. – P. 123576.
18. Gambelli A.M. Natural gas recovery from hydrate compounds using CO2 replacement strategies: experimental study on thermal stimulation // *Energy Procedia*. – 2018. – Vol. 148. – P. 647–654.
19. Investigation into gas production from natural gas hydrate: a review / X.S. Li, C.G. Xu, Y. Zhang, X.K. Ruan, G. Li, Y. Wang // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 172. – P. 286–322.
20. Progress and challenges on gas production from natural gas hydrate-bearing sediment / Y. Liang, Y. Tan, Y. Luo, Y. Zhang, B. Li // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 261. – P. 121061.
21. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2022. – № 32 (1). – P. 113.
22. Natural gas storage and transportation within gas hydrate of smaller particle: size dependence of self-preservation phenomenon of natural gas hydrate / H. Mimachi, T. Murayama, S. Takeya, Y. Gotoh, A. Yoneyama, K. Hyodo, T. Takeda // *Chemical Engineering Science*. – 2014. – Vol. 118. – P. 208–213.
23. Introduction of a workflow for tomographic analysis of formation stimulation using novel nano-based encapsulated acid systems / D.G. Petrakov, H. Jafarpour, J. Qajar, H. Aghaei, H. Hajiabadi // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2021. – Vol. 19. – № 2. – P. 327–333. DOI: [10.5937/jaes0-29694](https://doi.org/10.5937/jaes0-29694)
24. Experimental study on the isothermal adsorption of methane gas in natural gas hydrate argillaceous silt reservoir / R. Qi, X. Qin, C. Ma, W. Mao, C. Lu, W. Zhang // *Advances in Geo-Energy Research*. – 2022. – Vol. 6. – № 2. – P. 143–156.
25. Sujith K.S., Ramachandran C.N. Natural gas evolution in a gas hydrate melt: effect of thermodynamic hydrate inhibitors // *Journal of Physical Chemistry B: Biophysical Chemistry, Biomaterials, Liquids, and Soft Matter*. – 2017. – Vol. 121. – No. 1. – P. 153–163.
26. High gas hydrate and free gas concentrations: an explanation for seeps offshore South Mocha Island / I. Vargas-Cordero, U. Tinivella, L. Villar-Muñoz, J.P. Bento // *Energies*. – 2018. – Vol. 11. – № 11. – P. 3062.
27. Современные методы борьбы с гидратообразованием на газовых месторождениях / О.В. Савенок, Л.В. Поварова, В.А. Альховиков, А.Г. Марков // *Булатовские чтения*. – 2019. – Т. 2. – С. 146–151.
28. Самсонов Р.О., Сайченко Л.А., Винклер В.С. Особенности освоения морских месторождений в условиях наличия газа и гидратов в верхней части разреза // *Бурение и нефть*. – 2023. – № S1. – С. 4–6.

29. Тупысев М.К. Влияние техногенных и природных газогидратов на результаты исследования и работы скважин // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2014. – № 4 (20). – С. 97–102.
30. К вопросу о применении полимерных теплоизоляционных покрытий для насосно-компрессорных труб на месторождениях Приобской низменности / В.И. Дарищев, С.Н. Лысенков, С.А. Галактионов, Ю.В. Краснов, О.И. Булаткин // Территория «Нефтегаз». – 2020. – № 5–6. – С. 30–34.
31. Experimental investigation on cracking characteristics of dry and saturated shales in nitrogen fracturing after liquid nitrogen (LN₂) injected / Zh. Yan, Wu. Yu, O.V. Savenok, Y. Jiadi, G. Haozhe, Li. Decheng // *Geofluids*. – 2023. – Vol. 2023. – P. 861524. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/8861524>
32. Heat control effect of phase change microcapsules upon cement slurry applied to hydrate-bearing sediment / G. Yang, T. Liu, H. Zhu, Z. Zhang, Y. Feng, E.L. Leusheva, V.A. Morenov // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124197>
33. Чакрыгин М.А. Необходимость применения безгидратного режима работы скважин // Вестник науки и образования. – 2018. – № 13 (49). – С. 101–103.
34. Чистяков В.К. Проблемы повышения качества отбора керновых проб при поисках и разведке месторождений природных газовых гидратов // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 311–317.
35. Laboratory evaluation of hybrid chemical enhanced oil recovery methods coupled with carbon dioxide / M.H. Ahmadi, S.M. Alizadeh, D.S. Tananykhin, S.K. Hadi, P. Iliushin, A.V. Lekomtsev // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 960–967. DOI: [10.1016/j.egyr.2021.02.005](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.02.005)

Информация об авторах

Ольга Вадимовна Савенок, доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. Savenok_OV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1312-4312>

Наиля Халимовна Жарикова, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. Zharikova_Nkh@pers.spmi.ru

Александр Евгеньевич Верисокин, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. verisokin.aleksandr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6530-4126>

Ашот Страевич Арутюнян, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2. megehiya@mail.ru

Хадид Махмуд, доктор технических наук, профессор Университета Аль-Баас, Сирийская Арабская Республика, Дамаск, Шоссе Алеппо, Хомс, Почтовый ящик 77. m-hadid@scs-net.org

Поступила в редакцию: 29.08.2023

Поступила после рецензирования: 13.09.2023

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Argunova K.K., Bondarev E.A., Rozhin I.I. Determination of the interval of hydrate formation in wells drilled in permafrost. *Science and education*, 2008, no. 1, pp. 13–19. (In Russ.)
2. Grunvald A.V. The use of methanol in the gas industry as an inhibitor of hydrate formation and the forecast of its consumption until 2030. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, 2007, no. 2, pp. 1–25. (In Russ.) Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Grunvald/Grunvald_1.pdf (accessed 15 May 2023).
3. Dzhioeva A.K., Brigida V.S. Spatial non-linearity of methane release dynamics in underground boreholes for sustainable mining. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 245, pp. 522–530. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.3>
4. Ilinova A.A., Romasheva N.V., Stroykov G.A. Prospects and social effects of carbon dioxide sequestration and utilization projects. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 493–502. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.12>
5. Zharikova N.Kh., Gorpichenko A.N., Sadykova I.R. Analysis of the effectiveness of methods for combating hydrates at the Urengoy oil and gas condensate field. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*, 2022, no. 3, pp. 81–97. (In Russ.)
6. Zaporozhets E.P., Shostak N.A. Calculation of the efficiency of single- and multicomponent anti-hydrate reagents. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 238, pp. 423–429. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.4.423>
7. Istomin V.A., Yakushev V.S., Kwon V.G., Dolgaev S.I., Chuvilin E.M. Directions of modern research of gas hydrates. *Gas chemistry*, 2009, no. 5, pp. 56–63. (In Russ.)
8. Istomin V.A., Fedulov D.M. Thermodynamics of the bottomhole formation zone taking into account the salinity of residual water in the reservoir and the possibility of hydrate formation. *Scientific and technical collection. News of gas science*, 2013, no. 4 (15), pp. 6–14. (In Russ.)
9. Nikolaev N.I., Lu Tianli. The modern technology of drilling and casing of well during the exploration of gas hydrates. *Journal of Mining Institute*, 2016, vol. 218, pp. 206–214. (In Russ.)

10. Proshutinsky M.S., Raupov I.R. hemical methods to prevent hydrate formation in oil and gas production systems. *Actual problems of subsoil use. Abstracts of the XVIII International forum-competition of students and young scientists*. St Petersburg, 15–21 May 2022. St Petersburg, Saint-Petersburg Mining University, 2022. pp. 73–75. (In Russ.)
11. Obidina A.A., Zharikova N.Kh., Kusova L.G. Overview of worldwide technologies for the prevention of hydrate formation in the natural gas production system. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*, 2023, no. 2, pp. 257–266. (In Russ.)
12. Vasilev B.Yu., Mardashov D.V. Technical solutions for ecologically safe and sustainable development of shelf deposits. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1501–1506.
13. Multi-criteria decision making approaches to select appropriate enhanced oil recovery techniques in petroleum industries / Z. Wei, X. Dai, X. Wang, S. Zhu, L.M. Yapanto, I.R. Raupov. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 2751–2758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.002>
14. Research progress on hydrate self-preservation effect applied to storage and transportation of natural gas / Y.G. Wen, Q.X. Chen, Y.W. Chen, S.S. Fan. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 772, pp. 795–801.
15. Study on fluid-solid coupling of physical variation of gas hydrate reservoirs during natural gas development / Y. Cheng, H. Shen, Y. Zhao, J. Zhang, Y. Xia. *Shiyou Xuebao*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 607–611.
16. Generation of methane gas hydrate equilibrium curve for the thermodynamic gas hydrate inhibitor propylene glycol / B. Deka, A. Barifcani, A. Al Helal, D. Badi, H. Vuthaluru, V. Mahto. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 199, p. 108312.
17. Facilitating gas hydrate dissociation kinetics and gas migration in clay interlayer by surface cations shielding effects / B. Fang, T. Lü, F. Ning, J. Pang, Z. He, J. Sun. *Fuel*, 2022, vol. 318, p. 123576.
18. Gambelli A.M. Natural gas recovery from hydrate compounds using CO₂ replacement strategies: experimental study on thermal stimulation. *Energy Procedia*, 2018, vol. 148, pp. 647–654.
19. Investigation into gas production from natural gas hydrate: a review / X.S. Li, C.G. Xu, Y. Zhang, X.K. Ruan, G. Li, Y. Wang. *Applied Energy*, 2016, vol. 172, pp. 286–322.
20. Progress and challenges on gas production from natural gas hydrate-bearing sediment / Y. Liang, Y. Tan, Y. Luo, Y. Zhang, B. Li. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 261, p. 121061.
21. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, no. 32 (1), p. 113.
22. Natural gas storage and transportation within gas hydrate of smaller particle: size dependence of self-preservation phenomenon of natural gas hydrate / H. Mimachi, T. Murayama, S. Takeya, Y. Gotoh, A. Yoneyama, K. Hyodo, T. Takeda. *Chemical Engineering Science*, 2014, vol. 118, pp. 208–213.
23. Introduction of a workflow for tomographic analysis of formation stimulation using novel nano-based encapsulated acid systems / D.G. Petrakov, H. Jafarpour, J. Qajar, H. Aghaei, H. Hajiabadi. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 327–333. DOI: 10.5937/jaes0-29694
24. Experimental study on the isothermal adsorption of methane gas in natural gas hydrate argillaceous silt reservoir / R. Qi, X. Qin, C. Ma, W. Mao, C. Lu, W. Zhang. *Advances in Geo-Energy Research*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 143–156.
25. Sujith K.S., Ramachandran C.N. Natural gas evolution in a gas hydrate melt: effect of thermodynamic hydrate inhibitors. *Journal of Physical Chemistry B: Biophysical Chemistry, Biomaterials, Liquids, and Soft Matter*, 2017, vol. 121, no. 1, pp. 153–163.
26. High gas hydrate and free gas concentrations: an explanation for seeps offshore South Mocha Island / I. Vargas-Cordero, U. Tinivella, L. Villar-Muñoz, J.P. Bento. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 11, p. 3062.
27. Modern methods of combating hydrate formation in gas fields / O.V. Savenok, L.V. Povarova, V.A. Alkhovikov, A.G. Markov. *Bulatov readings*, 2019, vol. 2, pp. 146–151. (In Russ.)
28. Samsonov R.O., Saichenko L.A., Winkler V.S. Features of the development of offshore fields in the presence of gas and hydrates in the upper part of the section. *Drilling and oil*, 2023, no. S1, pp. 4–6. (In Russ.)
29. Tupysev M.K. Influence of technogenic and natural gas hydrates on the results of research and operation of wells. *Scientific and technical collection. News of gas science*, 2014, no. 4 (20), pp. 97–102. (In Russ.)
30. To the question of the use of polymeric heat-insulating coatings for tubing on the fields of the Priobskaya lowland / V.I. Darishchev, S.N. Lysenkov, S.A. Galaktionov, Yu.V. Krasnov, O.I. Bulatkin. *Territory «NEFTEGAS»*, 2020, no. 5–6, pp. 30–34. (In Russ.)
31. Experimental investigation on cracking characteristics of dry and saturated shales in nitrogen fracturing after liquid nitrogen (LN₂) injected / Zh. Yan, Wu. Yu, O.V. Savenok, Y. Jiadi, G. Haozhe, Li. Decheng. *Geofluids*, 2023, vol. 2023, pp. 861524. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/861524>
32. Heat control effect of phase change microcapsules upon cement slurry applied to hydrate-bearing sediment / G. Yang, T. Liu, H. Zhu, Z. Zhang, Y. Feng, E.L. Leusheva, V.A. Morenov. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124197>
33. Chakrygin M.A. Necessity of application of hydrate-free operation of well. *Bulletin of science and education*, 2018, no. 13 (49), pp. 101–103. (In Russ.)
34. Chistyakov V.K. The development of the effective method for sampling of native-state core in natural gashydrate deposits. *Journal of Mining Institute*, 2009, vol. 183, pp. 311–317. (In Russ.)
35. Laboratory evaluation of hybrid chemical enhanced oil recovery methods coupled with carbon dioxide / M.H. Ahmadi, S.M. Alizadeh, D.S. Tananykhin, S.K. Hadi, P. Iliushin, A.V. Lekomtsev. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 960–967. DOI: 10.1016/j.egy.2021.02.005

Information about the authors

Olga V. Savenok, Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg Mining University, 21, line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. Savenok_OV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1312-4312>

Nailya Kh. Zharikova, Cand. Sc., Associate Professor, Saint-Petersburg Mining University, 21, line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. Zharikova_Nkh@pers.spmi.ru

Alexander E. Verisokin, Cand. Sc., Associate Professor, North Caucasian Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. verisokin.aleksandr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6530-4126>

Ashot S. Arutyunyan, Cand. Sc., Associate Professor, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya street, Krasnodar, 350072, Russian Federation. mereniya@mail.ru

Mahmoud Hadid, Dr. Sc., Professor, Al-Baath University, PO Box 77, Homs, Aleppo highway, Damascus, Syrian Arab Republic. m-hadid@scs-net.org

Received: 29.08.2023

Revised: 13.09.2023

Accepted: 26.04.2024

УДК 553.988

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4573

Шифр специальности ВАК: 25.00.17

Альтернативный метод получения квазимонодисперсной водомасляной эмульсии

А.А. Филипас, А.В. Кучман, Ю.Н. Исаев✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ isaev@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Разрушение нефтяной эмульсии является одной из наиболее существенных проблем в системах подготовки нефти, поскольку содержащиеся в скважинной жидкости примеси создают достаточно прочные адсорбционные оболочки дисперсной фазы, оболочки стабилизируют эмульсию и препятствуют её разложению. В настоящее время разработаны различные методы разрушения эмульсий. Одним из наиболее популярных из них является использование химических деэмульгаторов, которые имеют ряд недостатков. Другим методом разрушения эмульсий является использование физического воздействия, например, акустического. Акустическое воздействие на каплю с частотой, близкой к резонансной частоте капли, интенсифицирует разрушение эмульсии, при этом собственная частота колебаний капли эмульсии зависит от поверхностного натяжения и плотности дисперсной фазы, а также от радиуса капли. Метод, предлагаемый авторами, заключается в приближении эмульсии к её монодисперсной версии с последующим воздействием на неё акустическими волнами в узком диапазоне частот, при этом диапазон частот согласован с размерами капли дисперсной фазы полученной эмульсии. Поскольку в натуральных экспериментах получить модисперсную эмульсию невозможно, авторы предлагают называть такую версию эмульсии квазимонодисперсной, то есть близкой к монодисперсной эмульсии. В работе рассматривается один из вариантов разрушения эмульсии резонансной частотой, соответствующей радиусу глобулы квазимонодисперсной среды. **Объект:** водомасляная эмульсия. **Методы:** термодинамические потенциалы, физико-химическая гидродинамика, дифференциальные уравнения. **Результаты.** Получена дифференциальная функция распределения скоростей по координатам и времени, показывающая, что эмульсия является более устойчивой при её мелкой дисперсности. Оценено время оседания дисперсной фазы в эмульсии. Получена формула, позволяющая определить минимальный радиус капли в эмульсии при фиксированном давлении и температуре. Получена формула, позволяющая определить энергию Гиббса системы. Авторам работы удалось свести уравнения в частных производных Навье–Стокса к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и получить компоненты скоростей и давление при известной скорости вращения диска, определить механический момент сопротивления диска.

Ключевые слова: седиментация, химический потенциал, энтропия, распределение частиц по радиусам, физико-химическая гидродинамика

Для цитирования: Филипас А.А., Кучман А.В., Исаев Ю.Н. Альтернативный метод получения квазимонодисперсной водомасляной эмульсии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 219–232. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4573

UDC 553.988

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4573

Alternative method for obtaining a quasi-monodisperse oil-water emulsion

A.A. Filipas, A.V. Kuchman, Yu.N. Isaev✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ isaev_yusup@mail.ru

Abstract. Relevance. One of the priority areas of the oil and gas sector of the domestic economy is to increase the efficiency and profitability of commercial oil preparation, however, the scientific results obtained in this area are insufficient for modern technological requirements. The issues of lack of data for the development of reliable mathematical models of oil emulsion destruction, as well as input signals for regulating control of technological equipment for oil preparation, have not been resolved. Oil produced in the fields is a direct or reverse water-oil emulsion with a unique dispersed composition for each well. Currently, the size analysis of oil emulsion droplets in the field is carried out using a classical laboratory method, which has a low rate of obtaining analysis results, while the size distribution of globules carries information about such properties of the dispersed system as degradation rate, long-term stability, viscosity and others. Knowing the droplet size distribution of a particular oil emulsion, it is possible to select the most rational methods for its destruction and the necessary technical parameters of the devices used to implement these methods. In particular, when a droplet is exposed to a frequency close to its own, intensification of destruction is possible. In particular, one of the methods proposed by the authors is to bring the emulsion closer to its monodisperse version. Since it is not possible to obtain a monodisperse emulsion in natural experiments, the authors propose to call this version of the emulsion quasi-monodisperse, that is, close to a monodisperse emulsion. This work examines one of the options for producing a quasi-monodisperse emulsion. **Aim.** To describe the method for obtaining a quasi-monodisperse medium for destroying the emulsion with a resonant frequency corresponding to the radius of the globule of the quasi-monodisperse medium. **Object.** Water-in-oil emulsion. **Methods.** Thermodynamic potentials, physico-chemical hydrodynamics, differential equations. **Results.** The authors have obtained the differential velocity distribution function over coordinates and time, showing that the emulsion is more stable when it is finely dispersed, and estimated settling time of the dispersed phase in the emulsion. They obtained the formula that allows one to determine the minimum radius of a droplet in an emulsion at a fixed pressure and temperature and another one that allows one to determine the Gibbs energy of the system. The authors managed to reduce the Navier–Stokes partial differential equations to a system of ordinary differential equations and obtain the velocity components and pressure at a known speed of rotation of the disk, and determine the mechanical moment of resistance of the disk.

Keywords: sedimentation, chemical potential, entropy, particle radius distribution, physicochemical hydrodynamics

For citation: Filipas A.A., Kuchman A.V., Isaev Yu.N. Alternative method for obtaining a quasi-monodisperse oil-water emulsion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 219–232. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4573

Введение

Водомасляные эмульсии представляют собой коллоидные системы, состоящие из двух несмешивающихся жидкостей – масла и воды, одна из которых диспергирована в другой [1]. В нефтяной промышленности водомасляные эмульсии являются полидисперсными и синтезируются при перемешивании нефти и пластовой воды, то есть в местах интенсивного контакта фаз [2]. Из-за наличия эмульгаторов, которые являются, как правило, асфальтенами и смолами, глобулы, образуемые в непрерывной жидкой среде, имеют прочные адсорбционные оболочки, которые делают эмульсии устойчивыми к гравитационному расслоению.

Задача разрушения устойчивых нефтяных эмульсий является одной из ключевых в нефтяной промышленности. Существует множество решений для разделения эмульсий, таких как использование физических (механическое воздействие, нагревание и электрическая обработка), химических (применение разнообразных деэмульгаторов и наночастиц) и биологических (биоэмульгаторы) методов. Кроме того, применяются комбинированные подходы, объединяющие несколько методов для достижения наибольшей эффективности [3–5].

На сегодняшний день одним из наиболее популярных методов разложения нефтяных эмульсий является использование химических деэмульгаторов. Однако их применение ведет к образованию промежуточных слоев, которые нуждаются в спе-

циальной обработке и являются отходами, полное разрушение которых с помощью традиционных методов затруднительно или невозможно. Для минимизации негативного воздействия этих промежуточных слоев на окружающую среду необходимо постоянно их удалять, помещать в специальные шламонакопители и перерабатывать. Таким образом, большой интерес представляет поиск альтернативных методов разложения эмульсий, исключающих применение деэмульгаторов.

В различных технологических процессах, таких как увеличение нефтеотдачи, снижение вязкости тяжелой нефти, подготовка месторождений и интенсификация процессов переработки активно применяется акустическое воздействие [6–10]. Частота акустического воздействия при этом зависит от поверхностного натяжения и плотности дисперсной фазы, а также от размеров глобул дисперсной фазы [11]. Квазимонодисперсная эмульсия содержит глобулы дисперсной фазы с близкими значениями радиусов, соответственно, для её разрушения необходим узкий диапазон частот акустического воздействия, в отличие от полидисперсных эмульсий. Таким образом, предлагаемый авторами альтернативный метод разрушения полидисперсной эмульсии заключается в её предварительном преобразовании в квазимонодисперсную версию для последующего разрушения водомасляной эмульсии с применением акустических излучателей звуковых и ультразвуковых частот.

Анализ седиментационной устойчивости водомасляной эмульсий

Приведем аналитическое исследование устойчивости водонефтяных эмульсий и оценим время оседания дисперсной фазы в дисперсной среде. Для этого рассмотрим уравнение, описывающее процесс осаждения дисперсных частиц под воздействием гравитационной силы – гравитационную седиментацию. Запишем закон Ньютона для сферической водной частицы, движущейся в вязкой (масляной) среде, с учетом силы Стокса, которая воздействует на частицу в виде (1):

$$F_{\text{стокс}}(r) = -6\pi\mu r v, \quad (1)$$

где r – радиус; v – скорость частиц; μ [кг/(м·с)] – динамическая вязкость среды, а также силы Архимеда – гравитационного потенциала. Сила Архимеда записывается в виде (2):

$$F_A(r) = \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_b - \rho_{cp}), \quad (2)$$

где $r_b=10^3$ [кг/м³], $\rho_{cp}=10^3 \cdot 0,8$ [кг/м³] – плотности воды и среды (нефти, масла); $g=9,81$ м/с² – ускорение свободного падения. Запишем второй закон Ньютона в виде (3):

$$m \frac{dv}{dt} = F_C + F_A = -6\pi\mu r v + \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_b - \rho_{cp}), \quad (3)$$

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_b.$$

Проведем поиск решения дифференциального уравнения с учетом того, что оно может быть представлено в виде суммы свободной и вынужденной составляющих в виде (4):

$$v = v_{cb} + v_b = Ae^{pt} + v_b. \quad (4)$$

Здесь A – это постоянная интегрирования, которая определяется из исходных условий; а p – корень характеристического уравнения.

Чтобы найти вынужденную составляющую скорости v_b , рассматриваем установившийся режим, когда производная скорости равна нулю. Запишем вынужденную составляющую в виде (5)

$$v_b = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_b - \rho_{cp})}{6\pi\mu r} = \frac{2}{9} \frac{\pi r^2 g (\rho_b - \rho_{cp})}{\pi\mu}. \quad (5)$$

Находим корень характеристического уравнения p , для этого запишем (6)

$$mp + 6\pi\mu r = 0 \rightarrow p = -\frac{6\pi\mu r}{m} = -\frac{6\pi\mu r}{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_b} = -\frac{9\mu}{2\pi r^2 \rho_b}. \quad (6)$$

Теперь решение можно записать в виде суперпозиции свободной и вынужденной составляющих и указать явную зависимость от времени в виде выражения (7)

$$v(t) = v_{cb}(t) + v_b = Ae^{-\frac{9\pi\mu}{2\pi r^2 \rho_b} t} + \frac{2}{9} \frac{\pi r^2 g (\rho_b - \rho_{cp})}{\pi\mu}. \quad (7)$$

С учетом того, что начальная скорость частицы равна нулю, константа интегрирования рассчитывается как выражение (8):

$$A = -\frac{2}{9} \frac{\pi r^2 g (\rho_b - \rho_{cp})}{\pi\mu}. \quad (8)$$

Подставим найденную константу в выражения для скорости и явно выделим зависимость скорости от радиуса частицы, тогда получим (9):

$$v(t, r) = \frac{2}{9} \frac{\pi r^2 g (\rho_b - \rho_{cp})}{\pi\mu} \cdot \left(1 - e^{-\frac{9\pi\mu}{2\pi r^2 \rho_b} t} \right). \quad (9)$$

Как видно из графика, зависимость скорости от радиуса и времени $v(t, r)$ может быть неоднородной для частиц с разными радиусами из-за различий в их инерционных свойствах и взаимодействии с окружающей средой. Капли меньшего радиуса быстрее достигают установившегося режима движения, чем капли большего радиуса. Кроме того, при исследовании производной скорости по радиусу $\partial v(t, r)/\partial r$ можно получить информацию об относительном количестве частиц, движущихся с заданной скоростью. Зависимость $\partial v(t, r)/\partial r$ – это дифференциальное распределение скорости частицы по радиусу в зависимости от времени, показывающая, что мелкодисперсная эмульсия является более устойчивой, чем крупнодисперсная.

Из графика на рис. 2 видно, что изначально движение начинается с наиболее мелких частиц, что объясняется их более быстрым достижением установившегося режима движения из-за их меньшей инерции. По мере прохождения времени к этому движению присоединяются и более крупные частицы, что приводит к увеличению скорости движения и среднего радиуса частиц в системе. Таким образом, начальное различие в радиусе частиц со временем сглаживается, и распределение частиц по радиусам становится более равномерным. Графики на рис. 2, а, б показывают, что мелкодисперсная эмульсия является более устойчивой по сравнению с крупнодисперсной.

Результирующую скорость частицы можно определить как векторную сумму (декомпозицию) вертикальной и горизонтальной компонент. Зная вертикальную скорость частиц, вызванную гравитацией можно записать выражение (10)

$$\mathbf{v} = \mathbf{i}v_{\perp} + \mathbf{j}v_{\parallel} = \mathbf{i} \frac{dx}{dt} + \mathbf{j} \frac{dy}{dt}. \quad (10)$$

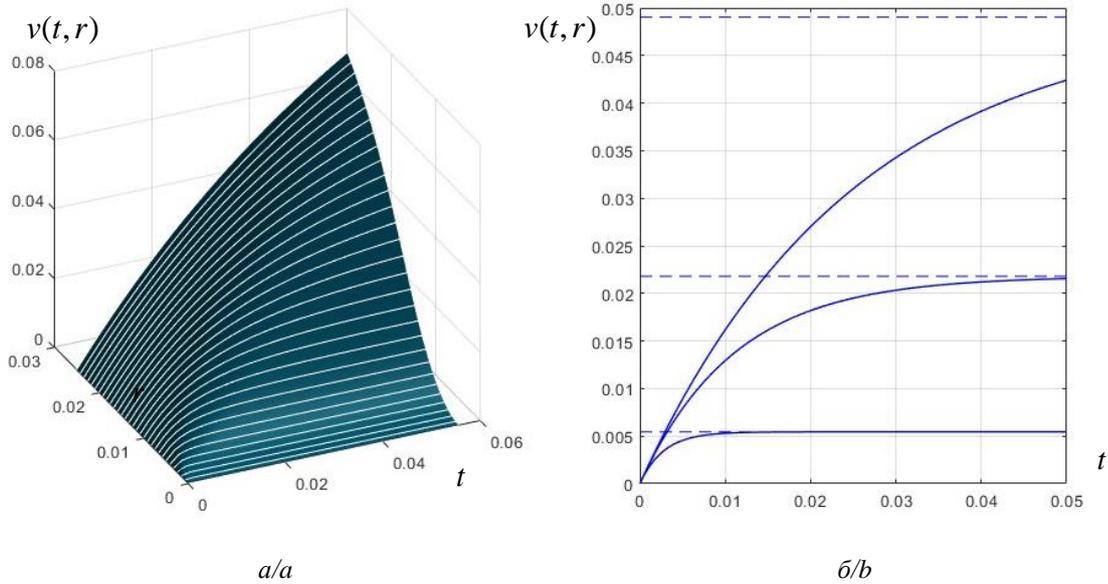


Рис. 1. Распределение скорости частиц $v(t,r)$ от времени и радиуса: а) пространственное распределение скорости; б) изменение скорости частицы во времени при фиксированном радиусе. Пунктиром показаны установившиеся значения скорости во времени

Fig. 1. Distribution of particle speed $v(t,r)$ versus time and radius: а) spatial distribution of velocity; б) change in particle velocity over time at a fixed radius. The dotted line shows the steady-state velocity values over time

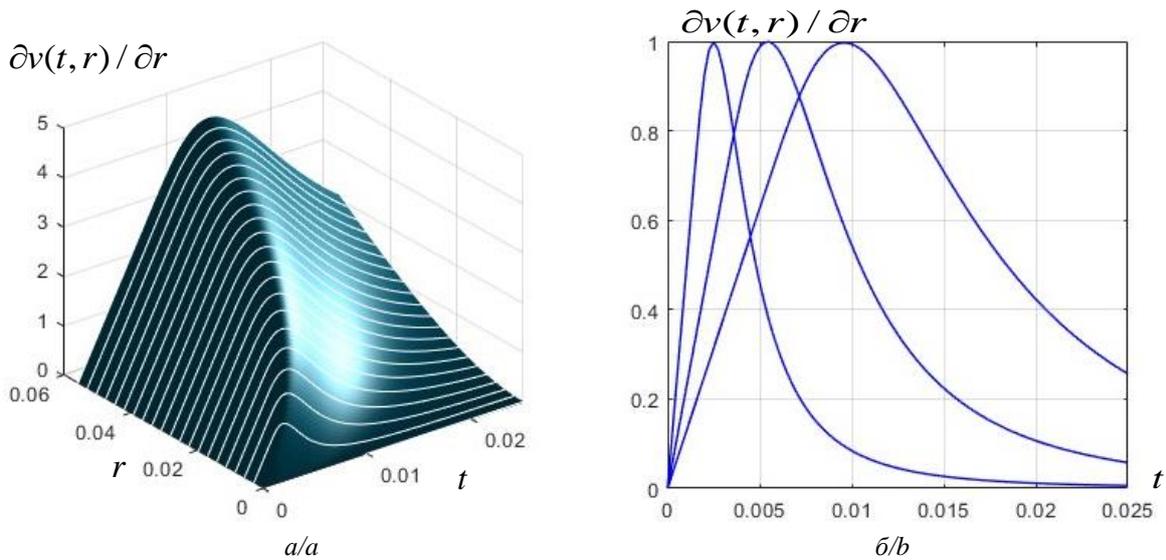


Рис. 2. Дифференциальное распределение скорости частиц по времени и по радиусу $v(t,r)$: а) пространственное дифференциальное распределение скорости частиц по времени и радиусу; б) нормированное дифференциальное распределение скорости частиц во времени при фиксированном радиусе. График дифференциального распределения скорости частиц при фиксированном радиусе делится на максимальную величину распределения

Fig. 2. Differential distribution of particle speed over time and radius $v(t,r)$: а) spatial differential distribution of particle speed over time and radius; б) normalized differential distribution of particle speed over time at a fixed radius. The graph of the differential distribution of particle speed at a fixed radius is divided by the maximum value of the distribution

Очевидно, что горизонтальная составляющая скорости во времени остается неизменной и определяется её начальным значением. В частности, горизонтальная компонента скорости частицы может равняться нулю $v_{||}=0$ и тогда можно записать систему уравнений (11)

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_{||}; \\ \frac{dy}{dt} = v_{\perp} = \frac{2}{9} \frac{r^2 g \Delta \rho}{\mu_{неф}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{9 \mu_{неф} t}{2 r^2 \rho_w}} \right). \end{cases} \quad (11)$$

После интегрирования получаем выражения для траектории частицы $\mathbf{r}=\mathbf{i}x+\mathbf{j}y$ и ее компонент – вертикальной y и горизонтальной x координат, соответственно, получаем (12)

$$\begin{cases} x = \int_0^t v_{\parallel}(t)dt + x_0 = v_x(0) \cdot t + x_0; \\ y = \int_0^t v_{\perp}(t) dt + y_0 = \\ = \frac{2r^2 g \Delta \rho}{9 \mu_{\text{неф}}} \cdot t + \frac{2r^2 \rho_w}{\mu_{\text{неф}}} \left(1 - e^{-\frac{9 \mu_{\text{неф}} t}{2r^2 \rho_w}} \right) + y_0. \end{cases} \quad (12)$$

Процесс седиментации можно представить в виде графика на рис. 3 (поперечные размеры преувеличены). Длительность процесса 0,4 часа, поперечный размах клина 0,08 м. В верхней части графика находится горизонтальная линия просветления. На графике показаны погружения глобул воды во времени. По вертикали и горизонтали шкалы указаны в метрах.

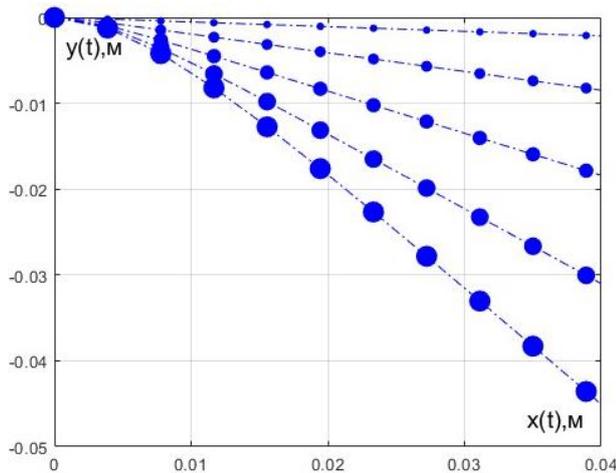


Рис. 3. Траектории глобул с различными радиусами. По вертикали отбрасывается координата $y(t)$, по горизонтали – координата $x(t)$. На графике представлены кривые для частиц с радиусами r , $2r$, $3r$, $4r$ и $5r$, расположенные сверху вниз. Чем больше радиус глобул, тем больше размер меток

Fig. 3. Trajectories of globules with different radii. Along the vertical axis is the coordinate $y(t)$, along the horizontal axis is the coordinate $x(t)$. From top to bottom, graphs are presented for particles with radii r , $2r$, $3r$, $4r$, $5r$

Оценки длительности процесса гравитационной седиментации показывают, что время, необходимое для осаждения частиц, составляет от нескольких часов до суток для высокодисперсных сред (рис. 3).

Для форсирования процесса седиментации авторами предлагается использовать механический

центробежный метод седиментации, основанный на сведении полидисперсной среды в квазимонодисперсную среду. Далее квазимонодисперсная среда подвергается ультразвуковому воздействию с резонансной частотой [11, 12] с целью полного разрушения эмульсии.

Описание механического процесса получения квазимонодисперсной эмульсии

Приведем качественные вспомогательные рисунки изотерм и изобар фазовых переходов (рис. 4, 5). На рис. 4 приведенный химический потенциал воды обозначен как μ_1 , а масла – как μ_2 . Производная химического потенциала по давлению при фиксированной температуре есть удельный объем $\tilde{V} = (\partial\mu/\partial p)_T$ [13, 14]. Плотность воды ρ_1 выше плотности масла ρ_2 , следовательно, наклон химического потенциала масла μ_2 , $\tilde{V}_2 = (\partial\mu_2/\partial p)_T \sim 1/\rho_2$ круче, чем химического потенциала воды μ_1 , $\tilde{V}_1 = (\partial\mu_1/\partial p)_T \sim 1/\rho_1$. Пересечение графиков даёт нам точку положения равновесия. Система стремится к минимуму химического потенциала, и поэтому до положения равновесия и после положения равновесия следует выбирать нижние кривые, выделенные пунктиром.

Производная химического потенциала μ по температуре при постоянном давлении есть энтропия системы $S = -(\partial\mu/\partial T)_p$. Система стремится к максимуму энтропии. Энтропия выше в той среде, где меньше плотность, поэтому наклон фазовой кривой для масла будет круче, чем для воды (рис. 5). Поскольку фазовые переходы имеют скачки производных, они являются фазовыми переходами первого рода.

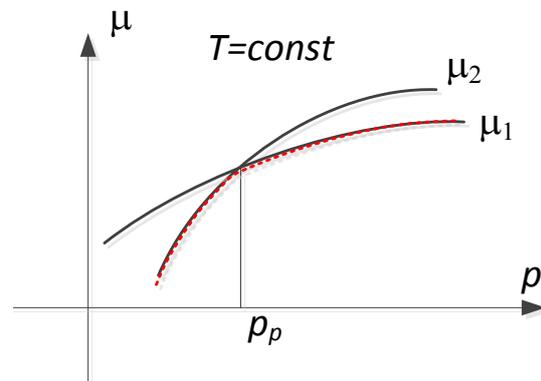


Рис. 4. Изотерма. Химический потенциал фаз при постоянной температуре. Наклон на графиках означает объем $V = (\partial\mu/\partial p)_T$. Объем изменяется скачком

Fig. 4. Isotherm. Chemical potential of phases at constant temperature. The slope on the graphs means volume $V = (\partial\mu/\partial p)_T$. The volume changes abruptly

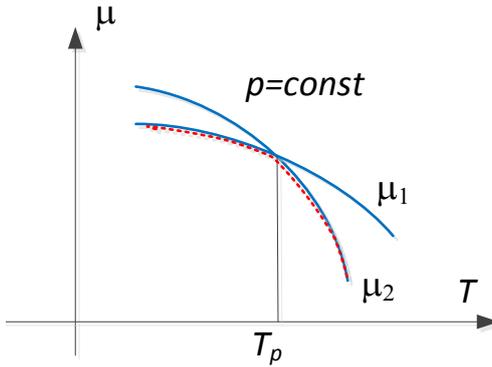


Рис. 5. Изобара. Химический потенциал фаз при постоянном давлении. Наклон на графиках означает энтропию $S = -(\partial\mu/\partial T)_p$. Энтропия увеличивается скачком

Fig. 5. Isobar. Chemical potential of phases at constant pressure. The slope on the graphs means entropy $S = -(\partial\mu/\partial T)_p$. Entropy increases abruptly

Рассмотрим процесс образования капли в зависимости от её размеров.

Энергия Гиббса системы – капля, находящаяся в масло-водяной среде, описывается свободной энергией, состоящей из суммы свободных молярных энергий масла F_1 , молярной энергии воды F_2 и поверхностной энергии образующейся капли $F_\Sigma = \sigma\Sigma$ записывается в виде (13)

$$G = F_1N_1 + F_2N_2 + P_0(N_1V_1 + N_2V_2) + F_\Sigma. \quad (13)$$

Здесь N_1 – число молей в воде; V_1 – молярный объем воды; N_2 – число молей в масле; V_2 – молярный объем масла; $\Sigma = 4\pi r^2$ – площадь поверхности капли; r – радиус капли; σ – поверхностное натяжение; P_0 – давление в среде.

Перепишем последнее выражение, записывая свободную энергию Гельмгольца F в естественных координатах [15, 16], тогда (13) переходит в (14)

$$G = F_1(T, V_1)N_1 + F_2(T, V_2)N_2 + P_0(N_1V_1 + N_2V_2) + 4\pi r^2\sigma. \quad (14)$$

Условия равновесия системы означают минимум энергии Гиббса (2) при фиксированных значениях её естественных координат – P_0 – давления системы и T – температуры. Эти параметры системы P_0, T будем считать не изменяющимися. В качестве независимых переменных выберем величины N_1, N_2, r . Перепишем уравнение (14) так, чтобы в него входили только независимые переменные. Для этого будем использовать дополнительные условия связи. Полное число частиц в системе не изменяется и записывается в виде (15):

$$N = N_1 + N_2, \quad N_2 = N - N_1, \quad dN_1 = -dN_2, \quad (15)$$

объем капли определяется выражением (16)

$$V_1 = 4\pi r^3 / 3N_1. \quad (16)$$

Выражение для объема капли дает нам вспомогательные выражения (17)

$$\frac{\partial V_1}{\partial r} = 4\pi r^2 / N_1, \quad \frac{\partial V_1}{\partial N_1} = -4\pi r^3 / 3N_1^2. \quad (17)$$

Минимизируя потенциал Гиббса как функцию трех переменных, найдем значения переменных, при которых система находится в положении устойчивого равновесия

$$\frac{\partial G}{\partial V_2} = 0, \quad \frac{\partial G}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial G}{\partial N_1} = 0.$$

Последняя система уравнений преобразуется в следующую систему (18) с учетом выражений (15)–(17):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial V_2} &= \frac{\partial F_2}{\partial V_2} N_2 + P_0 N_2 = N_2(-P_2 + P_0) = 0, \\ \frac{\partial G}{\partial r} &= N_1 \frac{\partial F_1}{\partial V_1} \frac{\partial V_1}{\partial r} + N_1 P_0 \frac{\partial V_1}{\partial r} + 8\pi r\sigma = \\ &= N_1(-P_1 + P_0) \frac{4\pi r^2}{N_1} + 8\pi r\sigma = \\ &= 4\pi r^2 \left(-P_1 + P_0 + \frac{2\sigma}{r} \right) = 0; \\ \frac{\partial G}{\partial N_1} &= (F_1 - F_2) + P_0(V_1 - V_2) + N_1 \left(\frac{\partial F_1}{\partial V_1} + P_0 \right) \frac{\partial V_1}{\partial N_1} = \\ &= (F_1 - F_2) + P_0(V_1 - V_2) - (P_0 - P_1) \frac{4\pi r^3}{3N_1} = \\ &= \mu_1(T, P_1) - \mu_2(T, P_2) = 0. \end{aligned} \right. \quad (18)$$

Последняя система дает соотношения (19) для давлений в средах, информацию о радиусе образующейся капли и о химических потенциалах сред.

$$\left\{ \begin{aligned} P_2 &= P_0; \\ P_1 &= P_0 + \frac{2\sigma}{r}; \\ \mu_1(T, P_1) &= \mu_2(T, P_2) \rightarrow \\ \rightarrow \mu_1(T, P_2 + \frac{2\sigma}{r}) &= \mu_2(T, P_2). \end{aligned} \right. \quad (19)$$

Прокомментируем полученные результаты.

Когда две среды находятся в в термодинамическом равновесии, на границе раздела имеет место равенство химического потенциала $\mu_1(T, P_n) = \mu_2(T, P_n)$, температуры T и давления P_n . Будем называть это давление P_n давлением насыщения (рис. 6). Для появления капли необходимо дополнительное давление, потому что капля выпуклая и, следовательно, в ней избыток давления, который компенсируется поверхностным натяжением среды.

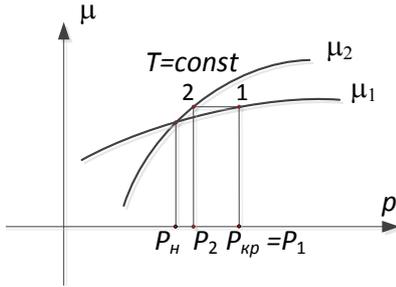


Рис. 6. График для вывода формулы (22)
Fig. 6. Plot for derivation of condition (22)

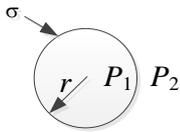


Рис. 7. Капля
Fug. 7. Droplet

При добавлении дополнительного давления появляется капля, радиус которой, в соответствии с уравнением (19), определяется выражением (20)

$$P_1 = P_2 + \frac{2\sigma}{r} \rightarrow r = \frac{2\sigma}{P_1 - P_2}. \quad (20)$$

При этом в среде образуется новое положение равновесия, при котором выполняется равенство химических потенциалов (рис. 6, точки 1, 2) и последнее выражение системы (19). Очевидно, что капли, давление которых находится в интервале между точками P_1 и P_2 , будут расти, так как радиус капле растет в соответствии с выражением (20). Капли, у которых внутренне давление выше P_1 , будут распадаться, потому что в этом случае химический потенциал увеличивается, что термодинамически не выгодно, чтобы удержать каплю с таким маленьким радиусом. Следовательно, точку давления P_1 можно назвать критической, $P_1 = P_{кр}$, то есть это тот минимальный радиус капли, меньше которого капли распадаются, поскольку являются неустойчивыми. Критический радиус капли определяется выражением (21)

$$r_{кр} = \frac{2\sigma}{P_{кр} - P_2}. \quad (21)$$

Теперь приведем связь критического радиуса $r_{кр}$ (минимальный радиус устойчивой капли) с избыточным давлением $\Delta P = P_2 - P_{н}$, на которое нужно увеличить давление насыщения $P_{н}$, чтобы получить желаемый радиус капли. Для этого разложим в ряд Тейлора химический потенциал в последнем выражении системы (19) в окрестности точки давления насыщения $P_{н}$

$$\begin{aligned} \mu_1(T, P_1) &= \mu_2(T, P_2), \\ \mu_1(T, P_1) &= \mu_1(T, P_{н}) + \left. \frac{\partial \mu_1}{\partial P} \right|_T (P_{кр} - P_{н}), \\ \mu_2(T, P_2) &= \mu_2(T, P_{н}) + \left. \frac{\partial \mu_2}{\partial P} \right|_T (P_2 - P_{н}). \end{aligned}$$

С учетом последних выражений получаем формулу (22)

$$\left. \frac{\partial \mu_1}{\partial P} \right|_T (P_{кр} - P_{н}) = \left. \frac{\partial \mu_2}{\partial P} \right|_T (P_2 - P_{н}). \quad (22)$$

Учитывая, что из соотношения Максвелла [13–16] производная химического потенциала по давлению есть удельный объем $\left. \frac{\partial \mu}{\partial P} \right|_T = \tilde{V}$, введя обозначение $\Delta P = (P_2 - P_{н})$ и учитывая, что в соответствии с рис. 6

$$(P_{кр} - P_{н}) = (P_{кр} - P_2 + \Delta P),$$

выражение (22) можно переписать в виде (23)

$$\begin{aligned} \tilde{V}_1 (P_{кр} - P_2 + \Delta P) &= \tilde{V}_2 \Delta P \rightarrow \\ \rightarrow P_{кр} - P_2 &= \Delta P (\tilde{V}_2 - \tilde{V}_1) / \tilde{V}_1. \end{aligned} \quad (23)$$

Теперь с учетом (12) выражение для критического радиуса (21) можно переписать в виде

$$r_{кр} = \frac{2\sigma \tilde{V}_1}{(\tilde{V}_2 - \tilde{V}_1) \Delta P}. \quad (24)$$

Здесь ΔP величина прессыщения давления. Если перейти к плотности жидкостей, то формула (24) примет вид (25)

$$r_{кр} = \frac{2\sigma \rho_2}{(\rho_1 - \rho_2) \Delta P}. \quad (25)$$

Таким образом, можно изменять радиус критической капли за счет подвода или отвода тепла, варьируя температурой T и давлением прессыщения ΔP .

Из формулы (14) видно, что та часть энергии Гиббса, которая несет ответственность за образование капле, определяется соотношением (26) [13, 16]

$$\Delta G = G_{\Sigma} = 4\pi r \sigma. \quad (26)$$

Можно определить минимальную энергию, которую нужно вложить в эмульсию для того, чтобы получить каплю с радиусом $r_{кр}$

$$G_{\Sigma,кр} = 4\pi r_{кр} \sigma. \quad (27)$$

При известной функции распределения частиц по радиусам можно определить результирующую поверхностную энергию Гиббса дисперсной среды по формуле (28)

$$G_{\Sigma}(r) = 4\pi r^2 \sigma \rightarrow$$

$$\rightarrow G_S = \int_{r_{\text{сп}}=r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} G_{\Sigma}(r) f(r) dr = 4\pi \sigma \int_{r_{\text{сп}}=r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} f(r) r^2 dr. \quad (28)$$

Здесь $f(r)$ – функция распределения частиц по радиусам.

Таким образом, получена формула, позволяющая оценить минимальный радиус капли при известных температуре, давлении, плотностях сред и поверхностном натяжении между ними.

Формула для радиуса капли позволяет определить поверхностную энергию Гиббса, если известна функция распределения частиц по радиусам.

На качественных графиках рис. 4, 5 показаны изломы производных фазовых кривых, которые говорят о том, что изменение состава эмульсии происходит при изменении давления и энтропии. Энтропия системы должна увеличиваться, и тогда происходит потребление теплоты. Полученное авторами выражение (27) позволяет связать количественно радиус образовавшихся глобул с избыточным давлением и поверхностным натяжением.

Для оценки степени дисперсности среды авторами предлагается использовать критерий коэффициента монодисперсности, определяемый выражением

$$k_1 = \frac{\sum_{k=1}^N r_k n_k}{\sum_{k=1}^N n_k}, \quad k_3 = \frac{\sum_{k=1}^N r_k^3 n_k}{\sum_{k=1}^N r_k^2 n_k}, \quad k_{\text{дисп}} = k_1/k_3. \quad (29)$$

Или тот же критерий можно записать для непрерывной функции. Если задана непрерывная функция распределения частиц по размерам $f(r)$, формулы (29) преобразуются в формулы (30):

$$k_1 = \frac{\int_0^{r_{\text{макс}}} r f(r) dr}{\int_0^{r_{\text{макс}}} f(r) dr}, \quad k_3 = \frac{\int_0^{r_{\text{макс}}} r^3 f(r) dr}{\int_0^{r_{\text{макс}}} r^2 f(r) dr},$$

$$k_{\text{дисп}} = k_1/k_3. \quad (30)$$

Очевидно, что по мере приближения дисперсной среды к её монодисперсному состоянию коэффициент монодисперсности стремится к единице.

Приведем пример расчета коэффициента дисперсности для экспериментальных значений, полученных авторами. Для получения функции распределения частиц по размерам использовался гранулометрический метод, который включал в себя микроскоп и компьютерный комплекс с программным обеспечением [12].

$$k_1 = \frac{\sum_{k=1}^{18} r_k n_k}{\sum_{k=1}^{18} n_k} = \frac{1846}{512} = 3,29,$$

$$k_3 = \frac{\sum_{k=1}^{18} r_k^3 n_k}{\sum_{k=1}^{18} r_k^2 n_k} = \frac{83080,16}{9809,39} = 8,47,$$

$$k_{\text{дисп}} = k_1/k_3 = 0,388,$$

$$k_1 = \frac{\int_0^{r_{\text{макс}}} r f(r) dr}{\int_0^{r_{\text{макс}}} f(r) dr} = 3,32, \quad k_3 = \frac{\int_0^{r_{\text{макс}}} r^3 f(r) dr}{\int_0^{r_{\text{макс}}} r^2 f(r) dr} = 9,$$

$$k_{\text{дисп}} = k_1/k_3 = 0,369.$$

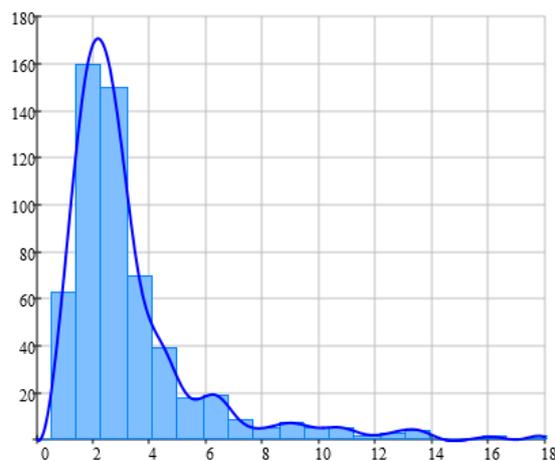
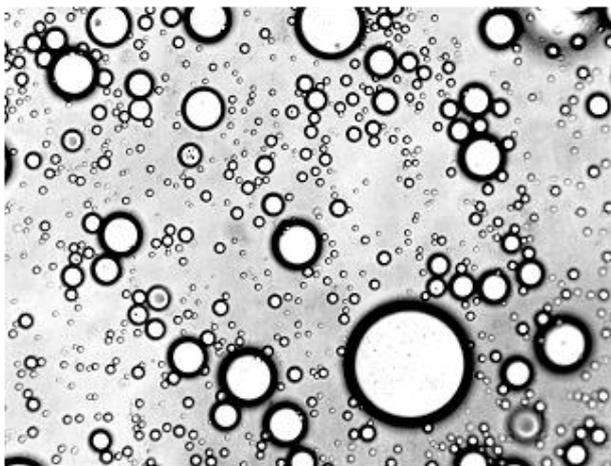


Рис. 8. Пример построения функции распределения частиц по размерам. Слева – изображение, справа – функция распределения частиц по размерам. Непрерывное распределение интерполировалась кубическим сплайном

Fig. 8. Example of constructing a particle size distribution function. The image is on the left, the particle size distribution function is on the right. The continuous distribution was interpolated by a cubic spline

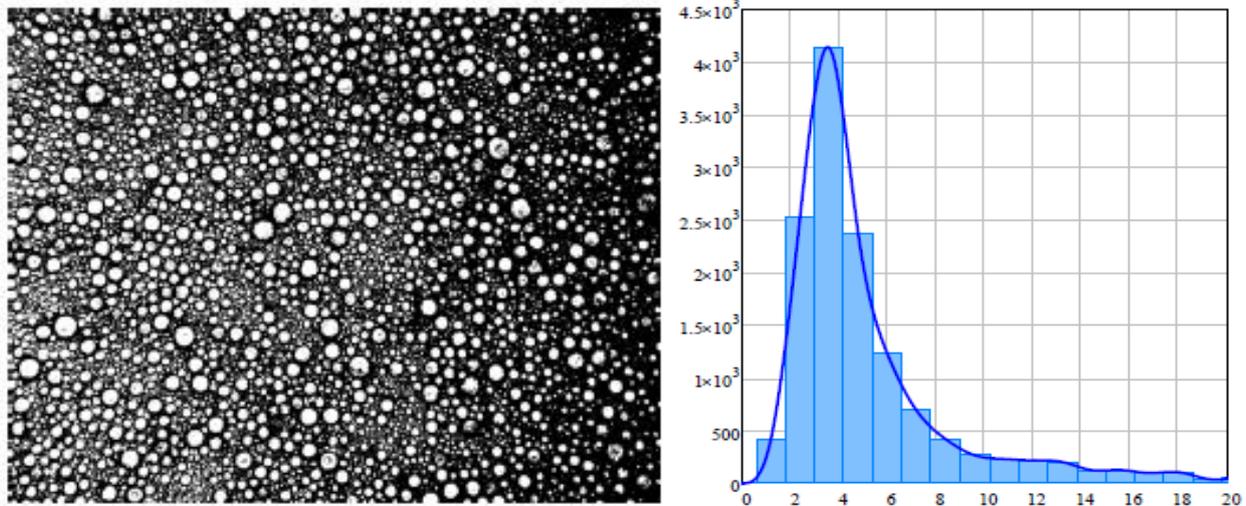


Рис. 9. Пример построения функции распределения частиц по размерам. Слева – изображение, справа – функция распределения частиц по размерам. Непрерывное распределение интерполировалось кубическим сплайном
Fig. 9. Example of constructing a particle size distribution function. The image is on the left, the particle size distribution function is on the right. The continuous distribution was interpolated by a cubic spline

Далее приводится результат распределения частиц по размерам после внесения дополнительной энергии с целью приближения дисперсной среды к квазимонодисперсной (рис. 10).

$$k_1 = \frac{\sum_{k=1}^{20} r_k n_k}{\sum_{k=1}^{20} n_k} = \frac{7,038 \cdot 10^4}{1,336 \cdot 10^4} = 5,266,$$

$$k_3 = \frac{\sum_{k=1}^{20} r_k^3 n_k}{\sum_{k=1}^{20} r_k^2 n_k} = \frac{6327635,32}{553271,84} = 11,435,$$

$$k_{\text{дисп}} = k_1/k_3 = 0,461,$$

$$k_1 = \frac{\int_0^{r_{\max}} r f(r) dr}{\int_0^{r_{\max}} f(r) dr} = 5,269, \quad k_3 = \frac{\int_0^{r_{\max}} r^3 f(r) dr}{\int_0^{r_{\max}} r^2 f(r) dr} = 11,472,$$

$$k_{\text{дисп}} = k_1/k_3 = 0,459.$$

Монодисперсной средой можно считать такое распределение частиц дисперсной фазы эмульсии, при котором критерий монодисперсности близок к 0,6–0,7.

Для изменения функции распределения частиц по радиусу необходимо вложить дополнительную энергию, которая препятствует процессам седиментации и коалесценции. Для этого можно использовать перемешивание жидкости, например, вращением диска у основания цилиндра с жидкостью. Вкладывая энергию, можно смещать макси-

мум функции распределения частиц по размерам, добиваясь расположения максимума вблизи резонансного радиуса.

Приведем один из возможных методов вклада энергии в эмульсию. При перемешивании жидкостей возникает седиментация, обусловленная центробежными силами. Для анализа седиментации, обусловленной центробежными силами, приведем полуаналитическое решение уравнения гидродинамики. Поскольку нас интересует качественный анализ процесса, будем рассматривать асимметричное вращение жидкости в цилиндре, в основании которого лежит бесконечный диск. Такой качественный подход позволит свести систему дифференциальных уравнений в частных производных Навье–Стокса к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

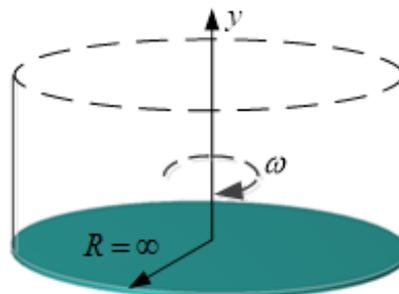


Рис. 10. Вращающийся диск
Fig. 10. Rotating disk

Приведем систему уравнений Навье–Стокса [15, 17–21] для вышеупомянутой системы в цилин-

дических координатах y, r, φ , вязкость среды будем обозначать буквой μ без индекса.

$$\begin{aligned} \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\varphi^2}{r} + v_y \frac{\partial v_r}{\partial y} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right), \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_r v_\varphi}{r} + v_y \frac{\partial v_\varphi}{\partial y} = \\ = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\Delta v_\varphi + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (32)$$

$$\frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_y}{\partial \varphi} + v_r \frac{\partial v_y}{\partial r} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \Delta v_y. \quad (33)$$

Уравнение непрерывности

$$\frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (34)$$

где v_r, v_φ, v_y – радиальная, тангенциальная и аксиальная компоненты вектора скорости,

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}.$$

На поверхности диска выполняются очевидные граничные условия

$$v_r = 0, v_\varphi = \omega r, v_y = 0 \text{ при } y = 0. \quad (35)$$

Здесь ω – угловая скорость вращения диска. В окрестности вращающегося диска жидкость также начинает вращаться вместе с ним согласно условиям тангенциальной составляющей скорости v_φ . Ввиду действующего на жидкость вращения диска вблизи его поверхности формируется радиальная составляющая скорости, направленной от центра к краю диска. Очевидно, при этом существует вертикальное движение жидкости. И, следовательно, можно записать граничные условия

$$v_r = 0, v_\varphi = 0, v_y = -U_0 \text{ при } y = \infty. \quad (36)$$

Не умаляя общности значение U_0 , можно выбрать значение равное нулю. Давление жидкости будем считать постоянным вдоль радиуса $\partial p / \partial r = 0$. Тогда систему уравнений (31)–(33) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi^2}{r} + v_y \frac{\partial v_r}{\partial y} = \\ = \mu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - v_r \frac{v_\varphi}{r} + v_y \frac{\partial v_\varphi}{\partial y} = \\ = \mu \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (38)$$

$$v_r \frac{\partial v_y}{\partial r} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_y}{\partial r} \right). \quad (39)$$

Будем искать решения уравнения (38)–(40), удовлетворяющие уравнению непрерывности (34) и граничным условиям (35), (36), в виде (40)

$$\begin{aligned} v_r = r\omega F(\xi), v_\varphi = r\omega G(\xi), v_y = \sqrt{\mu\omega} H(\xi), \\ p = -\rho\mu\omega P(\xi), \xi = \sqrt{\omega/\mu} \cdot y. \end{aligned} \quad (40)$$

Такая подстановка позволит свести систему уравнения в частных производных в систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведем полученную систему уравнений (41)–(44):

$$F^2 - G^2 + F'H = F'', \quad (41)$$

$$2FG + G'H = G'', \quad (42)$$

$$HH' = P' + H'', \quad (43)$$

$$2F + H' = 0. \quad (44)$$

Здесь штрих означает производную по безразмерной переменной ξ . Граничные условия (36), (37) переписутся в виде

$$\begin{cases} F = 0 \\ G = 1 \text{ при } \xi = 0, \\ H' = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} F \rightarrow 0 \\ G \rightarrow 0 \\ H \rightarrow -\alpha = U_0 / \sqrt{\mu\omega} \end{cases} \text{ при } \xi \rightarrow \infty.$$

Из последней системы уравнения в линейном приближении сразу находится доминирующий корень характеристического уравнения, то есть корень, близкий к границе устойчивости и определяющий процесс при его окончании. Этот процесс можно записать в виде (45)

$$\begin{cases} -F'\alpha = F'' \\ -G'\alpha = G'' \\ H' = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} -p\alpha = p^2 \\ -p\alpha = p^2 \\ H \rightarrow -\alpha = U_0 / \sqrt{\mu\omega} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F \sim Ae^{-\alpha\xi} + \dots \\ G \sim Be^{-\alpha\xi} + \dots \\ H \sim -\alpha + \frac{2}{\alpha} Ae^{-\alpha\xi} + \dots \end{cases} \quad (45)$$

На начальном этапе процесса при линейном приближении будем иметь зависимости (46)

$$\begin{cases} F = 0 \\ G = 1 \\ H' = 0 \end{cases} \text{ при } \xi \rightarrow 0, \begin{cases} F \sim a\xi - \frac{\xi^2}{2} - \frac{1}{3}b\xi^3; \\ G \sim 1 + b\xi + \frac{1}{10}a\xi^2; \\ H \sim -a\xi^2 + \frac{1}{3}\xi^3. \end{cases} \quad (46)$$

Более точное решение можно получить, используя численный метод Рунге–Кутты четвертого порядка, записав уравнения (41)–(44) в виде системы из пяти нелинейных уравнений.

$$\frac{dX}{d\xi} = A(X) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{dx_1}{d\xi} \\ \frac{dx_2}{d\xi} \\ \frac{dx_3}{d\xi} \\ \frac{dx_4}{d\xi} \\ \frac{dx_5}{d\xi} \\ \frac{dx_6}{d\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_4 \\ x_5 \\ -2x_1 \\ x_1^2 - x_2^2 + x_3x_2 \\ 2x_0x_1 + x_4x_2 \\ -2x_0x_2 + 2x_3 \end{pmatrix}.$$

Здесь

$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} = \{F, G, H, F', G', P\}$ – вектор состояния,

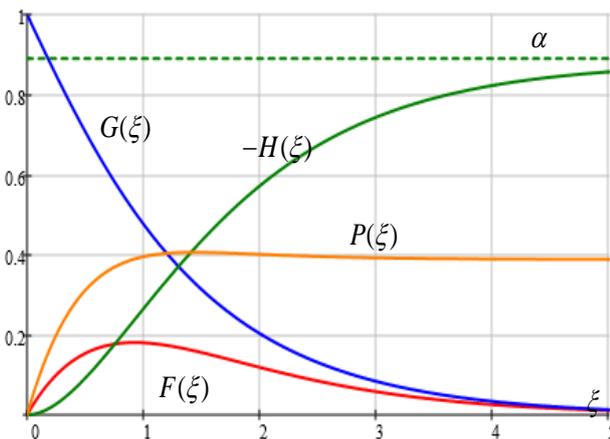


График распределения скоростей показывает относительный вклад компонент скорости по высоте
 velocity distribution graph shows relative contribution of velocity components with respect to height

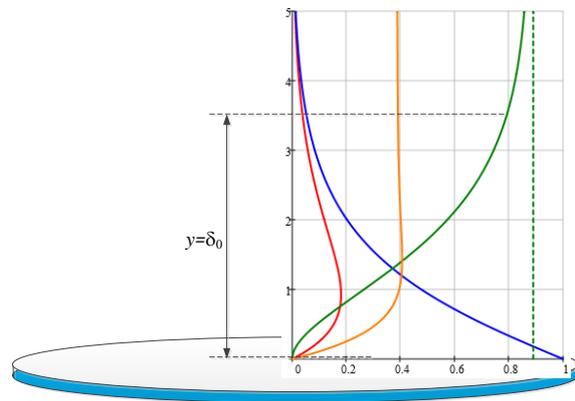
a/a

$$A(X) = \begin{pmatrix} x_4 \\ x_5 \\ -2x_1 \\ x_1^2 - x_2^2 + x_3x_2 \\ 2x_0x_1 + x_4x_2 \\ -2x_0x_2 + 2x_3 \end{pmatrix}.$$

При решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений будем использовать начальные условия, определяемые уравнением (36) в виде $X_0 = \{F(0), G(0), H(0), F'(0), G'(0), P\} = \{0, 1, 0, a, b, 0\}$, получим решения $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} = \{F, G, H, F', G', P\}$. Здесь a, b – производные функций F', G' , выбраны таким образом, чтобы выполнялась непрерывность всех функций $\{F, G, H, F', G', P\}$, $a = 0,51, b = -0,616$. Эти коэффициенты выбираются методом стрельбы [22] для согласования условий (35) и (36). При расчетах получились следующие значения $A = 0,93, B = 1,21$.

Заметим, что полученные графики совпадают с асимптотическими значениями функций (45), (46). Это функции радиальной, азимутальной и вертикальной скоростей в зависимости от вертикальной координаты.

Из графика на рис. 11 видно, что можно провести условную границу – пороговое значение вертикальной координаты $\xi = \sqrt{\omega/\mu} \cdot y = 3,5$, или $y = \delta_0 = 3,5\sqrt{\mu/\omega}$. При значениях, больше порогового значения $y > \delta_0$, определяющей скоростью является вертикальная скорость – $v_y = \sqrt{\mu\omega}H(\xi)$. Радиальной – $v_r = r\omega F(\xi)$ и тангенциальной – $v_\varphi = r\omega G(\xi)$ скоростями можно пренебречь, а следовательно, функция концентрации частиц будет зависеть только от вертикальной составляющей координаты y .



Вертикальное представление графика распределения скоростей показывает относительный вклад компонент скорости по высоте

Vertical representation of a velocity distribution graph shows relative contribution of velocity components with respect to height

b/b

Рис. 11. График распределения скоростей и давления: а) горизонтальное; б) вертикальное представления
 Fig. 11. Velocity and pressure distribution graph: a) horizontal; b) vertical representation

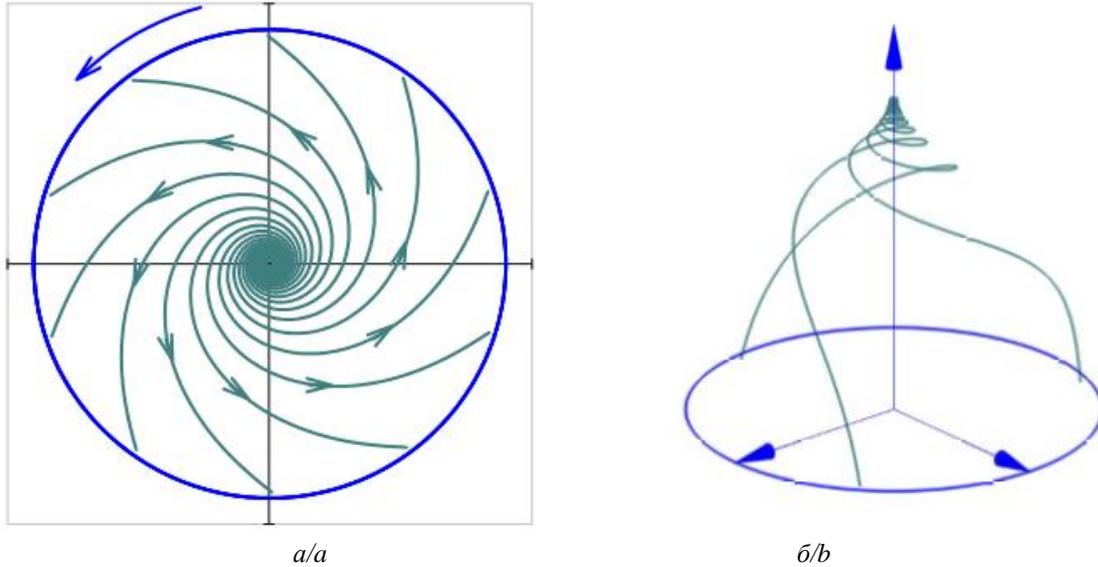


Рис. 12. а) поперечное распределение траекторий частиц жидкости; б) пространственное распределение траекторий частиц жидкости
Fig. 12. a) transverse distribution of trajectories of liquid particles; b) spatial distribution of trajectories of liquid particles

Для координат вертикальной оси, меньших порогового значения $y < \delta_0$, доминирующую роль начинает играть тангенциальная составляющая $v_\varphi = r\omega G(\xi)$. Следовательно, умножая значение квадрата скорости $v_\varphi = r\omega G(\xi)$ на массу частицы, можно определить энергию частицы.

$$E = \frac{mv_\varphi^2}{2} = \frac{r^2\omega^2 G(\xi)^2 m}{2}.$$

Здесь в качестве $G(\xi)$ можно брать её аналитическое приближение (46)

$$G(\xi) = 1 + b\xi + \frac{1}{10} a\xi^2 = 1 - 0,616\xi + 0,051a\xi^2.$$

При известной функции распределения частиц по радиусам можно определить результирующую энергию дисперсной фазы по формуле:

$$E(r) = \frac{\omega^2 r^2 G(\xi_0)^2}{2} \frac{4}{3} \pi (\rho_b - \rho_{cp}) \int_{r_{sp}=r_{min}}^{r_{max}} f(r) r^3 dr, \quad \xi_0 = \sqrt{\omega/\mu} \cdot \delta_0 = 3,5\sqrt{\omega/\mu}. \quad (47)$$

Свяжем элемент механического момента сопротивления диска с тангенциальной скоростью и скоростью вращения диска:

$$\begin{aligned} dM &= -2\pi r^2 \tilde{\mu} \frac{\partial v_\varphi}{\partial y} \Big|_{y=0} dr = \\ &= -2\pi r^2 \rho \mu \frac{d\xi}{dy} \frac{r\omega \partial G(\xi)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} dr = \\ &= -2\pi r^2 \rho \mu \frac{r\omega^{3/2} \partial G(\xi)}{v^{1/2} \partial \xi} \Big|_{\xi=0} dr, \end{aligned}$$

$$dM = -2\pi r^3 \rho \mu^{1/2} \omega^{3/2} G'(0) dr, \quad \tilde{\mu} = \rho \mu.$$

Здесь $\mu = \rho\nu$ – вязкость единицы объема.

Интегрируем последнее выражение по радиусу, получаем величину момента сопротивления диска:

$$\begin{aligned} M &= -2\pi \rho \mu^{1/2} \omega^{3/2} G'(0) \int_0^R r^3 dr = -\pi \rho \sqrt{\mu \omega^3} G'(0) \frac{R^4}{2} = \\ &= \pi \rho \sqrt{\mu \omega^3} 0,616 \frac{R^4}{2} = \rho \sqrt{\mu \omega^3} 0,968 R^4. \quad (48) \end{aligned}$$

Последнее выражение для момента сопротивления диска (48) содержит частоту вращения диска. Следовательно, зная частоту вращения диска, можно получить желаемую энергию частиц жидкости $E(r)$ (47). При соответствующем выборе энергии $E(r)$ и поверхностной энергии Гиббса G_s можно получить желаемый радиус капель квазимонодисперсной фазы.

Заключение

Авторами работы предложен механический метод седиментации, основанный на сведении полидисперсной среды в квазимонодисперсную среду с последующим воздействием ультразвуковой волны с соответствующей резонансной частотой с целью полного разрушения эмульсии.

Получена дифференциальная функция распределения скоростей по координатам и времени, показывающая, что эмульсия является более устойчивой при её мелкой дисперсности. Также показано, что для водонефтяных эмульсий процесс оседания частиц дисперсной фазы составляет от нескольких часов до суток.

Получена формула, позволяющая оценить минимальный радиус капли при известных температуре, давлении, плотностях сред и поверхностного натяжения между ними. Предложено ввести критерий, позволяющий определить близость дисперсной среды к квазимонодисперсной версии.

Удалось свести уравнения в частных производных Навье–Стокса, описывающих вращения диска в основании цилиндрического сосуда, к системе

обыкновенных дифференциальных уравнений, и получить компоненты скоростей и давления при известной скорости вращения диска, энергию частиц, связанную со скоростью вращения диска. Удалось определить механический момент сопротивления диска и связать его с энергией воздействия на эмульсию с целью получения её квазимонодисперсной версии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kale S.N., Deore S.L. Emulsion, micro emulsion and nano emulsion: a review // *Systematic Reviews in Pharmacy*. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 39–44.
2. Oil emulsions and the different recent demulsification techniques in the petroleum industry – a review / S.M. Abed, N.H. Abdurahman, R.M. Yunus, H.A. Abdulbari, S. Akbari // *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 702. – 012060.
3. Akbari N., Biria D. Investigation of the activity of *Acinetobacter calcoaceticus* biodemulsifier to break stable water in oil emulsions // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 6. – P. 4144–4150.
4. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry / R. Zolfaghari, A. Fakhru'l-Razi, L.C. Abdullah, S.S.E.H. Elnashaie, A. Pendashteh // *Separation and Purification Technology*. – 2016. – Vol. 170. – P. 377–408.
5. Oil-in-water separation with graphene-based nanocomposite membranes for produced water treatment / A. Alammar, S.H. Park, C.J. Williams, B. Derby, G. Szekely // *Journal of Membrane Science*. – 2020. – Vol. 603. – 118007.
6. Applying ultrasonic fields to separate water contained in medium-gravity crude oil emulsions and determining crude oil adhesion coefficients / A. Sadatshojaie, D.A. Wood, S.M. Jokar, M.R. Rahimpour // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – Vol. 70. – 105303.
7. Water-in-oil emulsions separation using an ultrasonic standing wave coalescence chamber / C.M.G. Atehortúa, N. Pérez, M.A.B. Andrade, L.O.V. Pereira, J.C. Adamowski // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – Vol. 57. – P. 51–61.
8. Ultrasonic assisted ultrafiltration process for emulsification of oil field produced water treatment / A. Agi, R. Junin, A.Y.M. Alqatta, A. Gbadamosi, A. Yahya, A. Abbas // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – Vol. 51. – P. 214–222.
9. Ultrasonic assisted ultrafiltration process for emulsification of oilfield produced water treatment / A. Agi, R. Junin, A.Y.M. Alqatta, A. Gbadamosi, A. Yahya, A. Abbas // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – Vol. 51. – P. 214–222.
10. Повышение производительности скважин с помощью акустических преобразователей шума / Ю.А. Савиных, Ю.А. Медведев, Х.Н. Музилов, А.Е. Алтунин // *Нефтепромысловое дело*. – 2003. – № 10. – С. 30–32.
11. Филипас А.А., Исаев Ю.Н., Кучман А.В. Определение резонансных частот шаровой капли масляной среде // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 178–185.
12. Автоматизированная система для проведения экспресс-анализа дисперсного состава скважинной жидкости / А.А. Филипас, А.В. Мигель, Ю.Н. Исаев, В.В. Курганов // XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Томский политехнический университет, 2021. – С. 469–470.
13. Сычёв В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики. – М.: МЭИ, 2010. – 252 с.
14. Сычёв В.В. Сложные термодинамические системы. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 252 с.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – Т. VI. – 734 с.
16. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика. Статистическая физика. Кинетика. – М.: Физматлит, 1977. – 552 с.
17. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 713 с.
18. Слэзкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 521 с.
19. Дмитриев А.В. Основы статистической физики материалов. – М.: Наука, 2004. – 668 с.
20. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматлит, 1959. – 700 с.
21. Седов Л.И. Механика сплошных сред. – М.: Наука, 1970. – Т. I. – 492 с.
22. Формалев В.Ф., Резников Д.Л. Численные методы. – М.: Физматлит, 2006. – 400 с.

Информация об авторах

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. filipas@tpu.ru

Алёна Владимировна Кучман, аспирант отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. avm82@tpu.ru

Юсуп Ниязбекович Исаев, доктор физико-математических наук, профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. isaev@tpu.ru

Поступила в редакцию: 12.02.2024

Поступила после рецензирования: 20.03.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Emulsion, micro emulsion and nano emulsion: a review. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 39–44.
2. Abed S.M., Abdurahman N.H., Yunus R.M., Abdulbari H.A., Akbari S. Oil emulsions and the different recent demulsification techniques in the petroleum industry: a review. *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 702, 012060.
3. Akbari N., Biria D. Investigation of the activity of *Acinetobacter calcoaceticus* biodemulsifier to break stable water in oil emulsions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, pp. 4144–4150.
4. Zolfaghari R., Fakhru'l-Razi A., Abdullah L.C., Elnashaie S.S.E.H., Pendashteh A. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry. *Separation and Purification Technology*, 2016, vol. 170, pp. 377–408.
5. Alammam A., Park, S.H., Williams C.J., Derby, B., Szekely G. Oil-in-water separation with graphene-based nanocomposite membranes for produced water treatment. *Journal of Membrane Science*, 2020, vol. 603, 118007.
6. Sadatshojaie A., Wood D.A., Jokar S.M., Rahimpour M.R. Applying ultrasonic fields to separate water contained in medium-gravity crude oil emulsions and determining crude oil adhesion coefficients. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 70, 105303.
7. Atehortúa C.M.G., Pérez N., Andrade M.A.B., Pereira L.O.V., Adamowski J.C. Water-in-oil emulsions separation using an ultrasonic standing wave coalescence chamber. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 57, pp. 51–61.
8. Aryafard E., Farsi M., Rahimpour M.R. Modeling and simulation of crude oil desalting in an industrial plant considering mixing valve and electrostatic drum. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015, vol. 95, pp. 383–389.
9. Agi A., Junin R., Alqatta A.Y.M., Gbadamosi A., Yahya A., Abbas A., Ultrasonic assisted ultrafiltration process for emulsification of oil field produced water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 51, pp. 214–222.
10. Savinyh Yu.A., Medvedev Yu.A., Muzipov H.N., Altunin A.E. Increasing well productivity using acoustic noise converters. *Neftepromyslovoe delo*, 2003, no. 10, pp. 30–32. (In Russ.)
11. Filipas A.A. Isaev Yu.N., Kuchman A.V. Determination of the resonant frequencies of a global water drop in oil medium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 175–185. (In Russ.)
12. Filipas A.A., Migel A.V., Isaev Yu.N., Kurganov V.V. Automated system for express analysis of the dispersed composition of well fluid. *XVIII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2021. pp. 469–470. (In Russ.)
13. Sychev V.V. *Differential equations of thermodynamics*. Moscow, MPEI Publ., 2010. 250 p. (In Russ.)
14. Sychev V.V. *Complex thermodynamic systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 207 p. (In Russ.)
15. Landau L.D., Lifshic E.M. *Theoretical physics. Vol. 6. Hydrodynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 733 p. (In Russ.)
16. Rumer Yu.B., Ryzkin M.Sh. *Thermodynamics, statistical physics and kinetics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1977. 552 p. (In Russ.)
17. Shlihting G. *Boundary layer theory*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 713 p. (In Russ.)
18. Slyozkin N.A. *Dynamics of a viscous incompressible fluid*. Moscow, GITTL Publ., 1955. 521 p. (In Russ.)
19. Dmitriev A.V. *Fundamentals of statistical physics of materials*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 668 p. (In Russ.)
20. Levich V.G. *Physico-chemical hydrodynamics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1959. 700 p. (In Russ.)
21. Sedov L.I. *Continuum mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1970. Vol. 1, 492 p. (In Russ.)
22. Formalev V.F., Reznikov D.L. *Numerical methods*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 400 p. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. filipas@tpu.ru

Alyona V. Kuchman, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. avm82@tpu.ru

Yusup N. Isaev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. isaev_yusup@mail.ru

Received: 12.02.2024

Revised: 20.03.2024

Accepted: 26.04.2024

УДК 553.08:553.21/24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Теллуру-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан)

А.Н. Николаева✉, А.К. Мазуров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Аннотация. Как известно, Рудный Алтай является классической провинцией колчеданных месторождений, большая часть которых сформирована в палеоостроводужных геодинамических обстановках. Колчеданные руды имеют сложный и разнообразный химический состав, включающий в себя широкий спектр примесных элементов, среди которых до сих пор остаются слабоизученными металлоид теллур и металл висмут. На основании вышеизложенного, в колчеданных рудах Малеевского месторождения, приуроченного к Зырянскому узлу Рудного Алтая, нами была исследована теллуру-висмутовая минерализация. **Актуальность** исследования обусловлена дефицитом информации о характере распределения и формах нахождения данного вида редких полезных ископаемых в рудах колчеданных месторождений Рудного Алтая. Полученные данные настоящего исследования позволят обеспечить более комплексную переработку и использование минерально-сырьевых ресурсов. **Цель:** дать характеристику вещественному составу руд; выявить особенности развития теллуру-висмутовой минерализации и определить условия ее формирования; оценить перспективы на попутную добычу и извлечение теллура с висмутом из руд колчеданных месторождений Рудного Алтая. **Объектом** исследования является теллуру-висмутовая минерализация колчеданных руд месторождения. **Методы:** петрографический, минераграфический и минералогический анализы, сканирующая электронная микроскопия в сочетании с рентгеноспектральным микроанализом и рамановская спектроскопия. **Результаты.** В рудах выявлено многообразие теллуру-висмутовой минерализации, фиксирующейся в качестве самостоятельных минералов, представленных сульфосолями, теллуридами, оксидами и самородными формами выделения. Впервые для данных руд обнаружены такие минералы, как плюмботеллурит $PbTeO_3$, цервеллеит Ag_4TeS , ксиллингоит $Pb_3Bi_2S_6$ и неидентифицированный минерал с обобщенной формулой $PbAg_2Te$. Минералы теллуру-висмутового состава по отношению к главным рудным минералам характеризуются более поздней кристаллизацией в Ag-Te-Bi-сульфидную ассоциацию рудной стадии при температуре 280...150 °С. На основании полученных данных спрогнозированы перспективы добычи теллура и висмута из руд месторождений, аналогичных по вещественному составу с Малеевским месторождением и приуроченных к одноименному Зырянскому рудному узлу.

Ключевые слова: теллур, висмут, колчеданные руды, Восточный Казахстан, Рудный Алтай, месторождение Малеевское

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Государственного задания «Наука № FSSWW-2023-0010».

Для цитирования: Николаева А.Н., Мазуров А.К. Теллуру-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 233–250. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636

UDC 53.08:553.21./24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636

Tellurium-bismuth mineralization in ores of the Maleevskoe pyrite deposit (Eastern Kazakhstan)

A.N. Nikolaeva✉, A.K. Mazurov

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Abstract. As it is known, Rudny Altai is a classic province of sulfide deposits, most of which were formed in paleo-island-arc geodynamic settings. Pyrite ores have a complex and diverse chemical composition, including a wide range of impurity elements, among which the metalloid tellurium and the metal bismuth still remain poorly studied. Based on the above, we investigated tellurium-bismuth mineralization in the sulfide ores of the Maleevskoe deposit, confined to the Zyryanovsky cluster of Rudny Altai. **Relevance.** The lack of information about the nature of the distribution and forms of occurrence of this type of rare minerals in the ores of pyrite deposits of Rudny Altai. The data obtained from this study will allow for more comprehensive processing and use of mineral resources. **Aim.** To characterize the material composition of ores; identify the features of the development of tellurium-bismuth mineralization and determine the conditions for its formation; assess the prospects for associated mining and extraction of tellurium with bismuth from the ores of sulfide deposits of Rudny Altai. **Object.** Tellurium-bismuth mineralization of sulfide ores of the deposit. **Methods.** Petrographic, mineragraphic and mineralogical analyses, scanning electron microscopy in combination with X-ray microanalysis and Raman spectroscopy. **Results.** The ores revealed a variety of tellurium-bismuth mineralization, which is recorded as independent minerals, represented by sulfosalts, tellurides, oxides, and native forms of isolation. Such minerals as plumbotellurite $PbTeO_3$, cervelleite Ag_4TeS , xilingoite $Pb_3Bi_2S_6$ and an unidentified mineral with the general formula $PbAg_2Te$ were discovered for these ores. Minerals of tellurium-bismuth composition in relation to the main ore minerals are characterized by later crystallization into the Ag-Te-Bi-sulfide association of the ore stage at a temperature of 280...150°C. Based on the data obtained, the authors predicted the prospects for tellurium and bismuth extraction from ores of deposits similar in material composition to the Maleevskoe deposit and confined to the ore cluster of the same name.

Keywords: tellurium, bismuth, pyrite ores, Eastern Kazakhstan, Rudny Altai, Maleevskoe deposit

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the State assignment «Science no FSSWW-2023-0010».

For citation: Nikolaeva A.N., Mazurov A.K. Tellurium-bismuth mineralization in the ores of the Maleevskoe pyrite deposit (Eastern Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 233–250. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636

Введение

Рудный Алтай является одной из крупнейших колчеданосных провинций мира, в казахстанской ее части обнаружены наиболее крупные месторождения меди, свинца и цинка (Ридер-Сокольское, Тишинское, Зырянское, Малеевское, Белоусовское, Николаевское, Артемовское, Орловское и др.). Огромный вклад в изучение колчеданных месторождений Алтая внесли работы В.В. Авдониной, Д.Г. Ажгирея, В.Д. Баранова, Х.А. Беспяева, Н.Л. Бубличенко, А.А. Ганженко, Д.И. Горжевского, Б.А. Дьячкова, П.Ф. Иванкина, А.К. Каюпова, О.А. Ковриго, М.С. Козлова, И.В. Крейтер, В.С. Кузбнова, Н.М. Митряевой, В.А. Наумова, В.П. Нехорошева, И.В. Покровской, Э.С. Пономарева, В.И. Старостина, В.М. Чекалина, М.А. Юдовской, Г.Н. Щербы, Г.Ф. Яковлева, И.В. Гаськова и многих других.

Строение Рудного Алтая, по последним геологическим и геофизическим данным [1–14], представлено в следующем виде (с северо-востока на юго-запад): Белоубинско-Сарымсакты-Куртинская, Змеиногорско-Зырянско-Конденунская, Алейско-Ашалинская, Прииртышская и Иртыш-Фуюнская зоны. В пределах Змеиногорско-Зырянско-Конденунской зоны выделены Синюхинская и Ревнюхинская круговые рудоносные зоны. Ревнюхинская структура отделена от Синюхинской массивами поздних гранитоидов Вышеивановского и Орловско-Черемшанского массивов. В целом структура представляет собой Ревнюхинскую брахиантиклиналь, осложненную поперечными складками второго порядка – Подорловской, Пригородной и

Зырянской. В ядре обнажены доэмские сланцы, а крылья сложены вулканогенно-терригенными толщами эмса – раннего живета, в которых сформировалось большое количество колчеданных проявлений и месторождений, образующих такие рудные поля, как Греховское, Зырянское, Малеевско-Путинцевское, Боготыревско-Осочихинское и др.

Рудная минерализация в пределах рудного Алтая проявлялась в течение докембрийского, каледонского и герцинского циклов. Промышленные колчеданно-полиметаллические месторождения (с золотом и серебром) Малеевско-Путинцевского рудного поля сформировались в герцинском цикле позднеэфельского (малеевского) стратоевровня. Большинство исследователей (Г.Н. Щерба, Б.А. Дьячков, А.М. Мысник, Н.И. Стучевский, Н.П. Майорова и др.) считают, что развитие рудных объектов происходило в островодужной обстановке, сформированной на континентальной коре [6–17].

Малеевское месторождение известно с 1840 г., но промышленное значение получило в 1979 г. в связи с обнаружением Родниковой зоны, включающей более 70 % современных запасов месторождения. В изучении месторождения принимали участие Г.Н. Щерба, Х.А. Беспяев, Б.А. Дьячков, А.М. Мысник, Н.И. Стучевский, Г.Д. Ганженко и многие другие геологи производственных и научных организаций. Однако, несмотря на длительный период изучения месторождения, теллуризовисмутовая минерализация остается слабо изученной. В целях восполнения этого пробела нами было проведено данное научное исследование.

Материалы и методы исследования

Для изучения вещественного состава руд и пород использовались керновые и бороздовые пробы массой до трех килограммов, из которых были изготовлены шлифы, аншлифы и двуполированные пластины. Петрографический анализ проводился с целью изучения минерального состава и структурных особенностей исходных и метасоматически измененных пород на поляризационном микроскопе проходящего света Olympus BX53F. Для петрографических исследований было изготовлено более 40 прозрачных шлифов. С целью характеристики текстурно-структурных особенностей и вещественного состава руд было изготовлено около 100 полированных шлифов (аншлифов). Вначале их изучение проводилось на исследовательском микроскопе отраженного света Zeiss Imager 2m. Далее в целях детального освещения морфологии теллуру-висмутовой минерализации и ее взаимосвязи с другими минералами было проведено исследование аншлифов с использованием сканирующей электронной микроскопии на приборе Tescan Vega 3 SBU с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 50, позволяющим качественно оценить состав минералов, получить изображения поверхности руд с высоким пространственным разрешением (до 30 нм) и провести полуколичественное (качественное) определение элементов от Na до U с содержанием от 0,1 до 100 мас. %. С целью расшифровки условий рудообразования на месторождении особое значение было уделено термобарогеохимическому методу изучения флюидных (газово-жидких) включений. Крио- и термометрические исследования были проведены с помощью термокамеры THMSG-600 с программным обеспечением LinkSys-32 производства Linkam. Прибор позволяет выполнить измерение фазовых переходов температуры в интервале от –200 до +600 °С.

При помощи рамановской спектроскопии изучался состав газовой фазы флюидных включений в кварце. Исследования выполнены на спектрометре комбинационного рассеяния с конфокальным микроскопом DXR2 Raman Microscope фирмы Thermo Fisher с полупроводниковым детектором и твердотельным лазером с длиной волны 785 нм и мощностью 10 мВт. Диаметр сфокусированного лазерного луча составляет 0,9 мкм.

Геологическое строение

Как было отмечено выше, Малеевское месторождение приурочено к северо-западному флангу Малеевско-Путинцевской антиклинали (рис. 1, б), осложняющей северное замыкание Ревнюшинской структуры [13–17].

Месторождение сложено туфами и туфобрекчиями ревношинской свиты среднего девона, кремнисто-глинистыми, углисто-глинистыми, известко-

во-глинистыми аргиллитами с прослоями и линзами мелкозернистых песчаников и рифтогенных известняков маслянской свиты среднего девона, алевролитами, аргиллитами, песчаниками хамирской свиты верхнего девона. В северо-восточной части месторождения девонские образования перекрываются аргиллитами и песчаниками быковской и порфиритоидами ларихинской свит нижнего карбона. В ядре северной части Ревнюшинской структуры залегают кварцевые и кварц-полевошпатовые порфиры Зыряновского верхнедевонского комплекса. В экзоконтакте массива порфиров залегают силообразные тела альбитофигов, относящиеся к этому же комплексу. На северо-западе структура ограничивается Щебнюшенским, а в южной части Парыгинским гранитоидными массивами Змеиногорского габбро-плагитогранит-гранитового комплекса средне-позднекарбонного комплекса [11, 12]. Руды месторождения представлены тремя межпластовыми залежами: на северо-востоке – Платовской, на юго-западе – Родниковой и в центре – Малеевской. Залежи включают 21 рудное тело лентовидной формы. Протяженность рудных тел по простиранию 50...500 м, по падению 20...100 м, и мощность 1...64 м. Главными рудными компонентами являются свинец, цинк и медь. Также в рудах отмечаются золото, серебро, кадмий, висмут, индий, селен, теллур, сурьма, мышьяк.

На протяжении длительного геологического развития породы рудного поля претерпели различные метаморфические изменения: региональный, динамометрический, контактовый и гидротермальный метаморфизм. В отличие от большинства месторождений Зыряновского горнорудного района, локализованных в интенсивно дислоцированных породах западных ответвлений Северо-Восточной зоны смятия, месторождение Малеевское, с запада, севера и юга прорванное гранитоидными массивами Змеиногорского комплекса, слабо затронуто динамометаморфическими процессами. Но при этом за счет становления этого самого комплекса широко проявились процессы контактового метаморфизма. Руды, метасоматиты и вмещающие породы подверглись в различной степени ороговикованию, интенсивность которого возрастает по мере приближения к контакту с гранитоидами в северо-западном направлении [18–20]. Под рудными телами за пределами гидротермально-измененных пород и внутри них сохранились также целые блоки ороговикованных кремнистых алевролитов и песчаников. Наиболее развитыми роговоиковыми минералами пород являются биотит, кордиерит, андалузит, актинолит. Мощность ороговикованных пород достигает 150...250 м. В кровле надрудных порфиров практически по всем скважинам наблюдаются зоны скарнирования.

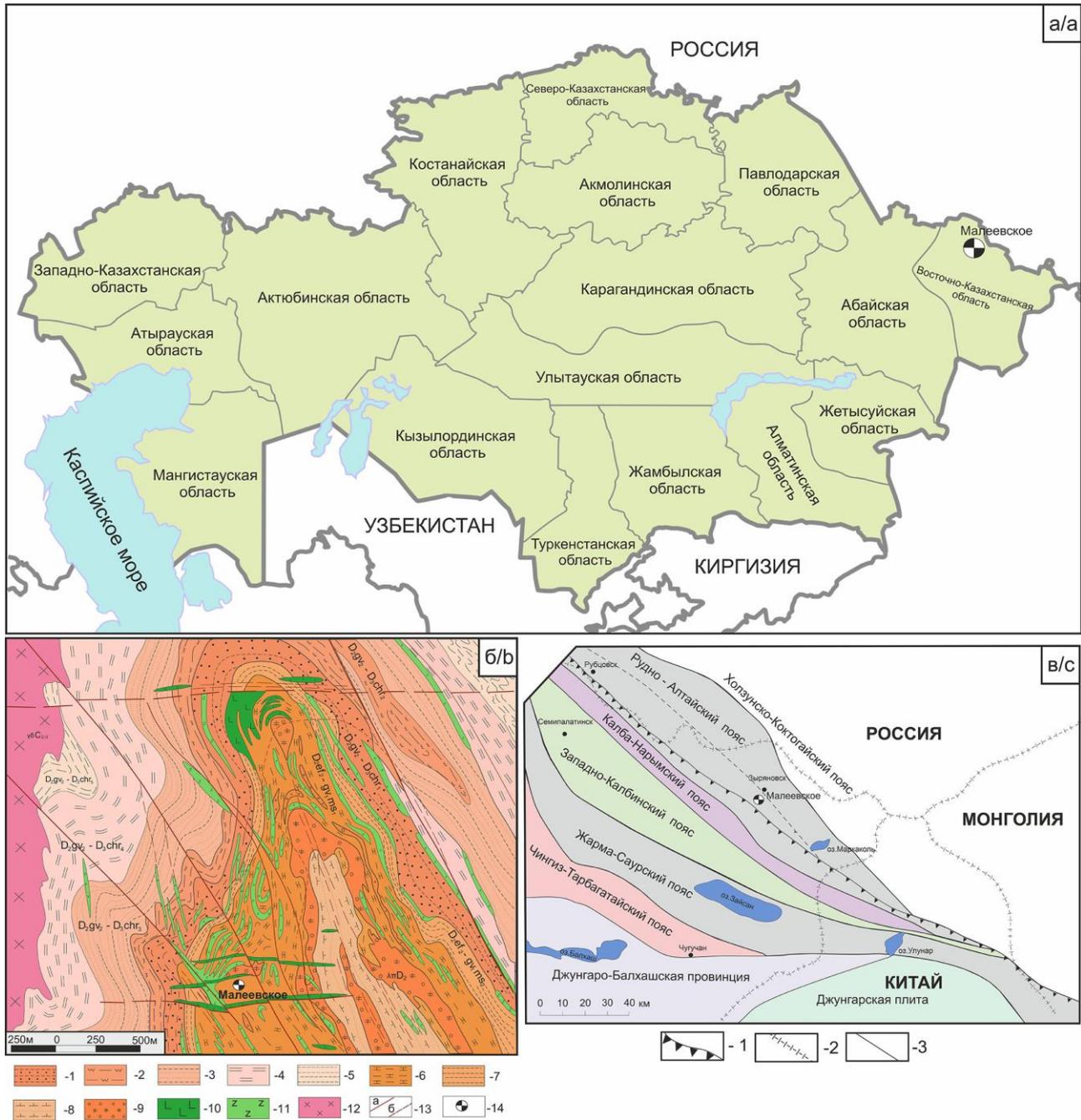


Рис. 1. а) географическое расположение месторождения; б) геологическая карта Малеевско-Путинцевского рудного поля [5]. Условные обозначения: 1–5 – Средний девон. Хамирская свита: 1 – песчаники; 2 – аргиллиты; 3 – глины, алевролиты, песчаники; 4 – глины, алевролиты; 5 – песчаники, аргиллиты; 6, 7 – Средний девон. Маслянская свита: 6 – алевролиты; 7 – известковый алевролит; 8–11 – Субвулканические среднедевонские образования: 8 – туфопесчаники; 9 – порфиры; 10 – габбро, габбро-диориты; 11 – габбро-порфиры; 12 – Интрузивные образования: плагиограниты, гранодиориты; 13 – линии разломов; 14 – месторождение Малеевское; в) схема размещения рудных поясов Большого Алтая. Условные обозначения: 1 – Иртыш-Маркакольский глубинный разлом, 2 – государственные границы, 3 – границы металлогенических поясов

Fig. 1. а) geographical location of the deposit; б) geological map of the Maleevsko-Putincevskoye ore field [5]. Legend: 1–5 – Middle Devonian. Khamir Formation: 1 – sandstones; 2 – mudstones; 3 – clays, siltstones, sandstones; 4 – clays, siltstones; 5 – sandstones, mudstones; 6, 7 – Middle Devonian. Maslyanskaya formation: 6 – siltstones; 7 – calcareous siltstone; 8–11 – Subvolcanic Middle Devonian formations: 8 – tuff sandstones; 9 – porphyry; 10 – gabbro, gabbro-diorites; 11 – gabbro-porphry; 12 – Intrusive formations: plagiogranites, granodiorites; 13 – fault line; 14 – Maleevskoe deposit; в) layout of the Great Altai ore belts. Legend: 1 – Irtysh-Markakol deep fault, 2 – external boundary, 3 – boundary of metallogenic belts

В преобладающем объеме в рудных зонах отмечаются кварциты и микрокварциты, образованные в результате метаморфизма песчаников (рис. 2, а). В пределах рудных залежей формируется парагенетическая ассоциация метаморфогенных сульфидов и сульфосолей.

Метасоматические образования широко развиты по зонам, контролируемым секущими и межслоевыми разрывными структурами. Обычно это жиллообразные или штокверковые тела измененных пород, представленные пропилитами и березитоидами [18–23]. Оруденение при этом приурочено пространственно к березитоидам, относящимся к стадии выщелачивания.

Формация пропилитов (дорудных метасоматитов) представлена скрыто-мелко-тонкозернистыми

породами с присутствием такого характерного минерала для данной группы, как хлорит, и малым содержанием кальцита, кварца и пирита. Протолитами являются эффузивные породы основного и кислого состава. Для пород характерны массивные, плотные, полосчатые или пятнистые текстуры. При петрографическом описании отмечаются лепидогранобластовые микроструктуры с элементами порфиробластовой. Обычно большая часть объема пропилита характеризуется перекристаллизованной массой, сложенной кварц-хлоритовыми или кальцит-хлоритовыми агрегатами. На фоне мелкозернистой массы нередко отмечаются порфиробласты сульфида размером в диапазоне 0,1...0,5 мм, находящиеся весьма часто в ассоциации с кальцитом.

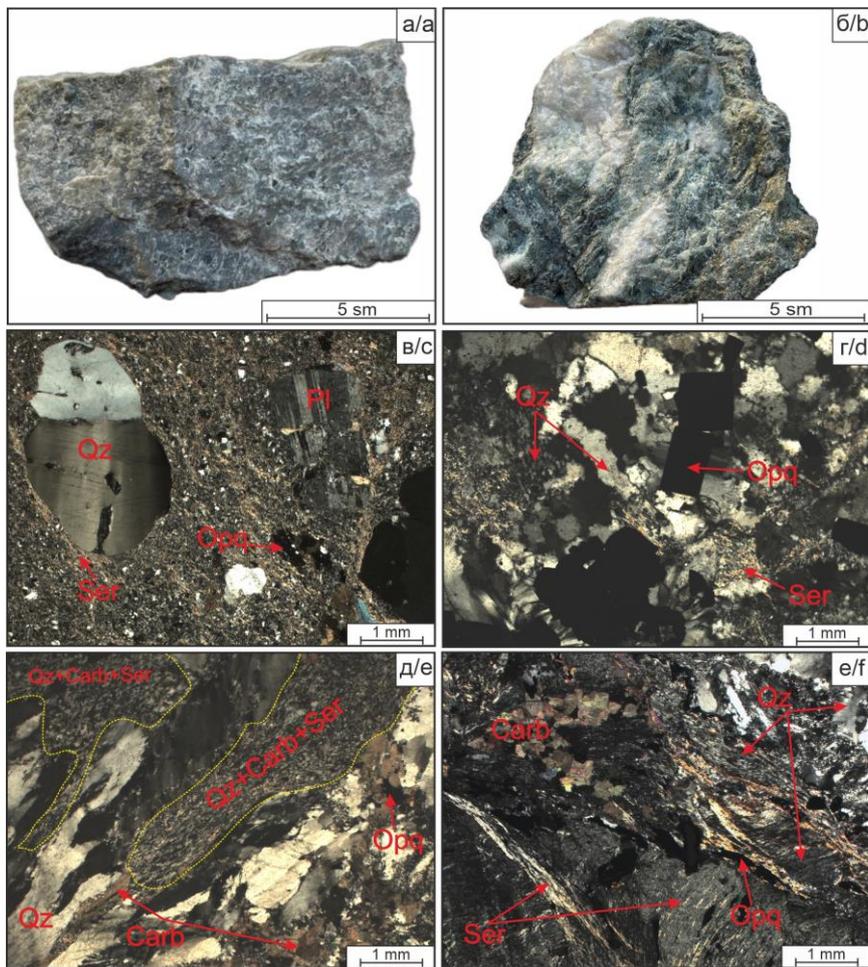


Рис. 2. а) кварцит, образованный в результате метаморфизма песчаников; б) кальцит-серицит-кварцевый метасоматит (березитоида); в–е) метасоматически-измененные породы в шлифах на поляризационном микроскопе в скрещенных николях: в) бластопорфировые включения кварца в основной массе серицит-кварцевого метасоматита по риолиту; г) обрастание изометричных зерен рудного минерала пламенивидным кварцем; д) фрагмент однонаправленных прожилков кварцевого состава с пламенивидной и гетеробластовой микроструктурой; е) зона смятия, проявленная в результате процессов регионального динамометаморфизма

Fig. 2. a) quartzite, formed as a result of sandstone metamorphism; b) calcite-sericite-quartz metasomatite (beresitoid); c–e) metasomatically altered rocks in thin sections on a polarizing microscope in crossed nicols: c) blastoporphyritic quartz inclusions in the groundmass of sericite-quartz metasomatite after rhyolite; d) fouling of isometric grains of ore mineral with flame-like quartz; e) fragment of unidirectional veinlets of quartz composition with flame-like and heteroblastic microstructure; e) shear zone, manifested as a result of processes of regional dynamometamorphism

Основными минералами группы березитоидов (предрудных метасоматитов) является кварц, серицит, кальцит, мусковит, пирит. При этом наиболее распространенным продуктом является светлая слюда (мусковит и его мелкочешуйчатая разновидность, представленная серицитом). Породы мелкозернистые, за счет неравномерного распределения кварца, пирита и серицита характеризуют пятнистую текстуру. В шлифах, помимо лепидо-грано-гетеробластовых микроструктур, спорадически наблюдаются гломеробластовые (срастания сульфидов в виде порфиробластов и пламеневидных агрегатов кварца (рис. 2, в)) и бластопорфиновые (обособленные округлые порфиновые агрегаты кварца (рис. 2, з)). Рудная минерализация характеризуется изометричными зернами пирита размером в среднем 0,15 мм, создающими неоднократно гнездовые скопления. Также сульфид спорадически представлен крупными зернами размером до 25 мм. Зачастую в шлифах встречаются прожилки (рис. 2, д) и просечки кварцевого и кальцит-кварцевого состава, характеризующиеся неравномерной мощностью и линейностью (прерывистостью по длине). В прожилках кварц образует гетеро-гранобластовую или пламеневидную микроструктуры. На основании разнообразия форм выделения основных минералов группы березитоидов предположено, что ее формирование протекало не в одну стадию. Также сделан вывод, что по геологическим масштабам времени предрудные метасоматиты образуются раньше руд.

Результаты исследования и их обсуждение **Тектурно-структурные особенности руд** **и их вещественный состав**

Руды Малеевского месторождения формировались под влиянием многих факторов: особенностей кристаллизации рудного вещества, седиментации, диагенеза, а также последующих процессов внедрения гидротерм (часто взрывчатого характера), последующего метасоматоза и тектонической обстановки региона. В результате чего рудные залежи характеризуются главным образом рудами сплошного (сливного) и вкрапленного типа. Верхняя граница оруденения в большинстве случаев четкая и определяется контрастностью сплошных сульфидов. В редких случаях над сплошными рудами отмечаются маломощные вкрапленные ореолы сульфидизации [5]. Основные качественные различия типов руд отмечаются в количественных соотношениях главных ценных компонентов. Главные рудные минералы месторождения представлены пиритом, сфалеритом, халькопиритом и галенитом, второстепенные – арсенопиритом, тетраэдритом, молибденитом. Часть минералов цветных металлов находится в очень тесных взаимных срастаниях друг с другом.

По текстурно-структурным особенностям колчеданные руды были разделены нами на сплошные (сливные) и вкрапленные.

Сплошной (сливной) тип руд доминирует на месторождении (рис. 3, а–д), а за счет присутствия нескольких ценных компонентов (Pb, Zn, Cu) руды данного типа являются полиметаллическими.

Данный тип руды отличается наибольшим разнообразием текстурно-структурных параметров, чем вкрапленные. Для них характерны массивная, слабослоистая, метасоматически-полосчатая и пятнистая текстуры. Массивная текстура является наиболее распространенной и характеризуется однородным строением с практически равномерным распределением в пространстве рудных минералов. Часто данная текстура сочетается с пятнистой, которая разнообразна по своим морфологическим особенностям, а также сложна по минеральному составу и деталям строения. Для рудных минералов встречаются такие структуры, как гипидио-аллотрио-идиоморфнозернистые. Микроструктуры сплошных руд характеризуются как субграфическая (тесное срастание галенита, сфалерита и халькопирита), эмульсионновидная, интерстициальная, псевдоморфная, реликтовая, обломочная, коллоидная, цементационная (цементация зерен пирита халькопиритом (рис. 3, а) и сфалеритом) и структура тесного срастания. По крупности зерен структура минеральных образований тяготеет к мелко-среднезернистой (рис. 3, б). Размеры минеральных агрегатов варьируют в диапазоне 0,01...1,65 мм, нередко отмечаются включения пирита величиной до 4 мм. Морфология зерен преимущественно изометричная, реже неправильная.

В целом сплошные руды колчеданного типа отличаются высоким содержанием сульфидов – до 90...95 % объема от основной массы (рис. 3, а–в). Распределение минералов в руде неравномерное. Главной минеральной ассоциацией сульфидов является *пирит±халькопирит*, суммарно составляющие 70...85 % объема рудной массы.

Обычно в составе сульфидов пирит и халькопирит находятся в равных количественных соотношениях, но нередко встречается преобладание халькопирита, который может занимать до 55...65 % объема руды (рис. 3, а), а иногда, наоборот, пирита. Менее распространены такие сульфиды, как галенит и сфалерит, намного реже встречаются тетраэдрит и арсенопирит.

Халькопирит обычно является «цементатом» других сульфидов и характеризует, в свою очередь, цементационную микроструктуру (рис. 3, б), часто заполняет трещины пирита, который представлен изометричными зернами кубического, пентагондодикаэдрического, реже октаэдрического габитусов. Обычно в руде встречаются неравномерные скопления зерен пирита, нередко раздробленных или трещиноватых. Зачастую наблюдается, что данные трещины

«залечивает» халькопирит (рис. 3, д). Спорадически в пирите диагностируются не только включения халькопирита, но и сфалерита, образующие, в свою очередь, псевдоморфозы. Сульфид цинка в сплошных рудах представлен тонковкрапленными ксеноморфными выделениями в халькопирите (рис. 3, в). Галенит, присутствующий в качестве мелких включений, является поздним минералом и накладывается на более ранние ассоциации сульфидов (рис. 3, в), представленные сфалеритом и халькопиритом. Нередко сульфид свинца заполняет трещины или пустоты в пирите, тем самым образуя неправильные и проволочковидные формы выделения. От общего объема рудной массы на его долю приходится 1...5%. Арсенипирит в рудах характеризуется двумя генерациями, представленными зернистыми (рис. 3, з) и эмульсионными формами выделения. Второй тип является более распространенным. Минерал находится в парагенетической ассоциации с пиритом и халькопиритом. Тетраэдрит, развивающийся обычно по пустотам и трещинам в пирите с халькопиритом (рис. 3, з), спорадически находится в парагенетической ассоциации с галенитом, образуя неправильные выделения размером до 85 мкм. Диагностированный молибденит имеет малую долю распространения в рудах, характеризуется неправильными формами выделения и развивается по пустотам в пирите с халькопиритом или же заполняет промежутки между ними.

Нерудные минералы в сплошных рудах представлены кварцем, баритом и кальцитом. Их количество не превышает 5% объема руд. Обычно преобладает кварц, представленный в виде просечек, не выдержанных по мощности, или изометричных и неправильных зерен размером от 0,05 до 0,3 мм.

При изучении руд на сканирующем электронном микроскопе в качестве редких и очень редких минералов в сплошных рудах были диагностированы: самородное золото Au, электрум AuAg, рутил TiO_2 , ильменит $FeTiO_3$, касситерит SnO_2 , циркон $ZrSiO_4$, фаматинит Cu_3SbS_4 , фрейбергит $Ag_6Cu_4Fe_2Sb_4S_{13}$, изоклейкит $(Pb_{27}(Cu,Fe)_2(Sb,Bi)_{19}S_{57})$, самородный висмут Bi, строкаит Bi_3TeS_2 , гессит Ag_2Te , ксиллингоит $Pb_3Bi_2S_6$, монацит $(La, Ce, Nd) PO_4$ и рабдофан $(Ce, La) PO_4 \cdot nH_2O$.

Вкрапленные руды характеризуются преобладанием нерудного вещества над рудным: до 40...45% сложены сульфидами и до 55...60% нерудными минералами (рис. 3, е–з). Сульфидная минерализация представлена сфалеритом, пиритом, халькопиритом и галенитом. Распределение их крайне неравномерное. Среди сульфидов преобладают пирит и сфалерит, суммарно занимая до 70...85% объема рудной массы. Нерудные минералы представлены кварцем и кальцитом. Преобладающим минералом при этом является кварц (рис. 3, е), слагающий не только основную массу, но и зачастую образующий просечки и прожилки.

Для руд данного типа отмечается вкрапленная, массивная, полосчато-слоистая и пятнистая текстуры. Вкрапленная и пятнистая текстуры являются доминирующими, характеризуются неправильными и прерывистыми скоплениями рудных минералов среди массы нерудных (рис. 3, е, ж). Обычно с данными текстурами совмещается также массивная, представленная неоднородным строением, выраженный в неравномерном распределении в пространстве рудообразующих минералов. По крупности зерен структура минеральных образований размерами от 0,01 до 2 мм характеризуется мелко-среднезернистой. Преобладающие структуры в рудах неравномерно- и равномернозернистая, обломочная, а также структура дробления. Неоднократно наблюдаются вкрапленные руды с характерной катакластической (брекчиевой) структурой, характеризующейся обломками раздробленного пиритового агрегата, сцементированного кварцем (рис. 3, е, ж) и кальцитом. Микроструктуры представлены субграфической, цементационной, решетчатой, псевдоморфной и эмульсионной.

Пирит во вкрапленных рудах представлен эвгедральными зернами кубического, пентагондодекаэдрического, реже октаэдрического габитуса. Зачастую по зернам сульфида наблюдаются следы динамометаморфизма, характеризующиеся разрушением вкрапленников и образованием систем разноориентированных трещин (рис. 3, ж). Включения пирита обнаружены как в свободном виде в кварце, так и в сростании с халькопиритом, сфалеритом и галенитом. Во втором случае обычно сфалерит и халькопирит цементируют зерна пирита или залечивают трещины и пустоты в нем. В меньшем объеме, по сравнению с пиритом, во вкрапленных рудах диагностированы халькопирит и сфалерит, представленные колломорфными и неправильными выделениями. Нередко два этих сульфида образуют парагенетическую ассоциацию (рис. 3, з), наблюдаются случаи наложения эмульсионновидного халькопирита по сфалериту и также сфалерита по халькопириту. Достаточно часто сфалерит и халькопирит образуют структуру тесного сростания (рис. 3, в). В парагенетической ассоциации с данными сульфидами в малом объеме отмечается галенит, характеризующийся ксеноморфными агрегатами. В виде единичных включений в рудах диагностирован тетраэдрит, представленный малыми по размерам и неправильными по форме включениями. При изучении руд на сканирующем электронном микроскопе в качестве редких минералов во вкрапленных рудах были диагностированы: самородное золото Au, электрум AuAg, рутил TiO_2 , циркон $ZrSiO_4$, монацит $(La, Ce, Nd) PO_4$, рабдофан $(Ce, La) PO_4 \cdot nH_2O$, гессит Ag_2Te , цервеллеит Ag_4TeS , алтаит $PbTe$, пломботеллуриит $PbTeO_3$, барит $BaSO_4$.

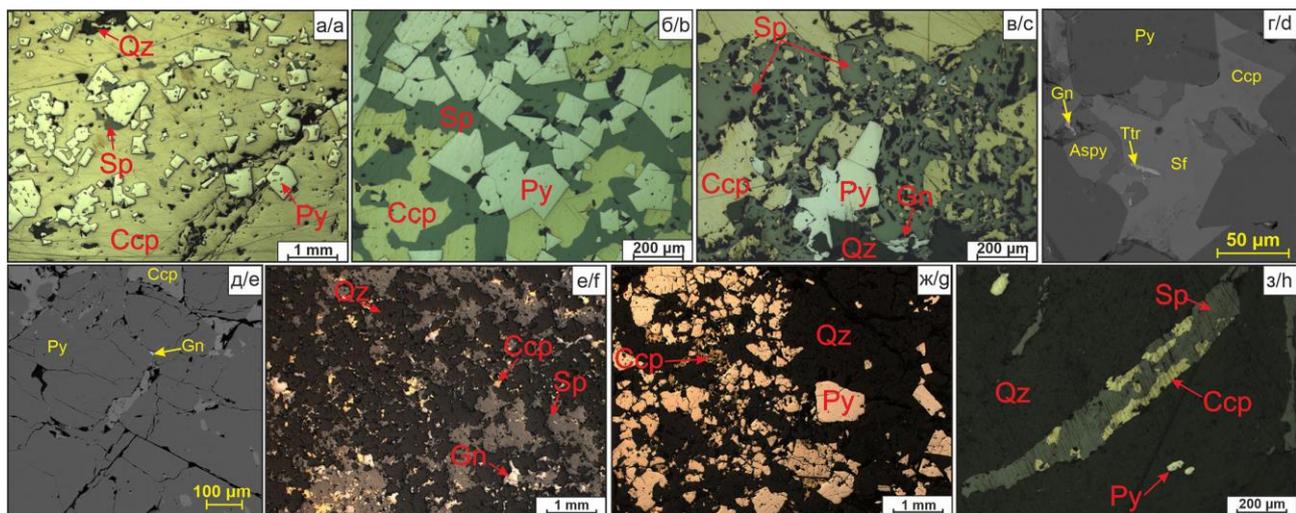


Рис. 3. а–д) микрофотографии сплошных руд: а) цементация халькопиритом зерен пирита; б) изометричные зерна пирита, сцементированные сфалерит-халькопиритовой массой; в) структура тесного срастания сфалерита и халькопирита; г) включения вытянутого зерна тетраэдрита и неправильных агрегатов арсенопирита; д) заполнение трещин в пирите халькопиритом; е–з) вкрапленные руды: е) фрагмент аншлифа, демонстрирующий преобладание нерудного материала над рудным; ж) катаклазированные зерна пирита в основной массе; з) парагенетическая ассоциация сфалерита и халькопирита

Fig. 3. a–d) microphotographs of solid ores: a) cementation of pyrite grains with chalcopyrite; b) isometric pyrite grains cemented by sphalerite-chalcopyrite mass; c) structure of close intergrowth of sphalerite and chalcopyrite; d) inclusions of elongated tetrahedrite grains and irregular arsenopyrite aggregates; e) filling of cracks in pyrite with chalcopyrite; e–h) disseminated ores: f) polished section fragment demonstrating the predominance of non-metallic material over ore material; g) cataclased pyrite grains in the groundmass; h) paragenetic association of sphalerite and chalcopyrite

Таблица 1. Минеральный состав первичных руд месторождения Малеевское

Table 1. Mineral composition of primary ores of the Maleevskoe deposit

Главные Main	Второстепенные Minor	Редкие Rare	Очень редкие Very rare
Рудные минералы/Ore minerals			
Пирит/Pyrite FeS Халькопирит Chalcopyrite CuFeS Сфалерит/Sphalerite ZnS Галенит/Galena PbS	Рутил/Rutile TiO ₂ Арсенопирит/Arsenopyrite FeAsS Молибденит/Molybdenite MoS ₂ Тетраэдрит/Tetrahedrite (Cu, Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	Золото/Gold Au Электрум/Electrum AuAg Гессит/Hessite Ag ₂ Te Алтаит/Altaite PbTe Ильменит/Ilmenite FeTiO ₃ Касситерит/Cassiterite SnO ₂ Изоклейкит/Izoklakeite (Pb ₂₇ (Cu, Fe) ₂ (Sb, Bi) ₁₉ S ₅₇) Самородный висмут Native bismuth Bi Сстрокаит/Sztrokayite Bi ₃ TeS ₂	Циркон/Zircon ZrSiO ₄ Фаматинит/Famatinite Cu ₃ SbS ₄ Фрейбергит/Freybergite Ag ₆ Cu ₄ Fe ₂ Sb ₄ S ₁₃ Цервеллеит/Cervellite* Ag ₄ TeS Ксилингоит/Xilingoite* Pb ₃ Bi ₂ S ₆ Плюмботеллуриит Plumbotellurite* PbTeO ₃ Фаза PbAg ₂ Te/PbAg ₂ Te phase*
Нерудные минералы/Nonmetallic minerals			
Кварц/Quartz SiO ₂ Серицит/Sericite KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ Кальцит/Calcite CaCO ₃	Барит/Barite BaSO ₄	Монацит/Monazite (La, Ce, Nd) PO ₄ Рабдофан/Rhabdofan (Ce, La) PO ₄ *H ₂ O	Цеолиты/Zeolites Me _{2/n} OAl ₂ O ₃ xSiO ₂ yH ₂ O Угlistое вещество (кероген) Carbonaceous matter (kerogen)

Примечание: * – минералы, диагностированные впервые. Формулы соответствуют теоретическому составу минералов.
 Note: * – minerals diagnosed for the first time. The formulas correspond to the theoretical composition of minerals.

Оруденение Малеевского месторождения эпигенетическое, гидротермально-метасоматическое. Руды характеризуются своей сложностью и поликомпонентностью, за счет чего в них выделены главные, второстепенные, редкие и очень редкие минералы. Минеральный состав первичных (гипогенных) руд представлен в табл. 1.

Теллуру-висмутовая минерализация

В колчеданных рудах месторождения Малеевское в качестве редких и очень редких минералов (табл. 1) выявлен обширный список минералов теллуру-висмутового состава, среди которых отмечаются изоклейкит (Pb₂₇(Cu, Fe)₂(Sb, Bi)₁₉S₅₇), алтаит (PbTe), самородный висмут (Bi), гессит (Ag₂Te), строкаит (Bi₃TeS₂) [20, 23, 24].

Таблица 2. Усредненные формульные коэффициенты теллуру-висмутовых минералов месторождения Малеевское (где n – количество спектров, по которым было высчитано среднее значение)

Table 2. Averaged formula coefficients of tellurium-bismuth minerals from the Maleevskoe deposit (where n is the number of spectra from which the average value was calculated)

Минерал и его теоретическая формула Mineral and its theoretical formula	n	Te	Bi	S	Cu	Fe	Sb	O	Ag	Pb
Алтаит/Altaite (PbTe)	10	1,00	-	-	-	-	-	-	-	0,97
Плюмботеллурид/Plumbotellurite (PbTeO ₃)	10	1,00	-	-	-	-	-	2,82	-	0,99
Гессит/Hessite (Ag ₂ Te)	10	1,00	-	-	-	-	-	-	1,98	-
Цервеллеит/Cervellite (Ag ₄ TeS)	10	1,06	-	1,00	-	-	-	-	4,21	-
Сстрокаит/Sztrokayite (Bi ₃ TeS ₂)	10	1,12	3,17	2,00	-	-	-	-	-	-
Ксилингоит/Xilingoite (Pb ₃ Bi ₂ S ₆)	10	-	2,09	6,00	-	-	-	-	-	3,18
Изоклейкит/Izoklakeite (Pb ₂₇ (Cu,Fe) ₂ (Sb,Bi) ₁₉ S ₅₇)	10	-	7,94	57,00	1,54	0,49	10,99	-	-	27,14
Минеральная фаза/Mineral phase (Pb Ag ₂ Te)	5	1,00	-	-	-	-	-	-	1,52	0,96

Впервые в рудах нами были обнаружены такие минералы, как цервеллеит (Ag₄TeS), плюмботеллурид (PbTeO₃), ксилингоит (Pb₃Bi₂S₆), а также неидентифицированный минерал с обобщенной минеральной формулой PbAg₂Te. В табл. 2 представлены усредненные формульные коэффициенты минералов, которые рассчитаны по химическому составу, определенному с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega3 Tescan с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 50.

До 63,6 % объема Te-Bi минерализации, представленной изоклейкитом, самородным висмутом, сстрокаитом, гесситом, ксилингоитом и минеральной фазой PbAg₂Te, приурочено к сплошному типу оруденения. Вкрапленный тип оруденения содержит в себе до 36,4 % выявленных минеральных агрегатов Te-Bi состава, представленных гесситом, цервеллеитом, алтаитом и плюмботеллуритом. Для минералов отмечается многообразие форм их выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам, в преобладающем объеме к пириту и халькопириту [25–35].

Изоклейкит (Pb₂₇(Cu, Fe)₂(Sb, Bi)₁₉S₅₇) является первым по распространенности минералом Te-Bi минерализации, относится к минеральному виду сурьмяно-висмутосодержащих сульфосолей свинца с соотношениями Bi/Sb в составе близкими к единице. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 52,76...53,36; S – 16,98...17,45; Bi – 15,13...15,93; Sb – 12,51...12,73; Cu – 0,78...1,01; Fe – 0,15...0,55 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 52,99 %, S – 17,31 %, Bi – 15,84 %, Sb – 12,69 %, Cu – 0,96 %, Fe – 0,21 %. В качестве примеси отмечаются Ag (0,9...5,85 %), Zn (до 0,4...1,44 %) и единично Se (0,77...0,98 %). Изоклейкит диагностирован в сплошных рудах в виде вытянутых агрегатов неправильных форм с соотношением длины и ширины 1,5:1 или 2:1, где длина варьирует от 15 до 150 мкм, при этом средний размер составляет 100 мкм. Обычно минерал кристаллизуется в пустотах халькопирит-

пиритовой и халькопирит-сфалерит-пиритовой массы (рис. 4, а), а также развивается в виде эмульсионных включений по тетраэдриту, при этом в последнем случае происходит распад твердого раствора. При данных обстоятельствах его агрегаты неправильных форм и уплощенные. Помимо обособленных выделений изоклейкита, отмечается его парагенезис с тетраэдритом, фрейбергитом, галенитом, а также с самородным висмутом. Ассоциация *изоклейкит+фрейбергит+галенит+тетраэдрит* встречается весьма редко. Обычно фрейбергит, галенит и изоклейкит образуют неправильные сростания размером 70...100 мкм, приуроченные к трещинам и пустотам в пирите. В тесном парагенезисе с изоклейкитом также наблюдается самородный висмут, характеризующий прорастание сульфосоли свинца [24]. В данном случае висмут представлен в виде ламелевидных включений в изоклейките, размер которого составляет 40...60 мкм.

Самородный висмут (Bi), являющийся вторым минералом по распространенности среди Te-Bi минерализации, приурочен исключительно к сплошному типу оруденения. Самородный металл сложен на 96,56...100 % Bi, в качестве примесей в редких случаях отмечаются следы Sb, достигающие в объеме 3,44 %. Так как минерал диагностирован в тесном парагенезисе с изоклейкитом, это и объясняет примесь сурьмы. Агрегаты минерала достаточно плотные, образуют ламели и неравномерные графические вкрапления (вкрапления) в изоклейките (рис. 4, б). Присутствие самородного висмута в изоклейките можно интерпретировать как распад твердого раствора. Кристаллическая структура их достаточно схожа, поэтому по сростанию данных минералов можно судить не только о распаде и замещении, но и об одновременном образовании простой временной последовательности самородного висмута и изоклейкита. Парагенетическая ассоциация упомянутых минералов приурочена к матрице пирита, арсенипирита и халькопирита. Спорадически также отмечается парагенетическая ассоциация *самородный висмут+изоклейкит+*

фрейбергит+тетраэдрит. Сконцентрированы данные образования обычно в пустотах пирита, арсенопирита, реже халькопирита или в интерстициях между данными сульфидами.

Гессит (Ag_2Te) – третий по распространенности минерал среди теллуру-висмутовой минерализации. Обнаружен в рудах как сплошного типа, так и вкрапленного, при этом в последнем наблюдается в большем объеме. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Ag – 61,25...63,00; Te – 36,43...37,99 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Ag – 62,84 %, Te – 37,16 %. В качестве примеси спорадически отмечается Pb в объеме 0,39...0,67 %. Обычно теллурид серебра представлен зернистыми, угловатыми агрегатами неправильных форм, заключенными в пустотах и трещинах халькопирита (рис. 4, в) и пирита, иногда отмечается частичное заполнение гесситом границ данных минералов. Размер микророзерен в среднем составляет 5...9 мкм. Часто теллурид серебра находится в парагенетической ассоциации с галенитом, за счет чего наблюдаются их различные формы сростания. Как известно [26, 27], данный халькогенид обычно формируется в результате гидротермальных низкотемпературных процессов на заключительных стадиях рудообразования. Приуроченность этого минерала к контактовым зонам пирита с халькопиритом и трещинам подтверждает данное положение и свидетельствует о его поздней кристаллизации.

Алтаит ($PbTe$) является четвертым по распространенности минералом среди Te-Bi минерализации в рудах месторождения, диагностирован исключительно во вкрапленном типе оруденения. Минерал представлен теллуридом свинца из группы галенита, формирующимся в условиях гидротермального среднетемпературного процесса минералообразования в качестве позднего (послесульфидного) минерала. Концентрации главных минералообразующих элементов в алтаите изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 60,23...62,18; Te – 36,03...39,44 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 61,89 %, Te – 38,11 %. Среди примесей спорадически отмечается Ag в количестве 1,39 %, а также Fe – 0,83 %. Минералами-хозяевами алтаита являются пирит (рис. 4, з) и халькопирит. При этом сам теллурид свинца обычно выполняет пустоты и микротрещины. Алтаит имеет неправильные угловатые формы зерен размером 0,5...1,5 мкм. Часто наблюдается парагенетическая связь данного минерала с гесситом (Ag_2Te), что свидетельствует о принадлежности их к общей минеральной ассоциации.

Сстрокаит (Bi_3TeS_2), сложный халькогенид висмута и теллура группы тетрадимита, является пятым по распространенности минералом среди

Te-Bi минерализации, выявленным исключительно в рудах сплошного типа. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 75,66...77,03; Te – 14,77...16,71; S – 6,52...7,88 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 76,58 %, Te – 15,59 %, S – 7,83 %. В качестве примесей диагностирован Se в количестве 1...2,03 %, а также Cu – 1...1,43 %. Более распространенными формами выделения являются уплощенные проволочковидные, образованные в результате заполнения трещин в пирите (рис. 4, д) и халькопирите, а также промежутков между данными минералами. Данные агрегаты достаточно уплощенные за счет стенок самих трещин. Чаще всего они частично заполняют пустоты, в результате чего не продолжительны по длине – от 4 до 10 мкм. Зерна неправильных и угловатых форм выявлены в меньшем объеме и обычно диагностируются по пустотам в халькопирите или по его периферии. Размер агрегатов варьирует в пределах 2,3...5,8 мкм. Зачастую отмечаются скопления неправильных агрегатов строкаита в халькопирите и на границе халькопирита с кварцем.

Цервеллеит (Ag_4TeS) является шестым по распространенности минералом. Благороднометалльный теллурид отмечается исключительно в рудах вкрапленного типа, где имеет весьма малую распространенность. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Ag – 71,87...73,14; Te – 21,48...22,01; S – 4,76...5,56 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Ag – 72,99 %, Te – 21,59 %; S – 5,42 %. В качестве примеси спорадически фиксируется Pb в объеме до 0,32...0,45 %. Цервеллеит представлен вытянутыми, слабопрямоугольными, амебоподобными, угловатыми зернами, приуроченными к пустотам и трещинам в пирите и халькопирите (рис. 4, е). При этом в пирите обычно отмечаются неравномерные скопления агрегатов данного минерала, а в халькопирите исключительно обособленные зерна. Размер включений варьирует в диапазоне 1,5...3,7 мкм. Приуроченность агрегатов данного минерала к пустотам и трещинам указывает на его позднюю кристаллизацию и, следовательно, приуроченность к более поздним стадиям рудообразования.

Ксилингоит ($Pb_3Bi_2S_6$) является седьмым минералом по распространенности среди Te-Bi минерализации, отмечается исключительно в сплошных рудах. Концентрации главных минералообразующих элементов сульфовисмута свинца изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 50,29...51,38; Bi – 33,16...34,24; S – 14,07...15,60 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 50,46 %, Bi – 33,93 %, S – 15,62 %. В качестве при-

меси единожды диагностирован Se в объеме 0,98 %. Обычно данный минерал заполняет трещины и пустоты в пирите и халькопирите или их интерстиции (рис. 4, ж). Агрегаты его анизометричные и уплощенные. Часто минерал заполняет частично пустое пространство, тем самым имеет неровные рваные края. Размер агрегатов в среднем составляет 35...55 мкм. Спорадически отмечается парагенетическая связь ксилингоита с изоклейки-том. На основании того, что сульфовисмут свинца формировался по пустотам и трещинам сделан вывод о кристаллизации его в более позднюю стадию образования по отношению к минералам-хозяевам.

Выявленный **плюмботеллурит ($PbTeO_3$)** представлен в виде псевдоморфозы по алтаиту. Минерал

слабо распространен во вкрапленных рудах. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 53,42...54,67; Te – 33,01...34,01; O – 11,05...12,51 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 54,13 %, Te – 33,33 %, O – 12,54 %. Примесей в минерале не обнаружено. Плюмботеллурит диагностирован в виде неправильных образований, приуроченных к таким минералам, как пирит и реже рутил. В рутиле, заключенном в пирите, минерал диагностируется обычно по его периферии в виде неправильных зерен размером до 2,6 мкм. Второй вариант отложения теллуридного минерала – заполнение пустот и трещин в пирите (рис. 4, з).

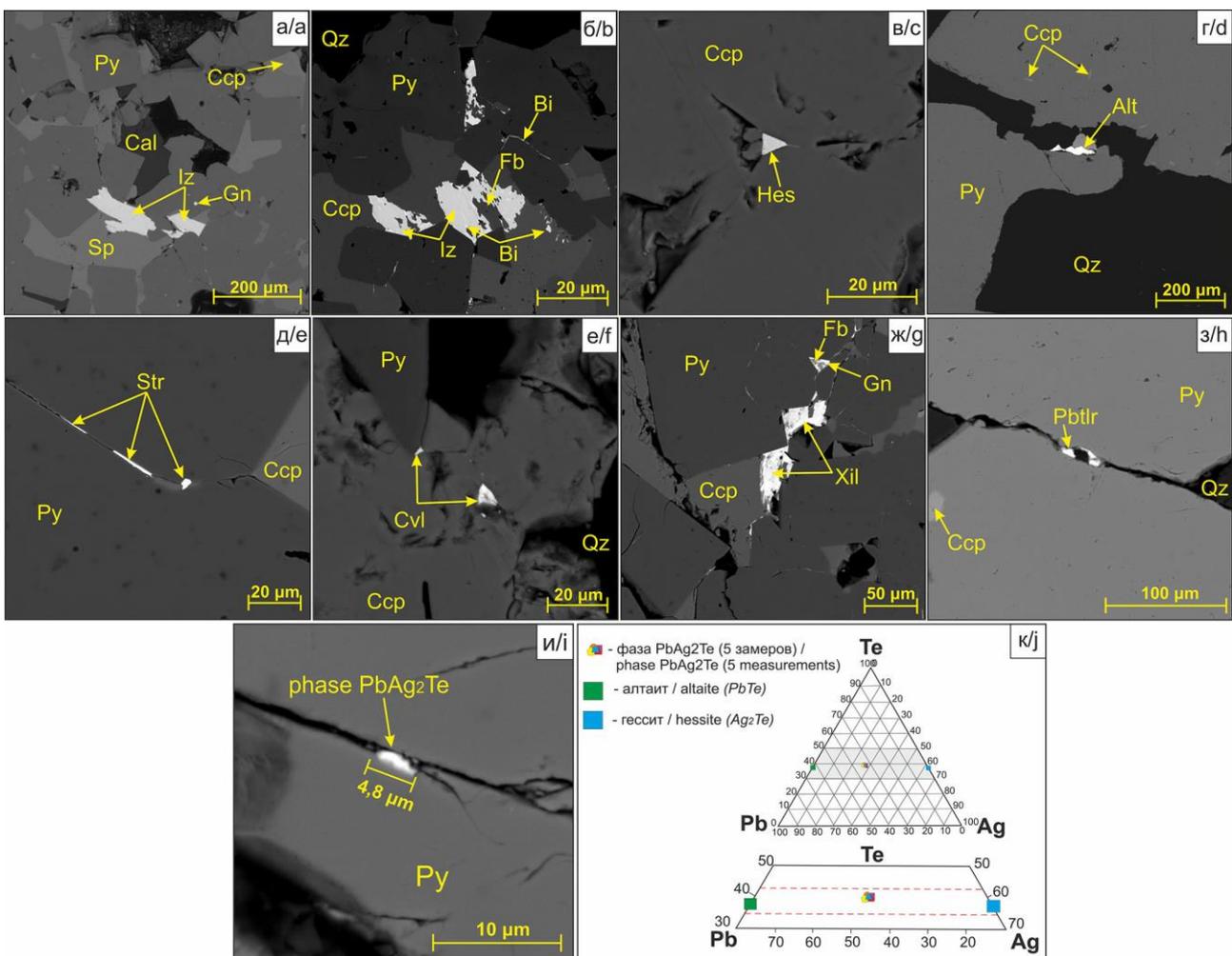


Рис. 4. Снимки руд со сканирующего электронного микроскопа в обратно-рассеянных электронах, демонстрирующие характер и размер выделений изоклейкита (а), самородного висмута (б), гессита (в), алтаита (г), сстрокаита (д), цервеллита (е), ксилингоита (ж), плюмботеллурита (з), неидентифицированного минерала с обобщенной формулой $PbAg_2Te$ (и) и тройная химическая диаграмма (к), иллюстрирующая состав неназванной минеральной фазы $PbAg_2Te$ в системе Pb-Te-Ag

Fig. 4. Images of ores from a scanning electron microscope in back-scattered electrons, demonstrating the nature of the isolation of izoklakeite (a), native bismuth (b), hessite (c), altaite (d), sztrokayite (e), cervellite (f), xilingoite (g), plumbotel-lurite (h), unidentified mineral with the general formula $PbAg_2Te$ (i) and ternary chemical diagram (j) illustrating the composition of the unnamed mineral phase $PbAg_2Te$ in the Pb-Te-Ag system

Агрегаты в данном случае имеют уплощенные, вытянутые и анизометричные формы. Контуры краев данных выделений обычно округлые либо извилистые за счет неровностей стенок самих трещин. По данным характеристикам можно сделать вывод, что минерал кристаллизовался позднее основных сульфидных минералов и отлагался из низкотемпературных растворов на последних стадиях рудообразования.

В процессе изучения сплошных руд было обнаружено единичное включение **неидентифицированного минерала с обобщенной формулой $PbAg_2Te$** . Концентрации главных минералообразующих элементов составили по результатам пяти замеров, мас. %: Ag – 33,54; Te – 26,02; Pb – 40,41. Включение минеральной фазы с видообразующей ролью Pb располагается в трещине пирита и образует вытянутое полуовальное зерно длиной 4,8 мкм (рис. 4, *и*). Система $PbAgTe$ выделена на основании предполагаемого парагенезиса фаз Pb–Te и Ag–Te, являющихся, по видимому, сростаниями алтаита $PbTe$ и гессита $AgTe_2$ (рис. 4, *к*). Данная минеральная фаза была обозначена нами как неидентифицированный минерал с обобщенной формулой $PbAg_2Te$ (табл. 2).

Условия образования теллуру-висмутовой минерализации

С целью реконструкции стадийности процесса рудообразования на месторождении и определения физико-химических условий формирования теллуру-висмутовой минерализации были проведены термобарогеохимические исследования газожидких включений в кварце.

По степени преобразованности Малеевское месторождение, аналогично таким месторождениями, как Ново-Лениногорское, Зырянское, Риддер-Сокольное и Николаевское, относится к слабо преобразованному типу с температурными пиками метаморфизма от 150 до 400 °С. Температурные условия изменения пород на месторождении, по результатам изучения минеральных парагенезисов И.В. Викентьевым [20], соответствуют условиям зеленосланцевой фации метаморфизма. На руды метаморфизм оказал ощутимое влияние, в результате чего они утратили метаколлоидный, тонкозернистый, колломорфный и брекчиевый облик вследствие перекристаллизации. Метаморфической ремобилизацией можно объяснить появление висмутовых минералов в рудах [20].

Опираясь на классификацию В.А. Кормушина [36], была выполнена типизация флюидных включений. По времени и способу образования выделены два класса включений [37, 38]: первичные и вторичные. Первичные (сингенетические) газожидкие включения (рис. 5, *а, в*), пространственно приуроченные к плоскостям граней роста кристалла кварца, локализуются обычно в виде одиночных

не ориентированных между собой включений. Реже образуют скопления включений с беспорядочным распределением. Форма полостей обычно характеризует неправильный, полигексогональный или округлый облики со средним размером 4...7 мкм. Вторичные (эпигенетические) включения (рис. 5, *б, з*) развиваются по постгенетическим трещинкам или в межзерновых пространствах агрегатов кварца. Данные мелкие включения характеризуются линейным расположением скоплений, причем при увеличении глубины резкости микроскопа отмечается приуроченность данных микроваколей к полостям залеченных трещин. Формы их обычно неправильные или каплевидные, а размер не превышает 1 мкм. Данные включения встречаются группами от 5 до 25 штук.

По фазовым соотношениям при комнатной температуре в пластинах выявлены два типа включений:

- преобладающие двухфазные ($Ж H_2O \pm MgCl_2 \pm NaCl + Г CO_2 \pm CH_4 \pm H_2S \pm SO_2$);
- однофазные ($Г CO_2 \pm CH_4 \pm H_2S \pm SO_2$ и $Ж H_2O \pm MgCl_2 \pm NaCl$).

Двухфазные включения характеризуются внутренней и внешней фазой. Внутренняя фаза представлена газом, а внешняя – жидким солевым раствором. Во включениях данного типа газовая фаза имеет как монокомпонентный (CO_2 , CH_4 , SO_2 , H_2S), так и поликомпонентный состав (смесь ранее перечисленных газов). О щелочном и субщелочном происхождении раствора свидетельствует небольшое присутствие CO_2 или полное его отсутствие в первичных включениях и интенсивное содержание в рудах [38, 39]. Двухфазный тип включений приурочен к первичной генерации, размер их варьирует в пределах 4...8 мкм.

Однофазные включения газового или жидкого типов имеют как светлую, так и темную окраску, а размер их не превышает 1...3 мкм. Обычно данный тип включений образует скопления в виде линейно-вытянутых цепочек, то есть относится к вторичной генерации.

По результатам исследований установлено, что температура кристаллизации эвтектики солевой системы составляет около –35,0 °С, что соответствует компонентному составу $MgCl_2-NaCl-H_2O$ и фазовому составу эвтектической смеси $MgCl_2 \cdot 12H_2O + NaCl \cdot 2H_2O + \text{лед}$. Таким образом, флюид имел хлоридный Mg-Na состав и соленость 7...16,1 мас. % экв. NaCl. Полученные данные сопоставляются с результатами, полученными в работах В.Ю. Прокофьева, М.А. Юдовской, И.В. Гаскова, Д.И. Горжевского [3, 23, 38, 39].

Давление гидротермальных растворов составляет 900...1000 атм, или 0,9...1 кбар [38]. Эти значения близки к расчетным данным по месторождению-аналогу Зырянскому [9, 23].

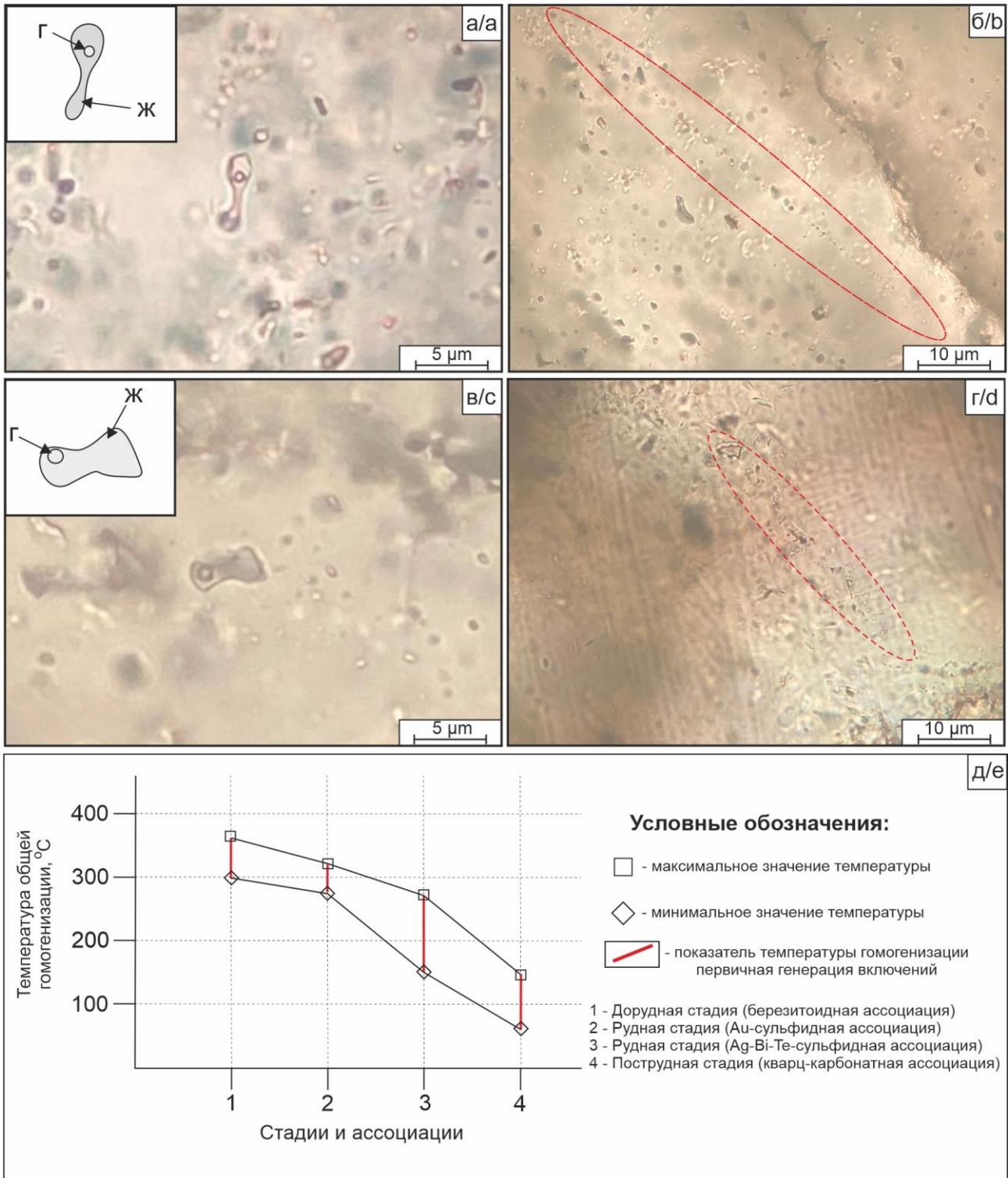


Рис. 5. а, в) двухфазное газово-жидкое включение (Г – газ, Ж – жидкость); б, г) вторичные включения; д) распределение крайних значений температур общей гомогенизации индивидуальных флюидных включений в кварце по стадиям и ассоциациям

Fig. 5. a, c) two-phase gas-liquid inclusion (Г – gas, Ж – liquid); b, d) secondary inclusions; e) distribution of extreme temperatures of general homogenization of individual fluid inclusions in quartz by stages and associations

Температура месторождения определена методом гомогенизации и эвтектики газовой-жидкой включений. Высокотемпературный гидротермальный процесс был длительным и проявился в три последовательные стадии минералобразования [40]: дорудную, рудную и пострудную (рис. 5, д).

В *дорудную стадию*, представленную березитовидной минеральной ассоциацией, происходило образование кварц-серицитовых, серицит-кварцевых и кальцит-серицит-кварцевых метасоматитов. На протяжении данной стадии отлагались кварц SiO_2 I генерации, кальцит CaCO_3 I генерации, серицит $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})$ и мусковит $\text{KA}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})$. На завершении стадии кристаллизовался пирит FeS_2 I генерации. Температурный диапазон минералообразования варьировал в рамках 360...305 °C. Давление флюида оценивается в интервале 1000...850 атм.

Рудная стадия представлена двумя минеральными ассоциациями: золото-сульфидной и серебро-висмут-теллурид-сульфидной. В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные минералы: пирит FeS_2 II генерации, арсенопирит FeAsS , халькопирит CuFeS_2 , сфалерит ZnS , галенит PbS , тетраэдрит $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$. Также кристаллизуются молибденит MoS_2 , фрайбергит $\text{Ag}_6\text{Cu}_4\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, фаматинит Cu_3SbS_4 и самородное золото Au . Среди нерудных минералов развиваются барит BaSO_4 , кварц SiO_2 и кальцит CaCO_3 II генерации. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляла 315...280 °C, а давление минералообразующего флюида равнялось 840...630 атм.

Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно *серебро-висмут-теллурид-сульфидную*, кристаллизовались пирит FeS_2 , галенит PbS и халькопирит CuFeS_2 III генерации. Сравнительно позже предполагается образование минералов теллуру-висмутного состава, представленных строкаитом Bi_3TeS_2 , ксилингоитом $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, изоклейкитом $(\text{Pb}_{27}(\text{Cu,Fe})_2(\text{Sb,Bi})_{19}\text{S}_{57})$, висмутом самородным Bi , гесситом Ag_2Te , цервеллеитом Ag_4TeS , алтаитом PbTe , плюмботеллуридом PbTeO_3 и минеральной неназванной фазой PbAg_2Te . Среди нерудных минералов отмечаются кварц SiO_2 , кальцит CaCO_3 и барит BaSO_4 . Температура минералообразования данной ассоциации составляла 280...150 °C, а давление – 615...400 атм.

Пострудная стадия, представленная карбонат-кварцевой минеральной ассоциацией, завершает этап минералообразования на месторождении. В преобладающем объеме на протяжении всей стадии наблюдается кварц SiO_2 IV генерации, и в ее заключении формируется кальцит CaCO_3 IV генерации. Температура образования пострудной стадии составляла менее 150 °C, а давление минералообразующего флюида варьировалось в диапазоне 380...205 атм.

Заключение

Полученные результаты демонстрируют сложность и разнообразие химического состава сплошных (сливных) и вкрапленных руд Малеевского месторождения.

В процессе детального исследования колчеданных руд было выявлено многообразие теллуру-висмутовой минерализации, фиксирующейся в виде самостоятельных минералов, представленных сульфидами, оксидами, сульфосолями, теллуридами и самородными формами выделения. Данные минералы представлены алтаитом PbTe , гесситом Ag_2Te , самородным висмутом Bi , строкаитом Bi_3TeS_2 , изоклейкитом $(\text{Pb}_{27}(\text{Cu,Fe})_2(\text{Sb,Bi})_{19}\text{S}_{57})$. Впервые в рудах нами были диагностированы цервеллеит Ag_4TeS , ксилингоит $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, плюмботеллурит PbTeO_3 и неидентифицированный минерал с обобщенной формулой PbAg_2Te . Большой объем теллуру-висмутовой минерализации сконцентрирован в рудах сплошного (сливного) типа. Для минералов отмечается многообразие форм их выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам. Взаимоотношения между основными рудными сульфидными минералами и минералами Te-Bi состава в рудах, а именно развитие их по трещинам, пустотам, периферии сульфидов или промежуткам между несколькими рудными агрегатами, указывает на то, что их отложение происходило на завершающих отрезках формирования руд. По результатам исследований сделан вывод, что минералы теллуру-висмутного состава формировались в заключительную серебро-висмут-теллурид-сульфидную ассоциацию рудной стадии при температурном диапазоне 350...201 °C и давлении 615...400 атм. Обилие в рудах самородного висмута и сульфидов висмута свидетельствует о низком химическом потенциале теллура в растворах и достаточно высоком потенциале серы.

Полученные результаты позволяют по-новому подойти к стратегии прогнозирования ресурсов минерального сырья колчеданных месторождений Зырянского горнорудного района [5–13]. Схожие вещественные характеристики руд месторождений Греховское, Снегиревское, Зырянское, Богатыревское, Осочихинское, Майско-Зырянское, Путинцевское, Парыгинское, Заводинское, Буктырминское с изученными рудами месторождения Малеевское позволяют спрогнозировать в них потенциал попутной добычи теллура и висмута.

Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных рудах месторождения Малеевское также дает возможность более точного регулирования технологических процессов и оптимизации качества конечного продукта, что, в свою очередь, повышает не только эффективность, но и рентабельность производства цветных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.В. Региональные палеотектонические факторы образования крупных полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40. – № 4. – С. 370–378.
2. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы): научная монография. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – 199 с.
3. Гаськов И.В. Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. – 2015. – № 2. – С.17–39.
4. Ложников С.С., Пантелеев С.В., Колмагорова Н.В. Практика обогащения руд Малеевского месторождения полиметаллического и медно-цинкового типа на обогатительной фабрике ЗГОК АО «Казцинк» // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. – № 3. – С.102–105.
5. Закономерности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений на примере месторождения Малеевское / А.П. Пяткова, М.А. Мизерная, А.П. Мирошникова, А.В. Пятков, М.П. Половко // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2018. – № 4 (82). – С. 32–38.
6. Мазуров А.К. Металлогеническое районирование Казахстана // Вестник Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 33–39.
7. Мазуров А.К. Геодинамические обстановки формирования металлогенических комплексов Казахстана: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 329 с.
8. Особенности геотектонического развития и рудоносности Южного Алтая (Восточный Казахстан) / Б.А. Дьячкова, А.Е. Бисатова, М.А. Мизерная, Н.А. Зимановская, Т.А. Ойцева, Б.Б. Амралинова, С.С. Айтбаева, О.Н. Кузьмина, Г.Б. Оразбекова // Геология рудных месторождений. – 2021. – Т. 63. – № 5. – С. 399–426.
9. Горжевский Д.И., Исакович И.З., Чекваидзе В.Б. Типы полиметаллических месторождений Рудного Алтая, их происхождение и методы поисков. – М.: Недра, 1977. – 197 с.
10. Попов В.В., Стучевский Н.И., Демин Ю.И. Полиметаллические месторождения Рудного Алтая / под ред. Н.И. Еремина. – М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 1995. – 414 с.
11. Большой Алтай (геология и металлогения). В 3 кн. Кн. 1. Геологическое строение / Г.Н. Щерба, Х.А. Беспаяв, Б.А. Дьячков и др. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
12. Большой Алтай (геология и металлогения). В 3 кн. Кн. 2. Металлогения / Г.Н. Щерба, Х.А. Беспаяв, Б.А. Дьячков и др. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
13. Дьячков Б.А., Титов Д.В., Сапаралиев Е.М. Рудные пояса Большого Алтая и оценка их перспектив // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 3. – С. 222–238.
14. Козлов М.С. Условия формирования Рудноалтайской металлогенической провинции // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 4. – С. 299–326.
15. Bacteria-driven fossil ecosystems as paleoindicators of active continental margins and the role of carbonate sediment-hosted vents in geodynamic reconstructions / L. Bujtor, I. Gyollai, M. Szhabo, I. Kovacs, M. Polgari // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – № 125. – P. 1–22.
16. Rabayrol F., Hart C.J.R. Petrogenetic and tectonic controls on magma fertility and the formation of post-subduction porphyry and epithermal mineralization along the late Cenozoic Anatolian Metallogenic Trend, Turkey // Mineralium Deposita. – 2020. – Vol. 56. – P. 279–306.
17. Космоструктурная модель Зырянского рудного района (Рудный Алтай) / Ю.С. Ананьев, А.А. Поцелуев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 24–31.
18. Болдырева Г.Ю. Метасоматические преобразования рудовмещающих пород зоны «Холодная» Малеевского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай): магистерская диссертация. – Томск, 2019. – 66 с.
19. Болдырева Г.Ю., Рожков В.В. Петрография вулканогенно-осадочного комплекса маслянской свиты на примере разреза зоны «Холодная» Малеевского месторождения (Восточный Казахстан) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сагаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина. – Томск, 8–12 апреля 2019. – Томск: Томск. политех. ун-т, 2019. – С. 85–86.
20. Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М.: Научный мир, 2004. – 344 с.
21. In situ trace elements and sulfur isotopes of sulfides in the Dabaiyang Te-Au deposit, Hebei Province, China: implications for Au remobilization from pyrite / Y. Zhang, S. Zhen, D. Wang, J. Liu, J. Wang, Z. Zha, H. Bai // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 140. – P. 1–16.
22. Linear correlations of gibbs free energy of REE phosphates (monazite, xenotime, and rhabdophane) and internally consistent binary mixing properties / R. Pan, A.P. Gysi, A. Migdisov, L. Gong, P. Lu, C. Zhu // Minerals. – 2024. – Vol. 14 (305). – P. 1–18.
23. Юдовская М.А. Минералого-геохимические особенности и условия формирования руд Малеевского месторождения на Рудном Алтае: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Усть-Каменогорск, 1984. – 209 с.
24. Гусева А.И., Гусев Н.И. Висмутовое оруденение Республики Алтай: типизация и прогнозная оценка // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 3 – С. 52–57.
25. Mineralogy Database. URL: <https://www.webmineral.com> (дата обращения 15.03.2024).
26. Ahmad M., Solomon M., Walshe J.L. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji // Economic Geology. – 1987. – Vol. 82. – P. 345–370.
27. Au-Ag-Te-rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaoqingling lead gold district, central China / W. Jian, J.W. Mao, B. Lehmann, N.J. Cook, G.Q. Xie, P. Liu, C. Duan, J. Alles, Z.J. Niu // Economic Geology. – 2021. – Vol. 116 (5). – P. 1239–1248.
28. Two-dimensional ferroelectricity in a single-element bismuth monolayer / J. Gou, H. Bai, X. Zhang, Y. Huang, S. Duan, A. Ariando, S. Yang, L. Chen, Y. Lu, A. Wee // Nature. – 2023. – Vol. 617. – P. 67–85.

29. The role of selenium and hydrocarbons in Au-Ag ore formation in the Rodnikovoe Low-Sulfidation (LS) epithermal deposit, Kamchatka Peninsula, Russia / N. Tolstykh, M. Shapovalova, E. Shaparenko, D. Bukhanova // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12 (1418). – P. 1–16.
30. Reversible thermochromic bismuth iodide enabled by self-adjustment / R. Wen, Y. Wang, X. Ma, Y. Yan, Q. Ma, J. Gao, H. Sun, H. Huang, Z. Gao // *Adv. Opt. Mater.* – 2023. – 11 (9). DOI: 10.1002/adom.202203148.
31. The Chah-Mesi epithermal Cu-Pb-Zn-(Ag-Au) deposit and its link to the Meiduk porphyry copper deposit, SE Iran: evidence from sulfosalt chemistry and fluid inclusions / F. Altenberger, J.G. Raith, R.J. Bakker, A. Zarasvandi // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 142. – 104732.
32. Warmada I.W., Lehmann B. Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia // *The Canadian Mineralogist*. – 2003 – Vol. 41. – P. 185–200.
33. The role of Te(IV) and Bi(III) chloride complexes in hydrothermal mass transfer: an X-ray absorption spectroscopic study / B.E. Etschmann, W. Liu, A. Pring, P.V. Grundler, B. Tooth, S. Borg, D. Testemale, D. Brewie, J. Brugger // *Chemical Geology*. – 2016. – Vol. 425. – P. 37–51.
34. Ciobanu C.L., Cook N.J., Spry P.G. Telluride and selenide minerals in gold deposits – How and why? // *Mineralogy and Petrology*. – 2006. – Vol. 87. – P. 163–169.
35. Speciation of aqueous tellurium(IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition / P.V. Grundler, J. Brugger, B.E. Etschmann, L. Helm, W. Liu, P.G. Spry, Y. Tian, D. Testemale, A. Pring // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – Vol. 120. – P. 298–325.
36. Кормушин В.А. Метод гомогенизации газовой-жидких включений в минералах / под ред. Н.Г. Сыромятникова. – Алма-Ата: Наука, 1982. – 72 с.
37. Плечов П.Ю. Методы исследования флюидных и расплавных включений. – М.: Изд-во «КДУ», 2014. – 268 с.
38. Наумов В.А., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Основные физико-химические параметры природных минералообразующих флюидов // *Геохимия*. – 2009. – № 8. – С. 825–851.
39. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений). – Новосибирск: Наука, 2000. – 186 с.
40. Золото в рудах золото-колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.К. Мазуров, А.Н. Николаева, М.А. Рудмин, Т.Ю. Якич, А.С. Рубан, Ш.Ж. Байболова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 78–88.

Информация об авторах

Анастасия Николаевна Николаева, инженер, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nikolaevaanastas759@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-9058-5048>
Алексей Карпович Мазуров, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. akm@tpu.ru

Поступила в редакцию: 27.03.2024

Поступила после рецензирования: 12.05.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

REFERENCES

1. Popov V.V. Regional paleotectonic factors in the formation of large polymetallic deposits of Rudny Altai. *Geology of ore deposits*, 1998, vol. 40, no. 4, pp. 370–378. (In Russ.)
2. Kontar E.S. *Geological and industrial types of deposits of copper, zinc, lead in the Urals (geological conditions of location, history of formation, prospects): scientific monograph*. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2013. 199 p. (In Russ.)
3. Gaskov I.V. Features of the development of sulfide ore-magmatic systems in island-arc environments of Rudny Altai and Southern Urals. *Lithosphere*, 2015, no. 2, pp. 17–39. (In Russ.)
4. Lozhnikov S.S., Pantelev S.V., Kolmagorova N.V. Practice of beneficiation of ores of the Maleevskoye deposit of polymetallic and copper-zinc type at the beneficiation plant of ZGOK JSC «Kazzinc». *News of universities. Mining magazine*, 2005, no. 3, pp. 102–105. (In Russ.)
5. Pyatkova A.P., Mizernaya M.A., Miroshnikova A.P., Pyatkov A.V., Polovko M.P. Patterns of formation of pyrite-polymetallic deposits using the example of the Maleevskoye deposit. *Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbaev*, 2018, no. 4 (82), pp. 32–38. (In Russ.)
6. Mazurov A.K. Metallogenic zoning of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 33–39. (In Russ.)
7. Mazurov A.K. *Geodynamic conditions of the formation of metallogenic complexes of Kazakhstan*. Dr. Diss. Tomsk, 2003. 329 p. (In Russ.)
8. Dyachkova B.A., Bisatova A.E., Mizernaya M.A., Zimanovskaya N.A., Oitseva T.A., Amralinova B.B., Aitbaeva S.S., Kuzmina O.N., Orazbekova G.B. Features of geotectonic development and ore content of Southern Altai (Eastern Kazakhstan). *Geology of ore deposits*, 2021, vol. 63, no. 5, pp. 399–426.
9. Gorzhovsky D.I., Isakov I.Z., Chekvaidze V.B. *Types of polymetallic deposits of Rudny Altai, their origin and search methods*. Moscow, Nedra Publ., 1977. 97 p. (In Russ.)

10. Popov V.V., Stuchevsky N.I., Demin Yu.I. *Polymetallic deposits of Rudny Altai*. Moscow, IGEM RAS Publ., 1995. 414 p. (In Russ.)
11. Shcherba G.N., Bespaev Kh.A., Dyachkov B.A. *Great Altai (geology and metallogeny)*. In three books. B. 1. Geological structure. Almaty, RIO VAK RK Publ., 2000. 400 p. (In Russ.)
12. Shcherba G.N., Bespaev Kh.A., Dyachkov B.A. and others. *Great Altai (geology and metallogeny)*. In three books. B. 2. Metallogeny. Almaty, RIO VAK RK Publ., 2000. 400 p. (In Russ.)
13. Dyachkov B.A., Titov D.V., Sapargaliev E.M. Ore belts of the Greater Altai and assessment of their prospects. *Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 3, pp. 222–238. (In Russ.)
14. Kozlov M.S. Conditions for the formation of the Rudno-Altai metallogenic province. *Geology of ore deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 299–326. (In Russ.)
15. Bujtor L., Gyollai I., Szhabo M., Kovacs I., Polgari M. Bacteria-driven fossil ecosystems as paleoindicators of active continental margins and the role of carbonate sediment-hosted vents in geodynamic reconstructions. *Minerals*, 2024. vol. 14, 125. pp. 1–22.
16. Rabayrol F., Hart C.J.R. Petrogenetic and tectonic controls on magma fertility and the formation of post-subduction porphyry and epithermal mineralization along the late Cenozoic Anatolian Metallogenic Trend, Turkey. *Mineralium Deposita*, 2020. vol. 56. pp. 279–306.
17. Ananyev Yu.S., Potseluev A.A., Zhitkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. Cosmostructural model of the Zyryanovsky ore district (Rudny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 24–31. (In Russ.)
18. Boldyreva G.Yu. *Metasomatic transformations of ore-hosting rocks of the «Kholodnaya» zone of the Maleevsky pyrite-polymetallic deposit (Rudny Altai)*. Master's dissertation. Tomsk, 2019. 66 p. (In Russ.)
19. Boldyreva G.Yu., Rozhkov V.V. Petrography of the volcanogenic-sedimentary complex of the Maslya Formation using the example of a section of the «Kholodnaya» zone of the Maleevskoye field (Eastern Kazakhstan). *Problems of geology and subsoil development. Proceedings of the XXIII International Symposium named after Academician M.A. Usov students and young scientists, dedicated to the 120th anniversary of the birth of Academician K.I. Satpayev, 120th anniversary of the birth of Professor K.V. Radugina*. Tomsk, April 8–12, 2019. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2019. pp. 85–86. (In Russ.)
20. Vikentyev I.V. *Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2004. 344 p. (In Russ.)
21. Zhang Y., S. Zhen, Wang D., Liu J., Wang J., Zha Z., Bai H. In situ trace elements and sulfur isotopes of sulfides in the Dabaiyang Te-Au deposit, Hebei Province, China: Implications for Au remobilization from pyrite. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 140, pp. 1–16.
22. Pan R., Gysi A.P., Migdisov A., Gong L., Lu P., Zhu C. Linear Correlations of Gibbs Free Energy of REE Phosphates (Monazite, Xenotime, and Rhabdophane) and Internally Consistent Binary Mixing Properties. *Minerals*, 2024, vol. 14, no. 305, pp. 1–18.
23. Yudovskaya M.A. *Mineralogical and geochemical features and conditions for the formation of ores of the Maleevsky deposit in Rudny Altai*. Cand. Diss. Ust-Kamenogorsk, 1984. 209 p. (In Russ.)
24. Guseva A.I., Gusev N.I. Bismuth mineralization of the Altai Republic: typification and predictive assessment. *Advances in modern natural science*, 2013, no. 3, pp. 52–57. (In Russ.)
25. *Mineralogy Database*. Available at: <https://www.webmineral.com> (accessed 15 March 2024).
26. Ahmad M., Solomon M., Walshe J. L. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 345–370.
27. Jian W., Mao J.W., Lehmann B., Cook N.J., Xie G.Q., Liu P., Duan C., Alles J., Niu Z.J. Au-Ag-Te-Rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaolinling lead gold district, central China. *Economic Geology*, 2021, vol. 116 (5), pp. 1239–1248.
28. Gou J., Bai H., Zhang X., Huang Y., Duan S., Ariando A., Yang S., Chen L., Lu Y., Wee A. Two-dimensional ferroelectricity in a single-element bismuth monolayer. *Nature*, 2023, vol. 617, pp. 67–85.
29. Tolstykh N., Shapovalova M., Shaparenko E., Bukhanova D. The role of selenium and hydrocarbons in Au-Ag ore formation in the Rodnikovoe Low-Sulfidation (LS) epithermal deposit, Kamchatka Peninsula, Russia. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 1418, pp. 1–16.
30. Wen R., Wang Y., Ma X., Yan Y., Ma Q., Gao J., Sun H., Huang H., Gao Z. Reversible Thermochromic Bismuth Iodide Enabled by Self-Adjustment. *Adv. Opt. Mater.*, 2023. vol. 11 (9). DOI: 10.1002/adom.202203148.
31. Altenberger F., Raith J.G., Bakker R.J., Zarasvandi A. The Chah-Mesi epithermal Cu-Pb-Zn-(Ag-Au) deposit and its link to the Meiduk porphyry copper deposit, SE Iran: evidence from sulfosalts chemistry and fluid inclusions. *Ore Geology Reviews*, 2022. vol. 142, 104732.
32. Warmada I.W., Lehmann B. Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *The Canadian Mineralogist*, 2003, vol. 41, pp. 185–200.
33. Etschmann B.E., Liu W., Pring A., Grundler P.V., Tooth B., Borg S., Testemale D., Brewe D., Brugger J. The role of Te (IV) and Bi (III) chloride complexes in hydrothermal mass transfer: an X-ray absorption spectroscopic study. *Chemical Geology*, 2016, vol. 425, pp. 37–51.
34. Ciobanu C.L., Cook N.J., Spry P.G. Telluride and selenide minerals in gold deposits – How and why? *Mineralogy and Petrology*, 2006, vol. 87, pp. 163–169.
35. Grundler P.V., Brugger J., Etschmann B.E., Helm L., Liu W., Spry P.G., Tian Y., Testemale D., Pring A. Speciation of aqueous tellurium (IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, vol. 120, pp. 298–325.
36. Kormushin V.A. *Method of homogenization of gas-liquid inclusions in minerals*. Alma-Ata, Nauka Publ., 1982. 72 p. (In Russ.)
37. Plechov P.Yu. *Methods for studying fluid and melt inclusions*. Moscow, KDU Publ., 2014. 268 p. (In Russ.)
38. Naumov V.A., Dorofeeva V.A., Mironova O.F. Basic physical and chemical parameters of natural mineral-forming fluids. *Geochemistry*, 2009, no. 8, pp. 825–851. (In Russ.)
39. Prokofiev V.Yu. *Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types (according to the study of fluid inclusions)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 186 p. (In Russ.)

40. Mazurov A.K., Nikolaeva A.N., Rudmin M.A., Yakich T.Yu., Ruban A.S., Baibolova Sh.Zh. Gold in the ores of the Abyz gold-pyrite deposit (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 78–88. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia N. Nikolaeva, Engineer, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nikolaevaanastas759@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-9058-5048>

Alexey K. Mazurov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. akm@tpu.ru

Received: 27.03.2024

Revised: 12.05.2024

Accepted: 14.05.2024

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa 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 26.05.2024. Дата выхода журнала: 30.05.2024.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 29,20. Уч.-изд. л. 26,41.
Заказ 164-24. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.