

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 334, № 8, 2023

Издательство
Томского политехнического университета
2023

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)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мостовщиков А.В., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2023

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

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

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

Volume 334, № 8, 2023

Tomsk Polytechnic University Publishing House
2023

EDITORIAL BOARD

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

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Формирование подходов к развитию цифровой инфраструктуры системы кадастровой оценки на примере земель сельскохозяйственного назначения**
Козина М.В., Студенкова Н.А., Пальцева Д.Е.
- Полимодальность распределения вторичных каолинов в открытых системах песчаных коллекторов**
Мельник И.А.
- Теплофизическая и экологическая оценка использования природного газа при реконструкции пылеугольного котла**
Мальцев К.И., Гиль А.В., Абрамов Н.В., Пузырев С.А.
- Влияние конфигурации электродной системы коаксиального магнетоплазменного ускорителя на процесс формирования и развития дугового разряда**
Циммерман А.И., Шаненков И.И., Насырбаев А.Р., Никитин Д.С., Сивков А.А.
- Режимы работы микрогидроэлектростанции со стабилизацией выходного напряжения при помощи управления инвертором**
Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М.
- Оценка степени кристалличности кварцевого сырья**
Коровкин М.В., Ананьева Л.Г., Жерлицын А.А., Кондратьев С.С., Савинова О.В., Курская В.С.
- О возможности реализации проектов CCS в карбонатных коллекторах сибирской платформы**
Никитенков А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А., Пенигин А.В., Вараксина И.В., Жуковская Е.А.
- Переработка твердого остатка пиролиза автомобильных шин**
Бухаркина Т.В., Вержичинская С.В., Тарханова И.Г., Коновалов А.В.
- Изучение изменчивости реологических свойств дисперсий биополимеров на водной основе в составе буровых растворов**
Ламбин А.И., Аверкина Е.В.
- Органическое вещество в термальных водах Паратунского геотермального района (Камчатка)**
Потурай В.А.
- Формирование состава микроэлементов снеговой пыли Тюмени и Тобольска с использованием иерархического кластерного анализа**
Захарченко А.В., Пасько О.А., Тигеев А.А.
- Расчет забойных параметров теплоносителя при его движении по стволу наклонно-направленной скважины с учетом структуры потока**
Гильманов А.Я., Родионова А.В., Шевелёв А.П.
- Разработка статистической модели прогноза подтверждаемости амплитуд структур, подготовленных по отложениям среднего карбона на территории Пермского края**
Галкин В.И., Суворова А.С.
- Реабилитация техногенных объектов отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (Средний Урал)**
Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю.
- 7 Formation of approaches to the development of the digital infrastructure of the cadastral valuation system on the example of agricultural land**
Kozina M.V., Studenkova N.A., Paltseva D.E.
- 17 Polymodality of secondary kaolinite distribution in open sandy reservoir systems**
Melnik I.A.
- 30 Thermophysical and environmental assessment of natural gas utilization in the reconstruction of a pulverized coal-fired boiler**
Maltsev K.I., Gil A.V., Abramov N.V., Puzyrev S.A.
- 39 Influence of configuration of the electrode system of a coaxial magneto plasma accelerator on arc discharge formation and development**
Tsimmerman A.I., Shanenkov I.I., Nassyrbayev A.R., Nikitin D.S., Sivkov A.A.
- 51 Operating modes of micro-hydroelectric power plant with output voltage stabilization using inverter control**
Lukutin B.V., Shandarova E.B., Popov M.M.
- 59 Assessment of crystallinity degree of quartz raw materials**
Korovkin M.V., Ananyeva L.G., Zherlitsyn A.A., Kondratiev S.S., Savinova O.V., Kurskaya V.S.
- 68 On the possibility of implementing CCS projects in the carbonate reservoirs of the Siberian Platform**
Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A., Penigin A.V., Varaksina I.V., Zhukovskaya E.A.
- 79 Recycling of solid residue of pyrolysis of car tires**
Bukharkina T.V., Verzhichinskaya S.V., Tarkhanova I.G., Konovalov A.V.
- 91 Study of the variability of rheological properties of water-based biopolymer dispersions in drilling fluids**
Lambin A.I., Averkina E.V.
- 98 Organic matter in the Paratunka geothermal field (Kamchatka) thermal waters**
Poturay V. A.
- 110 Formation of the composition of trace elements of snow dust in Tyumen and Tobolsk using hierarchical cluster analysis**
Zakharchenko A.V., Pasko O.A., Tigeev A.A.
- 121 Calculation of the bottom-hole parameters of the heat carrier during its movement along the wellbore of a directional well considering the flow structure**
Gilmanov A.Ya., Rodionova A.V., Shevelev A.P.
- 129 Development of a statistical model for predicting the confirmability of the amplitudes of structures prepared from the deposits of the middle carboniferous in the Perm region**
Galkin V.I., Suvorova A.S.
- 137 Rehabilitation of man-made formation of abandoned copper pyrite deposits on the example of Levikhinsky mine (Middle Urals)**
Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu.

Использование методов машинного обучения с учителем для обнаружения притоков пластового флюида при бурении с управляемым давлением Щербakov P.Э., Ковалев A.B., Ильин A.B.	151	Using supervised machine learning algorithms for kick detection during managed pressure drilling Shcherbakov R.E., Kovalev A.V., Ilin A.V.
Влияние разрешения цифровой модели рельефа на картирование предрасположенности территории к развитию оползней Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Та Д.Т., Нгуен Ч.К., Зеркаль О.В., Горобцов Д.Н., Ву Х.Д.	164	Influence of digital elevation model resolution on mapping territory susceptibility to landslide development Duong V.B., Fomenko I.K., Ta D.T., Nguyen T.K., Zerkal O.V., Gorobtsov D.N., Vu H.D.
Разработка методики интегральной экспертной оценки перспективности участков недр на основе онтологической модели и нечеткой логики Дадыкин В.С., Дадыкина О.В., Язвенко Н.А.	182	Development of a methodology for integrated expert assessment of the prospects of subsurface areas based on an ontological model and fuzzy logic Dadykin V.S., Dadykina O.V., Yazvenko N.A.
К вопросу о транспортировке сжиженного углекислого газа Ванчугов И.М., Резанов К.С., Шестаков Р.А.	190	On the issue of transportation of liquefied carbon dioxide Vanchugov I.M., Rezanov K.S., Shestakov R.A.
Исследование характеристики системы стабилизации динамического уровня в стволе скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса Тотанов А.С., Молчанова В.А., Уразакв К.Р.	210	Study of the performance of the dynamic level stabilization system operation in the wellbore equipped with an electrical submersible pump unit Totanov A.S., Molchanova V.A., Urazakov K.R.
Обзор и критический анализ современного состояния и путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин Кладиев С.Н.	220	Review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells Kladiev S.N.

УДК 539.186:537; 539.196:537, 332.34:711.144

ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДОВ К РАЗВИТИЮ ЦИФРОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКИ НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Козина Мария Викторовна¹,
kozinamv@tpu.ru

Студенкова Наталья Александровна²,
studenkowa@mail.ru

Пальцева Дарья Евгеньевна¹,
dariapalsteva@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Актуальность работы обусловлена существующим несовершенством организационно-технической и информационной обеспеченности процесса проведения государственной кадастровой оценки в Российской Федерации в условиях цифровой трансформации в сфере земельно-имущественных отношений. Такое состояние определяется ведомственной разобщенностью государственных информационных ресурсов. Особенно явно это иллюстрируется в системе управления землями сельскохозяйственного назначения, что несет за собой негативное влияние на достоверность и качество определения кадастровой стоимости таких земель.

Цель: предложить концептуальное решение по развитию цифровой инфраструктуры системы кадастровой оценки и ее информационного обеспечения.

Методы: теоретического анализа изучения и обобщения, а также иные общепринятые аналитические методы.

Результаты. Сформирована современная модель организации информационного взаимодействия ведомственных источников данных о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения. Полученная модель позволила выявить проблемы, затрудняющие эффективное информационное обеспечение кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения. В качестве доказательной базы отсутствия полных и достоверных сведений о землях сельскохозяйственного назначения был проведен анализ отчетов по государственной кадастровой оценке земель сельскохозяйственного назначения в ряде регионов. Результаты проведенного анализа показали, что в большинстве случаев оценщики не используют ценообразующие факторы, предусмотренные действующей методикой, по причине отсутствия доступной и достоверной информации. В результате проведенного исследования разработано решение по развитию цифровой инфраструктуры системы кадастровой оценки. Предложена технологическая схема проведения сбора, обработки и анализа исходных данных о значении ценообразующих факторов, основанная на внедрении цифрового сервиса «Кадастровая оценка», предоставляющего пространственные данные об объектах.

Ключевые слова:

Кадастровая оценка, сельскохозяйственные земли, сервис, информационное обеспечение, цифровая инфраструктура, ценообразующие факторы.

Введение

Процесс кадастровой оценки объектов недвижимости является высокотехнологичным видом деятельности и должен предусматривать непрерывный процесс мониторинга рыночных цен, актуализацию и постоянное совершенствование моделей кадастровой оценки, а также наличие достаточной информации об объектах недвижимости, постоянное накопление дополнительных данных об объекте и ценообразующих факторах. Руководствуясь этим, Правительство РФ в 2017 г. приняло ФЗ «О государственной кадастровой оценке» [1] и утвердило новые методические указания, подразумевающие установление единства методологии определения кадастровой стоимости. Таким образом, произошедшие изменения в системе кадастровой оценки позволили проводить кадастровую оценку земельных участков разных категорий земель и объектов недвижимости на основе единой методики, содержащей общий механизм оценки и особенности

применения подходов оценки для определения кадастровой стоимости земельных участков сельскохозяйственного назначения и других категорий земель.

Ключевыми аспектами введенного закона, регулирующего кадастровую оценку стали: создание института государственных кадастровых оценщиков (бюджетных учреждений) и передача им полномочий по определению кадастровой стоимости. Особенностью утвержденной методики явилось то, что она стала применяться для оценки всех видов объектов недвижимости и регламентировать перечень обязательных ценообразующих факторов для земельных участков и объектов капитального строительства, в том числе отдельным дополнительным блоком стал перечень факторов для земель сельскохозяйственного назначения сегмента «сельскохозяйственное использование».

В 2021 г. были утверждены новые методические указания о государственной кадастровой оценке [2],

отличительной особенностью которых стало внесение в них примерного перечня информационных ресурсов, служащих источником информации о ценообразующих факторах.

По данным Росреестра [3] в декабре 2022 г. завершен процесс кадастровой оценки более 61 млн земельных участков во всех субъектах Российской Федерации.

Однако сегодня при едином методическом подходе региональные бюджетные учреждения, уполномоченные проводить кадастровую оценку, вынуждены использовать разные инструменты сбора исходных

данных, а часть вычислений производить вручную из-за несовершенства автоматизированных систем.

Анализ содержания отчетов по государственной кадастровой оценке земель сельскохозяйственного назначения, размещенных в фонде данных государственной кадастровой оценки [4], показал, что в большинстве отчетов не использовались ценообразующие факторы, предусмотренные Методическими указаниями, относящиеся к дополнительным характеристикам сегмента «Сельскохозяйственное использование», по причине отсутствия полных и достоверных сведений (таблица).

Таблица. Использование ценообразующих факторов, согласно методическим указаниям в субъектах Российской Федерации за 2022 г.

Table. Use of price-forming factors, according to the methodological guidelines in the subjects of the Russian Federation for 2022

Дополнительные характеристики сегмента «Сельскохозяйственное использование» (ценообразующие факторы) Additional characteristics of the segment «Agricultural use» (pricing factors)	Субъекты РФ/Subjects of the Russian Federation								
	Республика Калмыкия Republic of Kalmykia	Смоленская область Smolensk Region	Забайкальский край Trans-Baikal Territory	Калужская область Kaluga Region	Республика Бурятия Republic of Buryatia	Республика Тыва Republic of Tuva	Томская область Tomsk Region	Новосибирская область Novosibirsk Region	Ярославская область Yaroslavl Region
Вид угодий/Type of land	+	+	+	–	+	–	+	–	+
Нормативная урожайность/Standard yield	+	+	–	+	+	–	+	+	–
Гранулометрический состав почв Granulometric composition of soils	+	+	–	+	+	+	+	+	–
Каменистость почв/Soil stony	+	–	–	–	+	–	+	–	–
Засоление почв/Soil salinization	+	–	–	–	+	–	+	+	–
Солонцеватость почв/Soil salinity	+	–	–	–	+	–	+	+	–
Солонцы по мощности надсолонцового горизонта Solonets by the power of the suprasonets horizon	+	–	–	–	–	–	+	+	–
Карбонатность почв/Soil carbonate content	+	–	–	–	+	–	+	–	–
Уплотнение почв/Soil compaction	–	–	–	–	–	–	+	–	–
Переувлажнение/Overwetting	–	–	–	+	+	–	–	+	–
Наличие неудобц (степень изрезанности рельефом) Presence of inconveniences (the degree of indentation by relief)	–	–	–	+	–	–	+	+	–
Пестрота почвенного покрова Soil cover variegation	+	–	–	+	–	–	+	+	–
Удаленность от рынков сбыта, km Distance from sales markets, km	–	–	–	–	–	–	–	+	–

Объективной причиной такого положения следует считать то, что значительный временной период экономика страны функционировала при отсутствии попыток к упорядочиванию сведений о землях сельскохозяйственного назначения.

С переходом РФ к цифровой экономике внедрение цифровых технологий в систему государственной кадастровой оценки становится все более актуальной задачей на уровне государства. Сегодня Правительство РФ совместно с Росреестром нацелено на поиск новых решений в области нормативно-методического сопровождения и цифровой трансформации системы государственной кадастровой оценки с целью ее совершенствования. Однако эффективное внедрение цифровизации в сектор оценки может быть достигнуто только при ее качественном информационном обеспечении [5, 6].

В связи с этим первостепенной научно-технической задачей является формирование подходов к развитию

цифровой инфраструктуры системы кадастровой оценки и ее информационного обеспечения.

Современное состояние информационного обеспечения земель сельскохозяйственного назначения

За период многолетних земельных преобразований в России сложилась ситуация, когда источники информации о землях сельскохозяйственного назначения находятся в разных ведомствах: в Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр), Министерстве сельского хозяйства Российской Федерации (Минсельхоз), Федеральной службе государственной статистики (Росстат). Содержание ежегодных отчетов [7–9] всех ведомств иллюстрирует существенные расхождения в данных, что подтверждает несогласованность ведомств в подходах и методах учета информации и, как следствие, отсутствие достоверных качественных

и количественных сведений о сельскохозяйственных землях, которые оказывают прямое влияние на величину кадастровой стоимости. Не менее весомыми факторами, усложняющими процесс получения актуальной информации о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения, является отсутствие в распоряжении всех ведомств актуальной картографической основы, цифровых тематических карт, в том числе почвенных, цифровых топографических планов и ортофотопланов.

Цифровая трансформация и тенденция к эффективному управлению и использованию сельскохозяйственных земель диктуют необходимость поиска механизмов актуализации данных о землях сельскохозяйственного назначения с применением современных аппаратно-программных средств и интеграции таких данных в едином информационном пространстве [10, 11].

Таким образом, информационное обеспечение сельскохозяйственного землепользования должно быть направлено на формирование единого информационного пространства, наполненного актуальными данными, автоматизацию процессов сбора и переработки информации. Однако сегодня информацию о количественном и качественном состоянии сельскохозяйственных земель, которая не всегда сопоставима и достоверна, можно получить из разных информационных источников. Проблема заключается в ведомственной разобщенности сбора данных и отсутствии межведомственного информационного взаимодействия.

На основе анализа научно-технической документации [12–14] сформирована современная модель организации информационного взаимодействия (рис. 1) Минсельхоза с ведомственными источниками данных о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения с целью наполнения информационных систем (ЕФИС ЗСН и Реестр ЗСН).

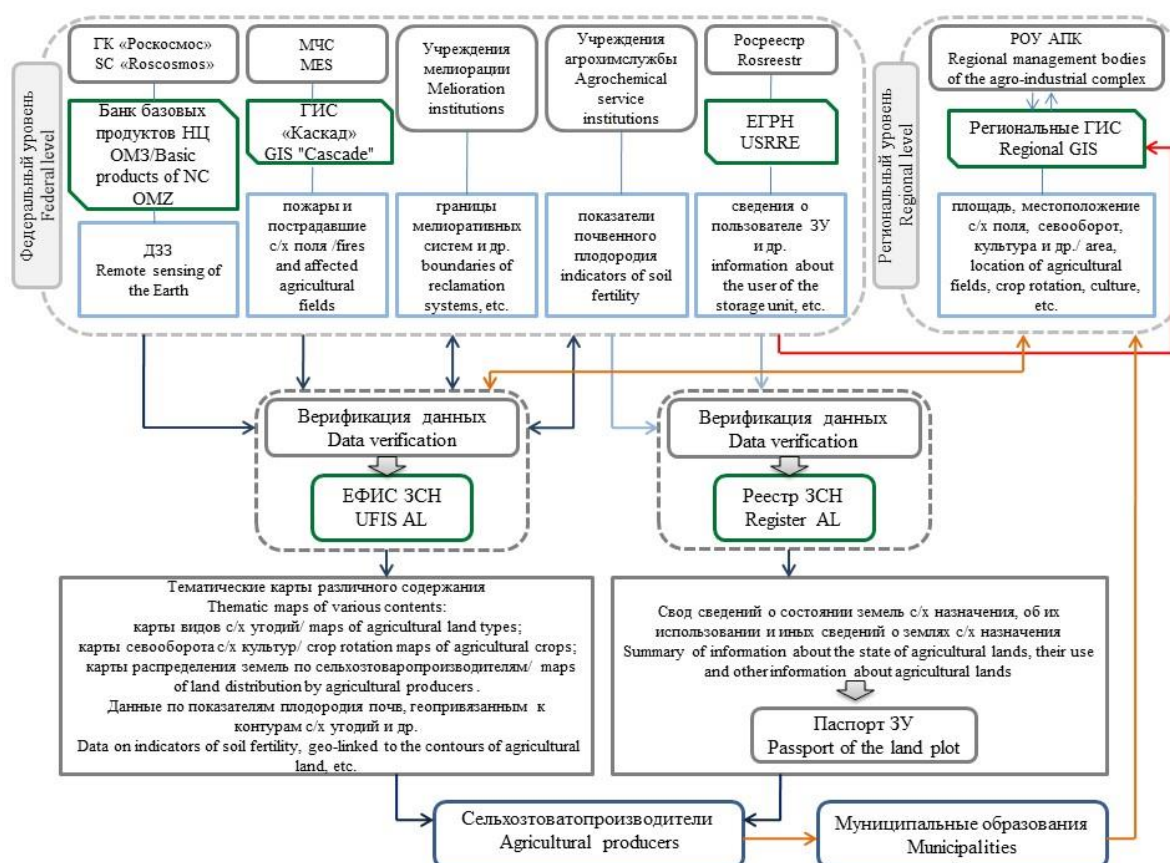


Рис. 1. Модель современной организации информационного взаимодействия ведомственных учреждений, содержащих данные о землях сельскохозяйственного назначения

Fig. 1. Model of modern organization of information interaction of departmental institutions containing data on agricultural lands

Стартовым проектом Министерства сельского хозяйства явилась запущенная в 2018 г. Единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения (ЕФИС ЗСН) как пример цифровизации государственной функции в части мониторинга состояния и учета земель сельскохозяйственного назначения. Эта система предназначена для обеспечения Ми-

нистерства сельского хозяйства, его подведомственных учреждений, федеральных, региональных и муниципальных органов власти, сельскохозяйственных товаропроизводителей и всех авторизованных пользователей актуальной и достоверной информацией о землях сельскохозяйственного назначения, получаемой в ходе государственного мониторинга земель.

В рамках функционирования ЕФИС ЗСН обеспечивается получение пространственной, атрибутивной и графической информации, характеризующей различные аспекты состояния и использования земель сельскохозяйственного назначения, ее обработка, верификация, хранение и анализ. ЕФИС ЗСН содержит

сведения о местоположении, границах, площадях, состоянии и фактическом использовании каждого земельного участка, показателях почвенного плодородия, состоянии сельскохозяйственной растительности в реальном времени, негативных процессах, объектах и сооружениях мелиоративных систем и др. (рис. 2).

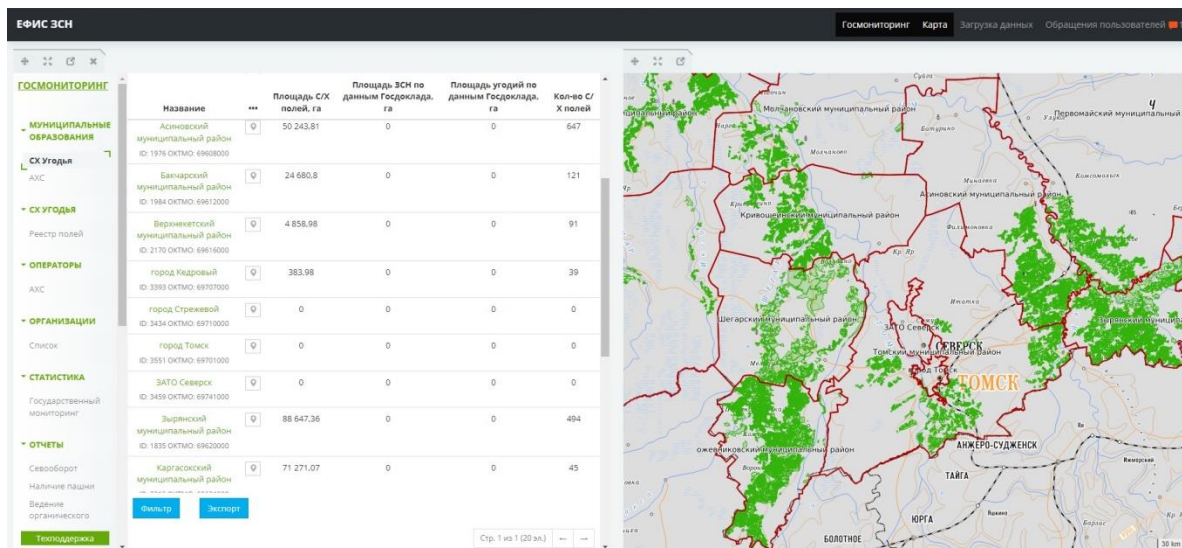


Рис. 2. Пример отображения геоинформационного слоя сельскохозяйственных угодий на геопортале ЕФИС ЗСН (Томская область)

Fig. 2. Example of displaying the geoinformation layer of agricultural land on the geoportale UFIS AL (Tomsk Region)

На сегодняшний день основной объем данных для наполнения ЕФИС ЗСН Минсельхоз получает путем взаимодействия с региональными органами агропромышленного комплекса (АПК), в том числе с использованием региональных информационных систем (РИС). Первичными источниками информации выступают

сельхозтоваропроизводители и муниципальные органы управления, которые передают данные в региональные органы управления АПК. При наличии в субъекте РИС собранные данные заносятся в информационные системы региона и передаются на федеральный уровень для наполнения ЕФИС ЗСН (рис. 3).

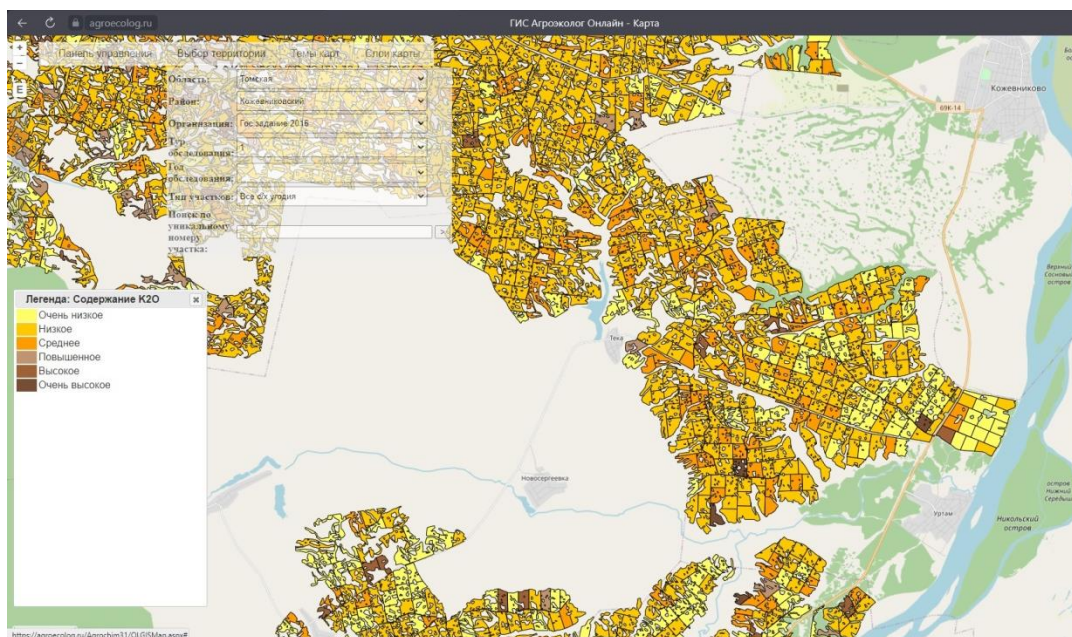


Рис. 3. Фрагмент цифровой карты содержания обменного калия на территории Кожевниковского района Томской области (по результатам обследования в 2016 г.), геопортал ГИС «Агроэколог» [15]

Fig. 3. Fragment of a digital map of exchangeable potassium content in the territory of the Kozhevnikovskiy district, Tomsk region (according to the results of a survey in 2016), geoportale GIS «Agroecologist» [15]

Проведенный анализ опыта применения информационных систем в регионах позволил выявить тенденцию к расширению возможностей информационных систем для решения насущных задач, связанных с сельскохозяйственным землепользованием. Так, в некоторых субъектах РФ, имеющих РИС, налажено информационное взаимодействие с территориальными органами Росреестра, что позволяет выявлять правообладателей земельных участков из состава земель сельскохозяйственного назначения, а также земли, не стоящие на государственном кадастровом учете (ГКУ), для дальнейшей постановки на ГКУ и их кадастровой оценки и др.

Другим базисным источником данных для наполнения систем являются подведомственные Минсельхозу станции агрохимической службы, предоставляющие данные о показателях почвенного плодородия обследуемых полей, и учреждения мелиорации и сельскохозяйственного водоснабжения, обеспечивающие данными о местоположении и границах мелиоративных систем и гидротехнических сооружений.

Помимо этого, Министерство ведет активную работу по расширению взаимодействия с крупными корпорациями и ведомствами (ГК Роскосмос, МЧС, Росреестр) в рамках информационного обмена данными с целью расширения возможностей системы. Основным поставщиком данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ), подведомственное учреждение Роскосмоса. Интеграция с Банком данных НЦ ОМЗ позволяет выполнять анализ вегетационных индексов развития растительности и производить расчет средневзвешенных значений вегетационных индексов NDVI по контурам полей для отображения в ЕФИС ЗСН. МЧС России предоставляет актуальные данные о пожарах и пострадавших от них угодьях и пользователях.

Для совершенствования функционирования ЕФИС ЗСН в ряде регионов проводится работа по интеграции ЕФИС ЗСН и ЕГРН.

Наряду с существующей федеральной системой о землях сельскохозяйственного назначения в феврале 2023 г. Правительством РФ закреплены правовые основы [14] ведения государственного реестра земель сельскохозяйственного назначения (Реестр ЗСН).

Создание Реестра ЗСН направлено на оперативное получение фактических сведений о землях сельскохозяйственного назначения и обеспечение заинтересованных лиц достоверной информацией с целью планирования сельскохозяйственных мероприятий и прогнозирования их результатов.

Реестр ЗСН будет являться подсистемой ЕФИС ЗСН и представлять собой некий государственный информационный ресурс, агрегирующий информацию о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения, их качественных и количественных характеристиках, а также сведения об обладателях земельных участков на различном праве, обладателях сервитутов и публичных сервитутов, зданиях и сооружениях, расположенных на земельных участках из состава земель сельскохозяйственного назначения.

Информационное наполнение реестра должно быть реализовано по результатам государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения и межведомственного информационного взаимодействия с органами государственной власти субъектов РФ, Росреестром, Роскосмосом, Росприроднадзором, подведомственными Минсельхозу учреждениями и др. Сведения, содержащиеся в государственном реестре, будут предоставляться правообладателям земельных участков по их запросу в форме паспорта земельного участка.

Анализ работы ЕФИС ЗСН, обобщение данных проведенного информационно-аналитического обзора позволили выявить проблемы, затрудняющие эффективное функционирование информационной системы, а следовательно, и информационное обеспечение кадастровой оценки таких земель:

1. Острой проблемой является неполнота и недостоверность предоставляемых от региональных органов АПК данных. Кроме того, предоставляемая информация имеет множество расхождений с данными ДЗЗ, получаемыми Минсельхозом. Причинами возникновения данной проблемы является отсутствие обязательных требований к процессу передачи достоверных сведений о состоянии и использовании сельскохозяйственных земель сельхозтоваропроизводителями и региональными органами АПК.
2. В функционировании ЕФИС ЗСН выявлены существенные погрешности в предоставляемом планово-картографическом материале. Основой для создания информационных продуктов ЕФИС ЗСН в виде цифровых тематических карт являются данные, получаемые со спутников Landsat, пространственное разрешение которых составляет 30 м, что зачастую недостаточно для точного построения контуров угодий, идентификации их назначения и фактического использования [16].

Проведенный анализ существующей государственной системы информационного обеспечения земель сельскохозяйственного назначения подтвердил ведомственную разобщенность государственных информационных ресурсов, содержащих сведения о землях сельскохозяйственного назначения. Кроме того, на сегодняшний день в РФ отсутствуют структурированные сведения о землях сельскохозяйственного назначения как об объекте оценки, которые должны использоваться при расчете кадастровой стоимости.

Развитие информационного обеспечения кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения

Анализ отраслевых программ стратегического развития [17] показал, что приоритетной задачей, стоящей сегодня перед государством, является обеспечение ускоренного внедрения цифровых технологий в формирование системы управления территориальным развитием, что напрямую должно касаться и системы кадастровой оценки.

Внедряемые цифровые технологии изменяют привычные форматы управления землей и недвижимо-

стью, способствуют ускорению привычных процессов, обеспечивают непрерывный поток информации [18–20]. Цифровые геоданные становятся фундаментом для принятия важных управленческих решений, в том числе, при взаимодействии государства с гражданами и бизнесом. Мировой опыт иллюстрирует возможности использования таких данных в оценочной деятельности, поскольку сегодня важно достоверное определение стоимости земли с учетом множества факторов для исключения влияния субъективизма. Например, в Турции [21, 22] в основе метода определения стоимости земли лежит использование множества факторов, к примеру, транспортная инфраструктура, инженерные коммуникации, почвенные характеристики и др., при этом при расчете стоимости факторы можно анализировать и объединять с использованием географических информационных систем (ГИС).

Кроме того, анализ зарубежного опыта совершенствования системы кадастровой оценки демонстрирует ориентацию на автоматизацию процессов оценки. Автоматизация включает в себя разработку алгоритмов выполнения оценочных расчетов и готовых решений для создания специализированных приложений или инструментов с использованием существующих сред САПР или ГИС, которые могут решить ряд проблем, возникающих на отдельных этапах расчетов стоимости образуемых земельных участков, сформированных в результате перераспределения земель [22, 23].

В целях повышения эффективности действий по использованию информационных и цифровых технологий в деятельности федеральных органов исполнительной власти Правительством РФ в конце 2020 г. было подписано постановление [24], которое положило начало новому этапу цифровизации и в целом цифровой трансформации госорганов.

С 2021 г. в 4 субъектах РФ, а с 2023 г. еще в 26 субъектах РФ Росреестром проводится эксперимент по созданию Единого информационного ресурса о земле и недвижимости. Тем самым запущен процесс по созданию к 2030 г. единой цифровой платформы «Национальная система пространственных данных» (НСПД), которая станет содержать пул данных об объектах недвижимости и территориях, что должно значительно повысить качество государственных и муниципальных услуг, в том числе в сфере оценочной деятельности. Предполагается, что такой ресурс будет объединять сведения из двенадцати федеральных информационных систем, в том числе Минсельхоза.

Таким образом, сегодня создается механизм консолидации всех сведений и материалов о земле и недвижимости, которые в дальнейшем могут быть использованы для проведения государственной кадастровой оценки земель [25].

Для цифрового развития системы кадастровой оценки и определения справедливой кадастровой стоимости земель сельскохозяйственного назначения

необходимо обеспечить реализацию комплекса мер, направленных на формирование единой цифровой базы из ЕФИС ЗСН, ЕГРН, Реестра ЗСН, региональных ГИС, позволяющей агрегировать все необходимые данные о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения.

Под цифровой трансформацией кадастровой оценки в настоящем исследовании подразумевается комплекс мероприятий, выполняемых бюджетным учреждением, с использованием цифровых данных и внедрением таких технологий в свою деятельность [26, 27].

В рамках настоящего исследования для целей развития цифровой инфраструктуры кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения была разработана технологическая схема, основанная на внедрении цифрового сервиса «Кадастровая оценка», предоставляющего пространственные данные об объектах.

Внедрение цифрового сервиса «Кадастровая оценка» должно обеспечить централизованный доступ государственным оценщикам к открытым пространственным данным об объектах недвижимости, консолидированным на одной цифровой платформе, содержащим сведения о землях сельскохозяйственного назначения и обеспеченным необходимым функционалом через формирование запроса. Главной задачей, которую должен выполнять сервис, является обеспечение возможности выполнения операций по поиску, обработке, формированию и предоставлению пространственных данных об объектах государственным оценщикам.

Работа оценщика в сервисе предполагает создание тематической цифровой карты с подключением всех необходимых информационных слоев, содержащих графическую и атрибутивную информацию о значениях, показателях, которые являются ценообразующими факторами. Обязательным информационным слоем в наборе данных должен быть кадастровый план территории (на основании сведений из ЕГРН), сервис должен позволить выполнять поиск земельных участков по заданным кадастровым номерам и адресам. После определения набора данных из разных источников и выбора земельных участков сервис должен самостоятельно выполнять преобразования в исходной таблице атрибутов каждого земельного участка с учетом подключенных информационных слоев. Исходной таблицей атрибутов должна стать таблица земельного участка из информационного слоя «Кадастровый план», которая интегрируется из ЕГРН с содержащимися в нем основными и дополнительными сведениями о земельном участке. Сервис должен позволять выгружать список выбранных земельных участков с преобразованными атрибутивными данными, привязанными к земельным участкам в файл таблицы в формате MS Excel (*.xls), что позволит автоматизировать процесс сбора, обработки и анализа сведений о значениях ценообразующих факторов.

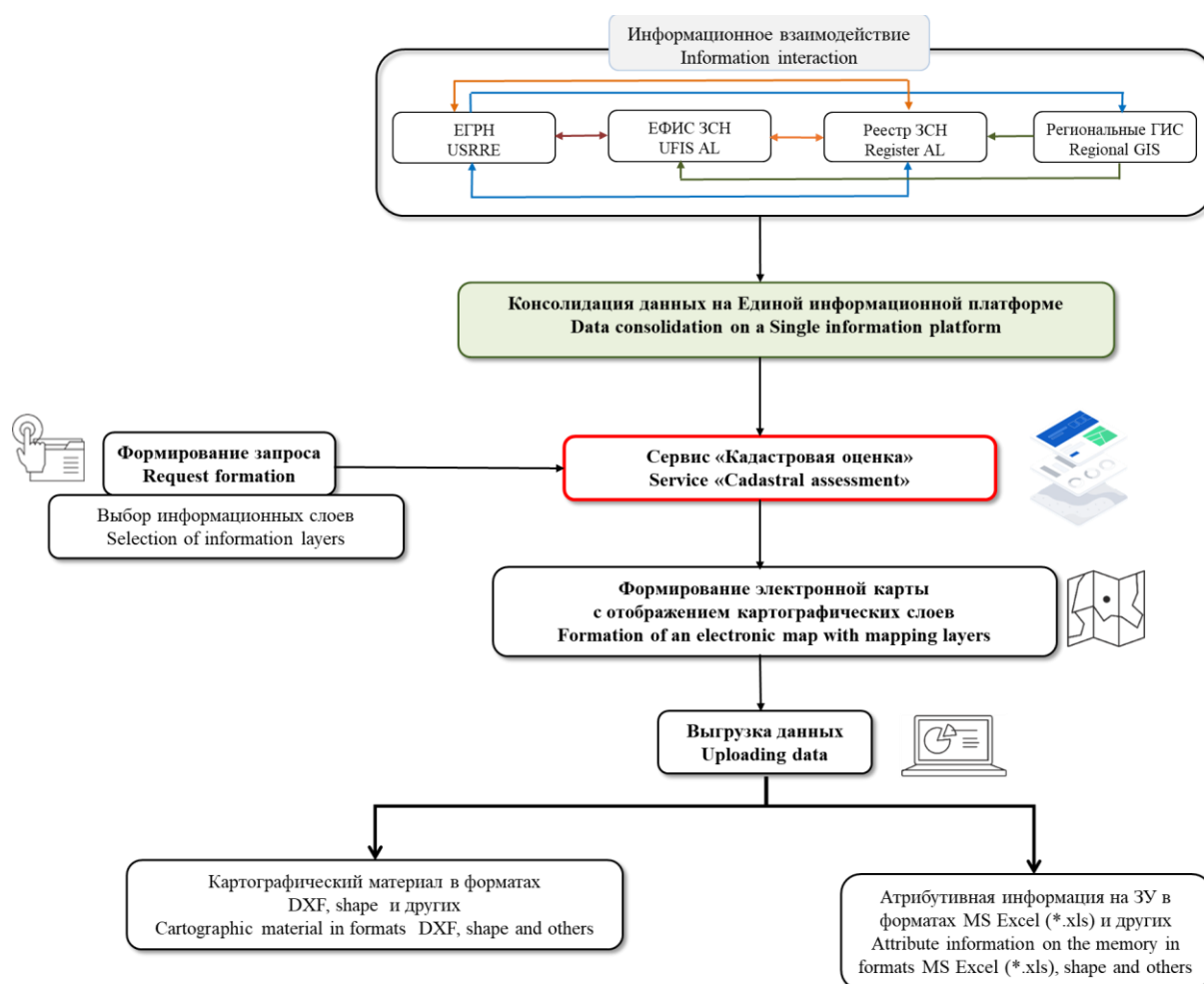


Рис. 4. Технологическая схема проведения сбора, обработки и анализа исходных данных о значениях ценообразующих факторов, основанная на внедрении цифрового сервиса «Кадастровая оценка»

Fig. 4. Technological scheme for collection, processing and analysis of initial data on the values of price-forming factors, based on the introduction of the digital service «Cadastral valuation»

Заключение

В результате выполненных исследований выявлено, что сегодня в условиях цифровой трансформации в сфере земельных и имущественных отношений необходимо особое внимание уделить разработке цифровой инфраструктуры системы кадастровой оценки. Формируемые подходы к развитию цифровой инфраструктуры системы кадастровой оценки и ее информационного обеспечения должны учитывать особенности сегментации земельных участков и качество формирования источников данных по каждому сегменту, в особенности сегмента «Сельскохозяйственное использование».

Сформированная в настоящем исследовании модель современной организации информационного взаимодействия ведомственных учреждений, содер-

жащих данные о землях сельскохозяйственного назначения, позволяет сделать вывод, что сегодня необходимо обратить пристальное внимание на наполнение информационных источников о землях сельскохозяйственного назначения и предусмотреть внедрение в практику мероприятий по инвентаризации сельскохозяйственных земель [28] как первоисточника получения оперативных и достоверных сведений о таких землях. Предлагаемая технологическая схема проведения сбора, обработки и анализа исходных данных о значениях ценообразующих факторов земель сельскохозяйственного назначения основана на внедрении цифрового сервиса «Кадастровая оценка» и учитывает особенности существующего механизма формирования сведений о таких землях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон № 237-ФЗ от 03.07.2016 «О государственной кадастровой оценке» // Собрание законодательства Российской Федерации – № 27 (ч. 1). – 04.07.2016.
2. Приказ Росреестра № П/0336 от 04.08.2021 «Об утверждении Методических указаний о государственной кадастровой оценке» // Официальный интернет-портал правовой информации № 0001202112200041. – 20.12.2021.
3. Государственная кадастровая оценка всех земельных участков // Росреестр. URL: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/gosudarstvennaya-kadastrovaya-otsenka-zemelnykh-uchastkov-zavershena-vo-vsekh-regionakh-rossii/> (дата обращения: 24.02.2023).
4. Фонд данных государственной кадастровой оценки // Росреестр. URL: https://rosreestr.gov.ru/wps/portal/cc_ib_svedFDGKO (дата обращения: 24.02.2023).

5. Demirci O. Automated Valuation Models (AVMs): machine learning, namely mass (advanced) valuation methods and algorithms. – Property Elite. – 2021. – 14 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.12649.42080.
6. Трёхмерная визуализация неблагоприятных природных условий для корректировки кадастровой стоимости земель / Е.И. Аврунев, Н.В. Гатина, М.В. Козина, В.К. Попов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 181–190.
7. Федеральная служба государственной статистики // Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226> (дата обращения: 24.02.2023).
8. Государственный национальный доклад о состоянии и использовании земель // Росреестр. URL: <https://rosreestr.gov.ru/activity/gosudarstvennoe-upravlenie-v-sfere-ispolzovaniya-i-okhrany-zemel/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (дата обращения: 24.02.2023).
9. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения // Центр цифровой трансформации АПК. URL: https://cctmcs.ru/monitoring-zemel/state_land/ (дата обращения: 24.02.2023).
10. Wójciak E., Cienciala A. Selected methods and factors in the reliable appraisal of agriculturally used real estates // GIS Odyssey Journal. – 2022. – V. 2. – № 1. – P. 99–112.
11. Forys I., Putek-Szeląg E. A non-classical model of mass valuation of agricultural property // Real Estate Management and Valuation. – 2018. – V. 26. – № 4. – P. 90–101.
12. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. – 404 с.
13. Федеральный закон № 101 от 16.07.1998 «О государственном регулировании обеспечения плодородия земель сельскохозяйственного назначения» // Собрание законодательства Российской Федерации № 29. – 20.07.1998.
14. Постановление Правительства Российской Федерации № 154 от 02.02.2023 «О порядке ведения государственного реестра земель сельскохозяйственного назначения» // Собрание законодательства Российской Федерации № 6. – 06.02.2023.
15. ГИС Агроэколог // Агроэколог. URL: <https://agroecolog.ru/Agrochim31/Default.aspx#/> (дата обращения: 24.02.2023).
16. Волков С.Н., Шаповалов Д.А. Цифровое землеустройство – проблемы и перспективы // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 3. – № 2. – С. 26–35.
17. Отраслевые документы стратегического планирования // Правительство России. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/625/events/> (дата обращения: 24.02.2023).
18. Hermans L. Implementation of geographically weighted regression in automated valuation models in the Netherlands // Journal of Property Tax Assessment & Administration. – 2020. – V. 17. – № 1. – P. 23–48.
19. Jahanshahi E., Buyong T., Shariff A.R.M. A review of property mass valuation models // Pertanika Journal of Science & Technology. – 2011. – V. 19. – № 1. – P. 23–30.
20. Wang D., Li V.J. Mass appraisal models of real estate in the 21st century: a systematic literature review // Sustainability. – 2019. – V. 11. – № 24. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11247006>.
21. Tavares V.C., Tavares F., Santos E. The value of farmland and its determinants – the current state of the art // Land. – 2022. – V. 11. – № 11. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11111908>.
22. Ayalke Z., Sisman A. Nominal land valuation with best-worst method using geographic information system: a case of Atakum, Samsun // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2022. – V. 11. – № 4. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11040213>.
23. Jarosław J., Ertunc E. Towards a full automation of land consolidation projects: Fast land partitioning algorithm using the land value map // Land Use Policy. – 2022. – № 120. DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106282.
24. Постановление Правительства Российской Федерации № 1646 от 10.10.2020 «О мерах по обеспечению эффективности мероприятий по использованию информационно-коммуникационных технологий в деятельности федеральных органов исполнительной власти и органов управления государственными внебюджетными фондами» // Собрание законодательства Российской Федерации – № 42 (ч. 3) – 19.10.2020.
25. Wei C. et al. The research development of hedonic price model-based real estate appraisal in the era of big data // Land. – 2022. – V. 11. – № 3. – P. 334–364.
26. Bidanset P.E., Rakow R. Survey on the use of automated valuation models (AVMs) in government assessment offices: an analysis of AVM use, acceptance, and barriers to more widespread implementation // Property Tax Assessment & Administration. – 2022. – V. 19. – № 2. – P. 47–69.
27. Developing automated valuation models for estimating property values: a comparison of global and locally weighted approaches / M. Doumpos, D. Papastamos, D. Andritsos, C. Zopounidis // Annals of Operations Research – 2021. – № 306. – P. 415–433.
28. Актуальные вопросы инвентаризации и кадастрового учета земель сельскохозяйственного назначения / Н.А. Студенкова, Н.И. Добротворская, Е.И. Аврунев, М.В. Козина // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 6. – С. 140–148.

Поступила: 26.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 06.03.2023 г.

Информация об авторах

Козина М.В., кандидат технических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Студенкова Н.А., старший преподаватель кафедры геоинформатики и кадастра Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Пальцева Д.Е., магистрант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 539.186:537; 539.196:537, 332.34:711.144

FORMATION OF APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF THE DIGITAL INFRASTRUCTURE OF THE CADASTRAL VALUATION SYSTEM ON THE EXAMPLE OF AGRICULTURAL LAND

Maria V. Kozina¹,
kozinamv@tpu.ru

Natalia A. Studenkova²,
studenkova@mail.ru

Darya E. Paltseva¹,
dariapaltseva@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

The relevance of the work is caused by the existing imperfection of organizational, technical and information security of the state cadastral valuation in the Russian Federation in the context of digital transformation in the field of land and property relations. This state is determined by the departmental disunity of state information resources. This is especially clearly illustrated in the agricultural land management system, which has negative impact on the reliability and quality of determining the cadastral value of such lands.

The aim: to propose a conceptual solution for the development of the digital infrastructure of the cadastral assessment system and its information support.

The methods: theoretical analysis of the study and generalization, as well as other generally accepted analytical methods.

Results. Modern model of the organization of information interaction of departmental data sources on the state and use of agricultural land was formed. The resulting model allowed us to identify problems that complicate the effective information support of cadastral valuation of agricultural land. As an evidence base for the lack of complete and reliable information about agricultural lands, an analysis of reports on the state cadastral assessment of agricultural lands in a number of regions was carried out. The results of the analysis showed that in most cases appraisers do not use the price-forming factors provided by the current methodology, due to the lack of available and reliable information. As a result of the conducted research, a solution was developed for the development of the digital infrastructure of the cadastral assessment system. A technological scheme for collecting, processing and analyzing initial data on the values of price-forming factors is proposed, based on the introduction of the digital service «Cadastral Assessment», which provides spatial data about objects.

Key words:

Cadastral valuation, agricultural land, service, information support, digital infrastructure, price-forming factors.

REFERENCES

1. Federalny zakon № 237-FZ ot 03.07.2016 «O gosudarstvennoy kadaastrovoy otsenke» [Federal Law no. 237-FL of 03.07.2016 «On State cadastral valuation»]. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Legislation of the Russian Federation]. No. 27 (1), 04.07.2016.
2. Prikaz Rosreestra № P/0336 ot 04.08.2021 «Ob utverzhdenii Metodicheskikh ukazaniy o gosudarstvennoy kadaastrovoy otsenke» [Rosreestr Order no. P/0336 of 04.08.2021 «On approval of Methodological guidelines on state cadastral valuation»]. *Ofitsialny internet-portal pravovoy informatsii* [Official Internet portal of legal information]. No. 0001202112200041, 20.12.2021.
3. *Gosudarstvennaya kadaastrovaya otsenka vseh zemelnykh uchastkov. Rosreestr* [State cadastral assessment of all land plots. The Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography]. Available at: <https://rosreestr.gov.ru/press/archive/gosudarstvennaya-kadaastrovaya-otsenka-zemelnykh-uchastkov-zavershena-vo-vsekh-regionakh-rossii/> (accessed: 24 February 2023).
4. *Fond dannykh gosudarstvennoy kadaastrovoy otsenki. Rosreestr* [State Cadastral Valuation Data Fund. The Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography]. Available at: https://rosreestr.gov.ru/wps/portal/cc_ib_svedFDGKO (accessed: 24 February 2023).
5. Demirci O. Automated Valuation Models (AVMs): machine learning, namely mass (advanced) valuation methods and algorithms. *Property Elite*, 2021, 14 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.12649.42080
6. Avrunev E.I., Gatina N.V., Kozina M.V., Popov V.K., Three-dimensional visualization of unfavorable natural conditions for adjusting the cadastral value of land. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 181–190. In Rus.
7. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Rosstat* [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226> (accessed: 24 February 2023).
8. *Gosudarstvenny natsionalny doklad o sostoyanii i ispolzovanii zemel. Rosreestr* [State national report on the state and use of land. The Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography]. Available at: <https://rosreestr.gov.ru/activity/gosudarstvennoe-upravlenie-v-sfere-ispolzovaniya-i-okhrany-zemel/gosudarstvenny-natsionalny-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (accessed: 24 February 2023).
9. *Doklad o sostoyanii i ispolzovanii zemel selskookhozyaystvennogo naznacheniya. tsentr tsifrovoy transformatsii APK* [Report on the state and use of agricultural land. The Center for the Digital Transformation of the Agro-industrial complex]. Available at: https://cctmcx.ru/monitoring-zemel/state_land/ (accessed: 24 February 2023).
10. Wójciak E., Cienciała A. Selected methods and factors in the reliable appraisal of agriculturally used real estates. *GIS Odyssey Journal*, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 99–112.
11. Forys I., Putek-Szeląg E. A non-classical model of mass valuation of agricultural property. *Real Estate Management and Valuation*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 90–101.
12. *Doklad o sostoyanii i ispolzovanii zemel selskookhozyaystvennogo naznacheniya Rossiyskoy Federatsii v 2019 godu* [Report on the state and use of agricultural lands of the Russian Federation in 2019]. Moscow, Rosinformagrotech Publ., 2021. 404 p.

13. Federalny zakon № 101 ot 16.07.1998 «O gosudarstvennom regulirovani bespecheniya plodorodiya zemel sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya» [Federal Law no. 101 of 16.07.1998 «On state regulation of ensuring the fertility of agricultural land»]. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Legislation of the Russian Federation], No. 29, 20.07.1998.
14. Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 154 ot 02.02.2023 «O poryadke vedeniya gosudarstvennogo reestra zemel sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya» [Resolution of the Government of the Russian Federation no. 154 of 02.02.2023 «On the procedure for maintaining the State Register of agricultural lands»]. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Legislation of the Russian Federation], No. 6, 06.02.2023.
15. *GIS Agroekolog. Agroekolog* [GIS Agroecologist. Agroecologist]. Available at: <https://agroecolog.ru/Agrochim31/Default.aspx#/> (accessed: 24 February 2023).
16. Volkov S.N., Shapovalov D.A. Digital land management – problems and prospects. *Interexpo Geo-Siberia*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 26–35. In Rus.
17. *Otraslevye dokumenty strategicheskogo planirovaniya. Pravitelstvo Rossii* [Sectoral strategic planning documents. The Government of Russia]. Available at: <http://government.ru/rugovclassifier/625/events/> (accessed: 24 February 2023).
18. Hermans L. Implementation of geographically weighted regression in automated valuation models in the Netherlands. *Journal of Property Tax Assessment & Administration*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 23–48.
19. Jahanshiri E., Buyong T., Shariff A.R.M. A review of property mass valuation models. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 23–30.
20. Wang D., Li V.J. Mass appraisal models of real estate in the 21st century: a systematic literature review. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 24, 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11247006>.
21. Tavares V.C., Tavares F., Santos E. The value of farmland and its determinants – the current state of the art. *Land*, 2022, vol. 11, no. 11, 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11111908>.
22. Ayalke Z., Sisman A. Nominal land valuation with best-worst method using geographic information system: a case of Atakum, Samsun. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, vol. 11, no. 4, 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11040213>.
23. Jaroslaw J., Ertunc E. Towards a full automation of land consolidation projects: fast land partitioning algorithm using the land value map. *Land Use Policy*, 2022, no. 120. DOI: [10.1016/j.landusepol.2022.106282](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106282).
24. Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 1646 ot 10.10.2020 «O merakh po obespecheniyu effektivnosti meropriyatiy po ispolzovaniyu informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologiy v deyatelnosti federalnykh organov ispolnitelnoy vlasti i organov upravleniya gosudarstvennymi vnebyudzhethnymi fondami» [Resolution of the Government of the Russian Federation no. 1646 of 10.10.2020 «On measures to ensure the effectiveness of measures for the use of information and communication technologies in the Activities of Federal Executive authorities and management bodies of state extra-budgetary funds»]. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Legislation of the Russian Federation], No. 42 (3), 19.10.2020.
25. Wei C. The research development of hedonic price model-based real estate appraisal in the era of big data. *Land*, 2022, vol. 11, no. 3, p. 334–364.
26. Bidanset P.E., Rakow R. Survey on the use of automated valuation models (AVMs) in government assessment offices: an analysis of AVM use, acceptance, and barriers to more widespread implementation. *Property Tax Assessment & Administration*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 47–69.
27. Doumpos M., Papastamos D., Andritsos D., Zopounidis C. Developing automated valuation models for estimating property values: a comparison of global and locally weighted approaches. *Annals of Operations Research*, 2021, no. 306, pp. 415–433.
28. Studenkova N.A., Dobrotvorskaya N.I., Avrunen E.I., Kozina M.V. Actual issues of inventory and cadastral registration of agricultural lands. *Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 140–148. In Rus.

Received: 26 February 2023.

Reviewed: 6 March 2023.

Information about the authors

Maria V. Kozina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia A. Studenkova, senior lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building.

Darya E. Paltseva, master's degree student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.4; 549.905.1; 549.905.3+ 519.254; 519.257

ПОЛИМОДАЛЬНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ КАОЛИНИТОВ В ОТКРЫТЫХ СИСТЕМАХ ПЕСЧАНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Мельник Игорь Анатольевич¹,
melnik@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Многочисленные исследования форм распределений регистрируемых характеристик исследуемой среды по результатам преобразования открытых систем показали, что интенсивности и содержания преобразованных элементов имеют полиmodalную форму статистического распределения в случае внешнего воздействия на систему. По всей видимости, явление статистической полиmodalности преобразования систем носит универсальный характер. Поэтому универсальную теорию образования полиmodalного распределения можно использовать для анализа выборок содержаний вторичных минералов в проницаемых песчаных коллекторах, являющихся открытыми системами. Очевидно, что каждая мода полиmodalного статистического распределения преобразованных элементов будет представлять собой результат проявления некоего аттрактора.

Целью настоящей работы является представление универсальной кинематической теории формирования полиmodalного статистического распределения количества преобразованных элементов открытой системы, где в качестве сформированных элементов рассматриваются вторичные глинистые минералы – каолиниты, образованные в процессе наложенного эпигенеза в песчаном коллекторе.

Объектами исследования являются выборки величин интенсивности вторичной каолинитизации в песчаных интервалах нефтегазовых месторождений полуострова Ямал и содержаний вторичных каолинитов (определенных по керну) в верхнеюрских песчаных пластах Столбового нефтегазового месторождения. Процесс вторичной каолинитизации обусловлен влиянием глубинных флюидов.

Метод исследования был определен на основании полученного уравнения унифицированных мод полиmodalного распределения количества трансформирующих элементов (в процессе преобразования систем). Количество (интенсивность) преобразованных элементов пропорционально отношению времени преобразования системы к времени течения внешнего воздействия на элементы данной системы. Теоретически вычислены семь основных констант (аттракторов), связанных с «золотой» пропорцией, приведенных в соответствие с универсальными принципами состояний процессов преобразования систем.

Результаты. Сопоставив константы, полученные теоретическим путем, с вычисленными унифицированными величинами мод эмпирических данных, были определены состояния процессов преобразования системы относительно каждой моды. На основании анализа вычисляемых мод в полиmodalном распределении интенсивностей вторичной каолинитизации и содержаний каолинитов, а также при сопоставлении величины мод (с соответствующим принципом преобразования) с эмпирическими данными процессов преобразования, были получены подтверждения валидности универсальной кинематической теории.

Выводы. Таким образом, используя универсальные принципы преобразования, на основании определяемых содержаний вторичных каолинитов в исследуемых интервалах проницаемых пластов, можно выделять зоны с интересующими химическими и гидродинамическими свойствами и характеристиками.

Ключевые слова:

Полиmodalные статистические распределения, вторичные геохимические процессы, процессы наложенного эпигенеза, вторичная каолинитизация, аттрактор, геохимия, открытые системы, «золотая» пропорция.

Введение

Песчаный коллектор в литосфере Земли представляет собой открытую динамическую систему, элементы которой преобразуются вследствие внешнего воздействия поступающих глубинных флюидов. Под элементами рассматриваемой системы понимаются минералы, поры, трещины, флюиды и т. д. Преобразования аллотигенных минералов могут быть обусловлены процессом наложенного эпигенеза, приводящим к формированию таких вторичных минералов, как каолиниты, пириты и т. д. Причем статистические распределения интенсивностей данных процессов всегда полиmodalные [1]. Modalность распределения интенсивностей процессов преобразования породы-коллектора зависит от динамического режима (скорости) и от характера насыщения поступающего флюида, т. е. времени преобразования элементов системы [2].

Свойство полиmodalности интенсивностей количества преобразования проявляется во многих открытых системах. Например, авторы статьи [3] исследовали распределения биомассы и размеры биообъектов из экосистем разного масштаба: фитопланктона в озере, метазоев в ручье, членистоногих в лесах. Полиmodalное распределение размера биоты нескольких видов, конкурирующих за одну и ту же нишу, обусловлено компромиссом между воспроизводством и использованием ресурсов, являющемся причиной внутреннего резонанса, который может породить несколько мод. Когда конкуренция становится стохастической, и при уменьшении силы отбора ниже определенного порога, стационарное распределение становится полиmodalным. Сочетание местной конкуренции с глобальной миграцией занимает центральное место во многих экологических процессах. Стохастичность в конкуренции внешней биоты с внутренней в локальной экосистеме в определенных условиях (резонанса) приводит к обра-

зованию полиmodalного распределения размеров и масс биообъектов. В статье [4] приведены примеры полиmodalного распределения размеров улитки *Heleobia*, причиной данной формы статистического распределения является негативное влияние внешних паразитов на их репродукцию.

В работе [5] вероятностные графики распределения зерен осадочной породы в системе река–озеро по размерам показали, что большинство выборок являются полиmodalными, с тремя модами. Полиmodalное распределение размеров зерен в черноземах Северо-Восточного Китая в большей степени обусловлено ветровой эрозией почв и в меньшей степени – процессами заморозания-испарения и антропогенным влиянием [6]. В статье [7] проведенные экспериментальные исследования динамических характеристик оборудования грануляции микрокристаллической целлюлозы и моногидрата α -лактозы показали, что степень грануляции и размеры гранул сильно зависят от отношения скорости подачи порошка (сырья) к скорости крутящего момента шнека. Увеличение мод в распределении размеров гранул происходит при уменьшении скорости подачи порошка.

Полиmodalное распределение размеров частиц обусловлено созреванием многокомпонентных дисперсных систем с испарениями (фазовыми превращениями) внутри частиц [8]. Если внешнее давление сопоставимо (или несколько выше) с внутренним давлением насыщенного пара, то для малорастворимых нелетучих веществ образуются сложные статистические распределения.

Форма статистического распределения размеров частиц измельченной инструментальной стали становится более полиmodalной с увеличением времени измельчения и добавления в порошок карбида ванадия [9]. Увеличение разнообразия размеров частиц обусловлено увеличением количества частиц с меньшим диаметром. В работе [10] исследование гранулометрического состава песка (на острове Фишер) показало бимodalное статистическое распределение размеров, а именно песчинок крупного и среднего диаметра. Диаметры песчинок определяются фациальными условиями осадконакопления.

В статьях [11, 12] приводятся доказательства того, что мембранный холестерин модулирует полиmodalную трансдукцию агонистов, отек и температурные стимулы в радиальной глии сетчатки глаза. Подтверждается, что внешние манипуляции с липидным микроокружением являются причиной модуляции восприятия химических, осмотических и температурных стимулов, приводящих к полиmodalности.

В перечисленных работах в динамическом режиме исследуются открытые системы совершенно различной природы (физико-механические, биологические, физиологические, фациально-геологические и геохимические). Динамику всех систем можно охарактеризовать одним параметром – интенсивностью процесса преобразования среды. При этом регистрируемые количественные характеристики преобразованных элементов линейно связаны с параметром интенсивности исследуемого процесса. А формирование каждой мо-

ды в полиmodalном статистическом распределении интенсивности преобразования может характеризоваться универсальным режимом воздействия.

Поэтому целью настоящей работы является представление универсальной кинематической теории формирования полиmodalного статистического распределения количества преобразованных элементов открытой системы с её эмпирическим приложением при статистическом анализе вторичных минералов, обусловленных процессом наложенного эпигенеза в геологической системе. В рамках данной универсальной теории в качестве объектов исследования анализируются статистические распределения содержания каолинитов в образцах песчаных и алевролитистых пород юрского возраста Столбового нефтегазоносного месторождения, а также интенсивность процесса вторичной каолинитизации в песчаных коллекторах нефтегазовых месторождений полуострова Ямал.

Методы исследования

Внутренние преобразования любой открытой равновесной системы (химической, гидродинамической, геологической, географической, биологической и т. д.) происходят при поступлении внешних источников влияния, меняющих состояние системы. Рассмотрим элементарную структуру системы в единичном объеме (площади, отрезке), состоящую из единообразных элементов. Внутренние элементы преобразуются за определенное время (τ), равное отношению количества трансформировавшихся элементов к средней скорости трансформации состояний этих элементов. На рис. 1 показана принципиальная схема взаимодействия внешних элементов (2) с внутренними элементами (1) системы. Вероятность трансформации внутренних элементов характеризуется средним эффективным сечением взаимодействия (πr^2), энергией внешнего воздействия и внутренней энергией системы. Внешние элементы, пересекая пространство потенциального воздействия с определенной средней скоростью: $\langle L/\Delta t \rangle$ объем воздействия в пределах сферы радиуса r , вступают во взаимодействие с внутренними элементами системы.

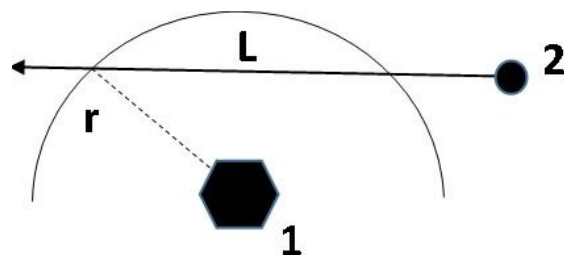


Рис. 1. Схема взаимодействия элементарной структуры системы (1) и внешнего источника (2), где r – радиус взаимодействия, L – длина пролета внешнего элемента

Fig. 1. Scheme of interaction between the elementary structure of the system (1) and the external source (2), where r is the interaction radius, L is the span length of the external element

Время пролета внешних элементов воздействия (t) отражает период воздействия внешней среды, а время

процесса взаимодействия с последующим преобразованием количественных *характеристик* элементов системы – внутреннее время трансформации (τ). Внутреннее время трансформации системы равно усреднённому времени изменения состояний всех взаимодействующих единообразных элементов системы. А время преобразования внутреннего элемента (соответственно и радиус взаимодействия) зависит от термодинамических, энергетических либо структурно-информационных характеристик системы и внутренних индивидуальных атрибутов преобразующихся элементов относительно характеристик внешних элементов влияния. В этом случае, если период времени пролета внешних элементов влияния окажется меньше периода времени взаимодействия с преобразованием внутренних элементов, вероятность трансформации элементов системы близится к нулю. Внутренние элементы не успевают контактировать необходимым образом с внешними элементами. Но, когда за время движения внешних элементов внутри пространства воздействия внешние элементы, взаимодействуя с внутренними компонентами системы, успевают осуществлять преобразование, т. е. представляют собой временную составную подсистему (с возможным дальнейшим процессом релаксации преобразования), вероятность процесса случайной трансформации самой системы стремится к единице. Это условие назовем *первым условием преобразования*:

$$\Delta t \leq \Delta \tau. \quad (1)$$

При внешнем воздействии на систему часть внешней энергии идет на структуризацию элементов системы (полезную работу), а часть – на повышение энтропии (тепло) и на вывод сопутствующих элементов из системы во внешнюю среду. Чтобы реализовалась трансформация системы, необходимо согласование определенных характеристик внешней и внутренней энергий. Вероятность (P) преобразования систем будет пропорциональна отношению усреднённой энергии внешнего воздействия (ΔE_t), совершающего работу структуризации, к внутренней энергии (E_t) систем, резонирующей (участвующей) в структурном формировании.

Для различных классов систем типы энергий и формы воздействий на систему будут различаться. Например, в термодинамической системе под ΔE_t понимается разность энергии (на входе и выходе), зависимость от внешнего давления и температуры, а под внутренней энергией – энтальпия. В свою очередь, энергия перехода (преобразования) квантовомеханической системы из одного энергетического состояния в другое пропорциональна ν – частоте поглощения, излучения квантов ($E = h\nu$, где h – постоянная Планка), т. е. обратно пропорциональна его периоду. Вероятность перехода элементов квантового ансамбля зависит от совокупности спонтанного влияния между собой внутренних элементов на собственные квантовые состояния и от характеристик внешних элементов. Однако вне зависимости от классов систем кинематические принципы их преобразования должны быть универсальны.

Эквивалентную вероятность преобразования систем (в случае её трансформации) можно записать в виде пропорции:

$$P \sim \frac{\langle \Delta E_t \rangle}{\langle E_t \rangle} \sim \frac{\langle \nu_t \rangle}{\langle \nu_\tau \rangle} \sim \frac{\langle \tau \rangle}{\langle t \rangle} \sim \frac{\Delta \tau}{\Delta t}.$$

Согласно закону Винера–Шеннона–Эшби управляющая (внешняя) система должна превосходить по сложности и мощности управляемую (внутреннюю) систему [13]. Если мощность внешнего фактора больше мощности внутреннего: $dE_t/dt > dE_\tau/dt$, то решением данного неравенства будет условие (1).

На основании закона сохранения полная сумма энергий до взаимодействия (E_0) равна сумме энергий после преобразования:

$$E_{t0} + E_{\tau 0} = E_t + E_\tau.$$

При $\nu_t = 1/t$ и $\nu_\tau = 1/\tau$ перепишем закон сохранения как:

$$\frac{1}{t_0} + \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{t} + \frac{1}{\tau}.$$

Преобразуя полученное равенство (при условии $t_0 > t$), получим следующую формулу:

$$P \sim \frac{\tau}{t} = \frac{t_0}{\tau_0} \frac{\Delta \tau}{\Delta t}. \quad (2)$$

Открытая система с определенными характеристиками трансформируется в результате поступления внешних элементов, тем самым элементы системы приобретают новые качества характеристик, зависящих от начальных значений (A_0), т. е. последующий процесс обусловлен предыдущим состоянием преобразования системы. В этом случае интенсивность процесса преобразования открытых систем будет соответствовать условной, двумерной вероятности трансформации системы – элементы системы преобразуются в последующие при условии существования внутренних элементов с характеристиками, соответствующим характеристикам внешних элементов. Согласно равенству (2) вероятность процесса (A) преобразования открытых систем (либо случайных квантовых событий) эквивалентна вероятности образования новых элементов и, соответственно, её условной интенсивности (i), равной отношению внутреннего периода преобразования системы к периоду времени течения внешнего воздействия. Отношение времен преобразования и течения характеризует вероятность трансформации систем.

Получается, что I – относительная интенсивность процесса преобразования открытых систем как на макро, так и на микроуровне, пропорциональна двумерной вероятности ($P(A; A_0)$) и подобна условной вероятности ($P(A|A_0) = P(A; A_0)/P(A_0)$), соответственно, отношению разниц временных параметров:

$$I \sim P(A; A_0) \sim P(A | A_0) \sim i \equiv \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \leq 1.$$

До настоящего преобразования в реальном времени существующие элементы открытой системы трансформировались из начальных элементов с начальными входными временными параметрами: τ_0

и t_0 . Поэтому разница временных параметров будет определяться как:

$$\Delta\tau = \pm(\tau - \tau_0) \text{ и } \Delta t = \pm(t - t_0), \text{ где } \tau_0 \leq t_0; \tau \leq t. \quad (3)$$

Определим интенсивность предыдущего преобразования начальных элементов:

$$i_0 = \frac{\tau_0}{t_0} \leq 1. \quad (4)$$

Интенсивность процесса преобразования системы в реальном времени необходимо определять относительно i_0 , потому что интенсивность настоящего преобразования системы условна и зависит от начальных временных параметров предыдущей трансформации элементов системы:

$$I = q \frac{t_0}{\tau_0} \frac{\Delta\tau}{\Delta t}, \quad (5)$$

где q – коэффициент пропорциональности.

Устойчивость либо динамическое равновесие процесса преобразования системы (5) при определенных (1), (3), (4) допустимы на основании *второго условия трансформации*:

$$\Delta\tau\Delta t = t_0\tau_0. \quad (6)$$

Преобразуя равенство (6), можно получить следующую зависимость:

$$\frac{t_0}{\tau_0} = \frac{t}{\tau} - \frac{t}{\tau}.$$

Далее, подставив данную зависимость в уравнение (5) и определив производную функции $dI(\tau)/d\tau \sim t/\tau^2$, мы получили отношение, согласно которому выполняется условие устойчивости по Ляпунову:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} I(\tau) = 0.$$

Устойчивостью процесса преобразования систем называют его свойство инвариантности параметров, характеризующих тип трансформации.

Соотношения временных параметров двухпараметрической системы могут различаться с точки зрения существования одного либо двух переменных. В этом случае и состояния процессов реорганизации систем будут различаться. Поэтому возникает необходимость во введении понятия «*состояние процесса*» преобразования элементов и характеристик системы.

Под *состоянием процесса* (не объекта) преобразования системы понимаются устойчивые значения относительных переменных временных параметров (периодов) преобразования элементов системы и пролета внешних компонентов воздействия на данные элементы. Состояние процесса определяется в векторном пространстве независимых временных координат.

При одной переменной градиент интенсивности процесса преобразования системы может быть *пропорционален* только градиенту времени потока внешних элементов либо градиенту времени внутреннего преобразования системы. Причиной преобразования является внешнее воздействие, обладающее определенным пространственным направлением. Все про-

странственные структурные изменения системы направлены данному внешнему потоку.

Пропорциональное состояние процесса – это такое состояние, когда в двухпараметрической системе только один параметр может быть переменным (например, Δt), а изменение интенсивности преобразования ($I(\Delta t)$) пропорционально изменению соответствующего параметра ($\Delta\tau/\Delta t \sim I(\Delta t)$), причем второй параметр ($\Delta\tau$) остается постоянным (либо наоборот: Δt – постоянный, а $\Delta\tau$ – переменный).

Для пропорционального состояния частные производные интенсивности (5) по времени будут соответствовать следующим значениям:

$$\frac{\partial I(\Delta t)}{\partial(\Delta t)} = -\frac{Q\Delta\tau}{\Delta t^2}, \quad (7)$$

либо

$$\frac{\partial I(\Delta\tau)}{\partial(\Delta\tau)} = \frac{Q}{\Delta t} = \text{const}. \quad (8)$$

Параметр $Q = qt_0/\tau_0$. Согласно полученным зависимостям пропорционального состояния (7), (8), изменение интенсивности процесса преобразования системы связано только с квадратом переменного параметра (Δt) внешнего воздействия.

Непропорциональное состояние процесса – это такое состояние, когда в двухпараметрической системе переменными являются одновременно два параметра. Для того чтобы соблюдалось условие (6) при изменении периода Δt , необходимо либо обратно-пропорциональное изменение периода $\Delta\tau$ относительно Δt , либо прямо-пропорциональное изменение произведения времен t_0 и τ_0 относительно левой части равенства.

Первый случай соответствует непропорциональному состоянию процесса, а второй – пропорциональному изменению интенсивности только в пространстве, потому что начальные временные параметры относятся к прошлым событиям и их производные по реальному времени равны нулю. Для того чтобы реализовались как пропорциональные, так и непропорциональные состояния процессов на основании равенства (6), необходимо ввести их в условие стабилизации:

$$\frac{\Delta t \Delta \tau}{t_0 \tau_0} = \text{const}. \quad (9)$$

Стабильным состоянием преобразования называют процесс, при котором сохраняются постоянными во времени либо по пространству характеристики и законы распределения погрешностей параметров данного процесса. Величина постоянной меняется в зависимости от типа преобразования. Если в природе проявляются стабильные состояния, то должны реализовываться и мобильные.

Мобильное состояние процесса преобразования – это такое состояние, когда не выполняются условия стабилизации, т. е. левая часть равенства (9) не является постоянной величиной. В этом случае устойчивость преобразования (6) система приобретает только при пропорциональном состоянии процесса.

На основании базовых углов определим ещё три угла, являющих собой состояния одномерного воздействия:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{ПС}} &= \cos(\gamma - \gamma) = 1,0; \\ \lambda_{\text{ПМ}^*} &= \cos(\gamma - \beta) = 0,973\dots; \\ \lambda_{\text{НС}^*} &= \cos(\gamma - \alpha) = 0,912\dots\end{aligned}\quad (15)$$

Если постоянное либо циклическое воздействие внешнего доминирующего (d) фактора на процесс преобразования элементов системы имеет некое пространственное анизотропное направление и в тоже время может возникать некое переменное влияние на систему от другого источника, необходимо ввести еще одну независимую альтернативную переменную Δt_a – период времени внешних альтернативных элементов влияния. Следовательно, после введения еще одной ортогональной временной координаты t_a получаем трехмерную систему координат $t_d t_a$. Поворот плоскости $t_d t_a$ в конечную фазу ПМ или НС увеличивает величину вектора состояния и интенсивность рассматриваемого процесса (15). В итоге получаем следующие угловые координаты, отражающие двухмерное воздействие:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{ПМ}} &= \cos(\gamma - \beta) \cos(\gamma - \alpha) = 0,947\dots; \\ \lambda_{\text{НС}} &= \cos(\gamma - \beta) \cos(\gamma - \alpha) = 0,887\dots\end{aligned}\quad (16)$$

Каждая мода соотносится с нормальным статистическим распределением которое характеризуется его стандартным отклонением ($\sigma \approx 2-3\%$ от μ). Математическое ожидание нижнего граничного значения, т. е. состояния ПС, будет равно:

$$\mu_{\text{ПС}} = j \pm \sigma. \quad (17)$$

На основании (16) два состояния (двухмерные) интенсивностей процессов (как и два предыдущих, одномерных) соответствуют следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{ПМ}} &= \mu_{\text{ПС}} / \lambda_{\text{ПМ}}, \\ \mu_{\text{НС}} &= \mu_{\text{ПС}} / \lambda_{\text{НС}}.\end{aligned}\quad (18)$$

В итоге, используя следующие зависимости (13), (14), (17), (18), получили статистический комплекс мод, соответствующий интенсивностям процессов пяти состояний преобразования систем, связанных в единое целое. В свою очередь, следующий комплекс мод будет соотноситься с другим нижним значением. Первоначальное состояние (k) преобразуется в последующее ПС-состояние по закону:

$$\mu_{\text{ПС}}^{k+1} = \mu_{\text{ПС}}^k / \Psi. \quad (19)$$

Величины постоянной преобразования базовых состояний Ψ будут различны для доминирующего (d) и альтернативного (a) внешнего потока. Доминирующий поток – это внешний поток, который действует постоянно либо циклично (во всей системе), а альтернативный поток – это локальный поток воздействия, который проявляется не всегда и не везде. В системе временных координат вектор состояния ПС преобразуется в промежуточное состояние ПС* с последующим поворотом плоскости на косинус углов НС₆ или ПМ₆. В итоге получаем константы отношений косинусов базовых углов:

$$\begin{aligned}\Psi_d &= \cos \gamma / \cos \alpha = 0,757\dots; \\ \Psi_a &= \cos \gamma / \cos \beta = 0,831\dots\end{aligned}\quad (20)$$

Таким образом, разрешенные состояния процессов, их дискретность обусловлены угловыми координатами устойчивых (базовых) состояний процессов преобразования в системе временных координат, а инвариантность мод распределения интенсивности процессов – числами «золотой» пропорции при вычислении углов устойчивых состояний процессов преобразования. Очевидно, что дискретные состояния процессов при структуризации систем представляют собой аттрактор. Математические ожидания мод в распределении первого блока интенсивностей устойчивых процессов и их углы дискретных состояний, вычисленных по формулам (12)–(20), приведены в табл. 1.

Следующие моды второго блока определяются относительно одной из мод: ПС(2) (d , либо a).

Моды в полиmodalном статистическом распределении интенсивностей представляют собой экстремумы с величинами унифицированных интенсивностей, приведенных в табл. 1.

Для вычисления величин математических ожиданий (мод) в статистической гистограмме плотности вероятности исследуемой выборки количественных значений было определено универсальное уравнение унифицированных мод для процессов преобразования открытых систем [15]:

$$\mu_{\text{мод}} = \exp \left[\frac{G_{\text{мод}} - C}{\chi} \right] - 1, \quad (21)$$

где $G_{\text{мод}} = \frac{n_{\text{мод}}}{\langle n \rangle}; \frac{I_{\text{мод}}}{\langle I \rangle}$, т. е. относительные величины

любых измеряемых выборочных значений, соответствующих положению мод: $n_{\text{мод}}$ – содержанию преобразованных элементов, $I_{\text{мод}}$ – интенсивностям процессов преобразования элементов, измеряемых характеристик элементов системы на уровне мод; $\langle n \rangle$ и $\langle I \rangle$ – средневзвешенные значения соответствующих величин; $C = -3,5$, а χ лежит в пределах $12 \div 14$. Для каждой генеральной выборки систем различной природы преобразования среды в гистограмме распределения измеряемого значения константа χ в уравнении (21) определяется в случае соответствия математического ожидания моды $j = \mu_{\text{ПС}} = 0,3819$ минимальной (первой либо в редком случае второй) моде. В этом случае формула вычисления χ выглядит так:

$$\chi = \frac{G_{\text{мод}}(1) + 3,5}{0,3235}.$$

Интенсивность процесса вторичной каолинитизации в песчаных породах определялась по методу статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин [16]. В результате процесса вторичной каолинитизации песчаных интервалов между выборками пористости и глинистости наблюдается положительная корреляция. На основании разработанного метода интенсивность процесса преобразования равна произведению коэффициента аппроксимации (между двумя выборками)

и интервального параметра выборочных значений материалов геофизических исследований скважин.

Содержание каолинитов устанавливалось по методу О.А. Черникова с применением микроскопического анализа шлифов песчано-алевролитовых пород

[17], где определение количества минералов на единице площади поверхности шлифа в интервале [0–0,99 %] проводилось с погрешностью $\pm 0,06$ %, а в интервале [1–10 %] – $\pm 0,09$ %.

Таблица 1. Математические ожидания и углы унифицированных дискретных состояний статистических распределений интенсивностей процессов преобразования систем

Table 1. Mathematical expectations and angles of unified discrete state statistical distributions of intensities of transformation processes of systems

Состояния States	Угол, (λ) рад. Angle, (λ) rad.	Математические ожидания, (μ) усл. ед. Mathematical expectations, (μ) conditional units	Описание принципа состояния процесса Description of the principle of the process state
ПС/PS	1	0,382	Начальное равновесное состояние процесса Initial equilibrium state of the process
ПМ*/PM*	0,973	0,392	Уменьшение времени воздействия внешнего доминирующего фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы относительно равновесного состояния процесса Reducing the exposure time of the external dominant factor, or increasing the transformation time of the internal system relative to the equilibrium state of the process
ПМ/PM	0,947	0,403	Уменьшение времени течения внешнего фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы под действием доминирующего и альтернативных источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reducing the flow time of an external factor, or increasing the transformation time of the internal system under the action of the dominant and alternative sources of influence, relative to the equilibrium state of the process
НС*/NS*	0,912	0,418	Уменьшение времени воздействия внешнего доминирующего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы относительно равновесного состояния процесса Reducing the time of influence of the external dominant factor and a proportional increase in the transformation time of the internal system relative to the equilibrium state of the process
НС/NS	0,887	0,43	Уменьшение времени воздействия внешнего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы включительно под действием доминирующего и альтернативного источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reduction of time of influence of an external factor and a proportional increase of time of transformation of the internal system inclusive under the action of dominant and alternative sources of influence relative to the equilibrium state of the process
ПС(2)а/PS(2)а	0,831	0,459	Равновесное состояние процесса в альтернативном внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the alternative external flow relative to the initial equilibrium state of the process
ПС(2)д/PS(2)д	0,757	0,504	Равновесное состояние процесса в доминирующем внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the dominant external flow relative to the initial equilibrium state of the process

Результаты исследования

Содержания глинистых минералов в песчаной породе контролируются реакциями стадийного и наложенного эпигенезов. Принципиальным отличием процесса наложенного эпигенеза от стадийного является пространственная зональность вторичной каолинитизации в результате углекислотного метасоматоза алюмосиликатных компонентов, обусловленного поступлением в коллектор кислых глубинных флюидов с pH=4–5 [18]. В этом случае, в отличие от стадийного эпигенеза, при наложенном эпигенезе статистические распределения интенсивностей вторичных процессов при вертикальном и латеральном исполнении будут различаться.

На рис. 3 показаны две гистограммы усредненных данных интенсивностей процесса вторичной каолинитизации в песчаных пластах мезозоя на территории двух нефтегазовых месторождений полуострова Ямал. Вторичная каолинитизация, как правило, реализуется в флюидопроницаемых пластах песчаной породы в результате углекислотного метасоматоза при геохимическом процессе наложенного эпигенеза. Эмпирические данные интенсивностей процессов каолинитизации 70-ти пластов в 55-ти скважинах усреднялись по пластам (пунктирная кривая) и по скважинам. Моды вычислялись согласно уравнению (21). Построены две гистограммы, подтверждающие, во-первых, что вторая мода «по пластам» ($\mu_n=0,418$, состояние НС*) отличается от второй, двумерной моды «по скважинам» ($\mu_c=0,43$, состояние НС), во-

вторых, присутствие моды ПС(2)d ($\mu_{\text{п}}=0,493$) в «скважинной» гистограмме и её отсутствие в «пластовой», но присутствие двух близкорасположенных данных ПС(2)a ($\mu_{\text{п}}=0,457$; $\mu_{\text{с}}=0,468$). Перечисленные различия объясняются тем, что, усредняя интенсивности вторичных процессов по пластам, мы получаем наиболее вероятную связь интенсивности только с латеральным (альтернативным) влиянием флюида (доминантное влияние нивелируется), в отличие от «скважинной» гистограммы, где присутствуют два источника воздействия. Это связано с тем, что вертикальная скважина всегда находится на каком-либо латеральном расстоянии от вертикального канала фильтрации.

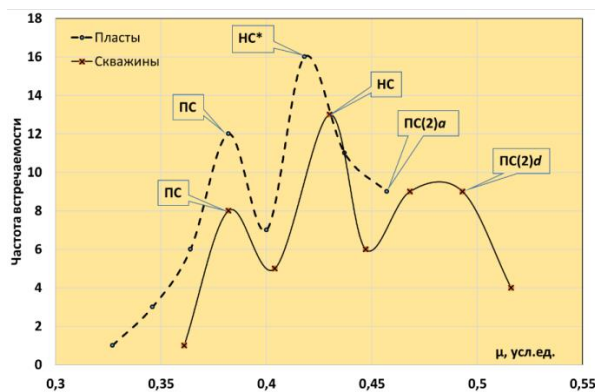


Рис. 3. Гистограммы мод, усредненных по пластам (пунктирная линия) и по скважинам унифицированных интенсивностей вторичной каолинитизации в песчаных интервалах нефтегазовых месторождений полуострова Ямал

Fig. 3. Histograms of modes averaged by strata (dashed line) and by wells of unified secondary kaolinitization intensities in sandy intervals of oil and gas fields of the Yamal Peninsula

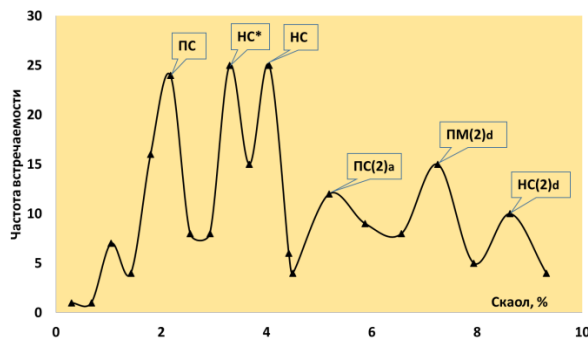


Рис. 4. Гистограмма полиmodalного статистического распределения содержания каолинитов в песчаных и алевритистых породах верхнеюрских отложений Столбовой площади

Fig. 4. Histogram of the polymodal statistical distribution of kaolinite content in sandy and siltstone rocks of the Upper Jurassic deposits of the Stolbovaya area

В свою очередь, с целью эмпирического подтверждения полиmodalности статистического распределения содержания каолинитов и соответствия их мод вычисленным константам (табл. 1) был проведен статистический анализ выборки данных содержания ка-

олинитов ($C_{\text{као}}$) для 210 образцов керна песчаных пород верхнеюрского горизонта Столбового нефтегазового месторождения. Чтобы получить гистограмму с ярко выраженными модами, генеральную выборку содержания каолинитов разделили на две группы – 0,3–4,4 и 4,5–10 %. Две гистограммы объединили в одну – шестимодальную (рис. 4). Далее, используя уравнение (21) относительно моды содержания каолинитов в нижнем граничном значении ПС – 2,175 %, вычислили остальные пять мод при средневзвешенном $\langle n_{\text{као}} \rangle = 4$ % и $\chi = 12,49$ (табл. 2). Образцы керна в десяти скважинах отбирались с одного горизонта (Ю_1).

На рис. 4 моды группы состояний процессов ПМ отсутствуют. Очевидно, это связано с тем, что при поступлении глубинных гидротерм в ПС-интервал резко меняется кислотно-щелочной баланс среды данного интервала в коллекторе, а это возможно только в состоянии НС.

Анализ результатов, занесенных в табл. 2, показал, что величины мод прямо пропорциональны усредненной песчаности с коэффициентом корреляции +0,99. К тому же величины мод нелинейно зависят от усредненной глубины залегания образцов керна, при обратном линейном тренде коэффициент корреляции равен –0,62. Глубины залегания образцов определялись только в тех интервалах скважин, которые встречаются во всех состояниях мод. Корреляционные зависимости содержания каолинитов с пиритами выявили положительную регрессию только для состояний процессов ПС(2)a и ПМ(2)d (рис. 5). В свою очередь, определились регрессии между выборками содержаний каолинитов с биотитами для состояний НС*, ПС(2)a и ПМ(2)d (табл. 2).

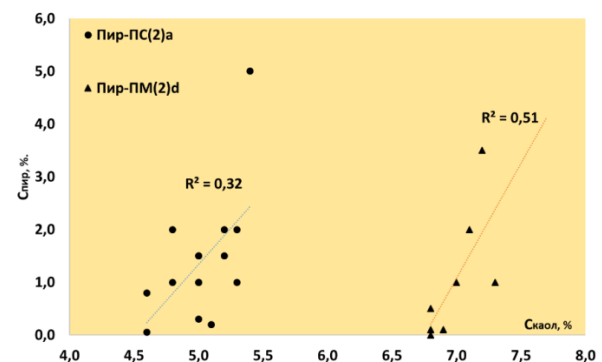


Рис. 5. Сопоставления содержаний пиритов ($S_{\text{пир}}$) с каолинитами ($S_{\text{као}}$) для состояний процессов ПС(2)a и ПМ(2)d

Fig. 5. Comparisons of the pyrite (S_{pir}) and kaolinite (S_{cao}) contents for the states of the PS(2)a and PM(2)d processes

В табл. 2 коэффициенты корреляции (R) между выборками определялись по совокупности содержаний каолинитов в рамках интервалов каждой моды. Например, для состояний НС – $C_{\text{као}} = [3,8-4,2]$ % и НС* – $C_{\text{као}} = [3,0-3,5]$ %.

Таблица 2. Эмпирические данные состояния процесса каолинитизации на основании петрографического исследования керна Столбового месторождения

Table 2. Empirical data on the state of the kaolinization process based on petrographic study of core from the Stolbovoe deposit

Состояние States	Скаоил, % Kaolinite content, %	м, усл. ед. Moda, conditional units	R(каоил/пирит) Correlation coefficient between kaolinite and pyrite	R(каоил/биотит) Correlation coefficient between kaolinite and biotite	Песчанность, д. ед. Sandiness, e. g.	Усредненная глубина залегания, м Average depth of occurrence, m
ПС	2,17	0,382	нет/по	нет/по	0,45	2625,0
НС*	3,30	0,414	нет/по	+0,6	0,53	2621,5
НС	4,05	0,430	нет/по	нет/по	–	2615,0
ПС(2)а	5,18	0,468	+0,57	+0,78	0,60	2627,0
ПМ(2)д	7,25	0,530	+0,71	–0,84	0,70	2609,0
НС(2)д	8,63	0,570	–	–	–	–

Обсуждение результатов

При исследовании интенсивностей вторичных преобразований песчаных пластов в разрезах скважин, определив интенсивности в 10–30 глубинных пластах и в десятках скважинах на изучаемой площади, можно построить два типа гистограмм в зависимости от латеральной либо вертикальной миграции флюидов. Для этого, усредняя данные интенсивности исследуемых горизонтов (пластов) по скважине, мы получаем выборку (по количеству скважин) закономерности латерального распределения флюида и, наоборот, усредняя скважинные данные интенсивностей по пластам, мы получаем закономерности вертикального распределения (по количеству исследуемых пластов) всего разреза (рис. 3). В этом случае источником и причиной миграции флюидов являются глубинные вертикальные каналы фильтрации, а латеральное течение по сути вторично. Поэтому вертикальное распределение будет отражать доминирующий поток, а латеральная гистограмма – альтернативный внешний фактор. В первом случае в распределении интенсивностей кроме моды № 6 появится мода № 7 (табл. 1), а во втором случае – только мода № 6, относительно которых определяются последующие моды данных гистограмм.

Содержания каолинитов в песчаной породе прямо пропорциональны интенсивностям процесса вторичной каолинитизации [15, 16]. Полиmodalная форма распределения содержания каолинитов доказывает их вторичность – образованы в результате процесса наложенного эпигенеза (рис. 4). Каждая мода будет соответствовать состояниям процессов, описанных в табл. 1.

Высокая положительная корреляция песчаности с величинами мод каолинитизации (табл. 2) подтверждает то, что с увеличением проницаемости с соответствующей скоростью фильтрации потока флюида (уменьшается Δt) увеличивается интенсивность процесса преобразования породы, соответственно, и содержание вторичных минералов.

Интересны зависимости величин мод от усреднённых глубин залегания образцов керна. Состояния ПС и ПС(2)а расположены в нижней части исследуемых интервалов (до глубины 2625 м), причем ПС – в низкопроницаемой зоне, а ПС(2)а – в нижней зоне, с относительно высокой проницаемостью породы, что и соответствует теоретическим данным табл. 1. Остальные динамические состояния НС*, НС и ПМ(2)д расположились сверху, в зависимости от степени проницаемости песчаной породы, с соответствующим влиянием динамики внешнего флюида на интенсивность преобразования среды.

При изучении корреляционных связей (парагенез) содержания каолинитов с пиритами, были обнаружены положительные регрессии только для двух состояний: ПС(2)а и ПМ(2)д. Согласно монографии Б.А. Лебедева, благодаря растворению CO_2 в воде при поступлении глубинной гидротермальной смеси в коллекторе образуется кислая среда с $\text{pH}=4-5$ [18]. В этом случае алюмосиликаты (мусковит, калиевый полевой шпат, слюда и т. д.) преобразуются в каолинит с углекислотой и катионами в растворе. Пириты при этой же кислотности (и температуре ниже 100 °С) в растворе среды непосредственно образуются в смеси из раствора (через стадию гидротроилитизации) с высокой скоростью [19]. Получается, что условиями парагенеза рассматриваемых минералов являются соответствующая постоянная кислотность раствора и присутствие потока внешнего флюида с относительно высокой скоростью. Причем скорость потока может быть как переменная, так и постоянная, что полностью соответствует данным состояниям (пропорциональным: ПС(2), ПМ(2)) процессов, рассмотренных в табл. 2 (рис. 5).

Биотиты, в отличие от сульфидов, в большей степени являются не столько метаморфическими, сколько магматическими минералами, т. е. могут входить в матрицу песчаника [20]. В результате поступления внешних кислых флюидов (с постоянной $\text{pH}=4-5$) матрица песчаника растворяется, аллотигенные биотиты преобразуются во вторичные каолиниты, а часть компонентов матрицы выносится, следовательно, содержания биотитов будут обратно пропорциональны содержанию каолинитов. Данные преобразования возможны при состоянии процесса ПМ(2)д, так как в этом случае при постоянной кислотности переменная повышенная скорость фильтрации позволяет выносить из системы растворенные компоненты матрицы с различной скоростью, что соответствует условию изменяемой интенсивности преобразования породы.

Положительные регрессии выборочных данных содержаний каолинитов с биотитами, осуществляемые только в состояниях ПС(2)а и НС*, объясняются следующим образом: во-первых, данные состояния тождественны условию стабилизации (9); во-вторых, при $\Delta t/\Delta t=\text{const}$ изменение содержания вторичных, аутигенных каолинитов должно быть прямо пропорционально изменению содержания аллотигенных биотитов в пространстве (по глубине: $dI \sim dQ$); в-третьих, рассматриваемые состояния характеризуются

ются постоянной скоростью потока флюида, в отличие от состояний ПС, НС и ПМ.

При состояниях процессов преобразования ПС и НС исследуемые корреляции не проявили себя вследствие того, что ПС – состояние застойной водной среды либо движущего флюида со сверхнизкой скоростью, а НС и ПМ – состояния с переменным альтернативным внешним влиянием. Отсутствие эмпирических данных состояния НС(2)д объясняется малой выборкой.

Заключение

Согласно представленной универсальной кинематической теории преобразования открытых систем были вычислены константы, связанные с «золотой» пропорцией, соответствующие величинам мод в унифицированных полиmodalных статистических распределениях количества преобразованных элементов. Каждая из семи универсальных мод соотносится с определенным уникальным принципом состояния процесса преобразования элементов систем. Интенсивность трансформации элементов открытой системы подчиняется закону отношения двух периодов: времени преобразования системы к времени течения (воздействия) на элементы данной системы. В настоящей работе в качестве открытой системы рассмотрен песчаный коллектор верхнеюрского возраста Столбового нефтегазового месторождения. Преобразованными элементами системы явились содержания таких вторичных аутигенных минералов, как каолиниты, пириты и группы аллотигенных филлосиликатных минералов – биотитов, определенных по керну. Проводились исследования распределения интенсивностей процесса каолинитизации в песчаных пластах мезозоя различных нефтегазовых месторождений полуострова Ямал. Источником процессов преобразова-

ния породы коллектора являются глубинные флюиды, поступающие по проницаемым зонам литосферы.

Итак, на основании результатов проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Статистические распределения интенсивностей (содержаний) преобразованных элементов открытой системы песчаного коллектора в процессе наложенного эпигенеза всегда будут иметь полиmodalную форму.
2. Вычисленные величины мод полиmodalного распределения интенсивностей и содержаний вторичных каолинитов (в песчаной породе коллектора), после унификации распределения относительно первой моды, полностью соответствуют теоретически определенным константам (аттракторам), являющимся показателем состояний процессов преобразования.
3. Modalности состояний процессов каолинитизации в песчаных коллекторах вдоль скважин и по латерали отличаются в соответствие с законами гидродинамического распределения потока глубинных флюидов – мода «скважинной» интенсивности соотносится с двумя потоками: вертикальным (доминирующим) и латеральным (альтернативным); а мода интенсивности «по латерали» – только с альтернативным потоком.
4. Получив совокупность интенсивностей процессов либо содержаний вторичных элементов (минералов) некой открытой геологической системы и вычислив моды в полиmodalном распределении данной выборки, можно привести в соответствие содержания минералов с процессами их образования и, таким образом, на их основании в исследуемых интервалах пласта выделить зоны с интересующими свойствами и характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельник И.А. Соотношение временных параметров геохимического процесса наложенного эпигенеза и «золотое сечение» // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 5. – С. 30–39.
2. Мельник И.А. Полиmodalность гистограмм геологических характеристик как критерий флюидодинамики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 66–74.
3. Lamperta A., Tlustý T. Resonance-induced multimodal body-size distributions in ecosystems. – 2013. – V. 110. – № 1. – P. 205–209. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1211761110> (дата обращения 30.03.2023).
4. Merlo M.J., Parietti M., Etchegoin J.A. Long-term study of the life cycle of the freshwater snail *Heleobia parchappii* (Mollusca: Cochliopidae) in a lentic environment in Argentina. – 2016. – V. 35 (1). – P. 49–60. DOI: 10.23818/limn.35.04 URL: <https://www.limnetica.com/es/long-term-study-life-cycle-freshwater-snail-heleobia-parchappii-mollusca-cochliopidae-lentic> (дата обращения 30.03.2023).
5. Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments // The Journal of Geology. – 1978. – V. 86. – № 4. – P. 411–421. URL: <https://doi.org/10.1086/649710> (дата обращения 30.03.2023).
6. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in Northeast China / Binghe Yan, Yulan Zhang, Shuying Zang, Qiang Chen, Li Sun // Sustainability. – 2021. – V. 13. – № 7. URL: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (дата обращения 30.03.2023).
7. Mendez Torrecillas C., Halberta G.W., Lamprou D.A. A novel methodology to study polymodal particle size distributions produced during continuous wet granulation // International Journal of Pharmaceutics. – 2017. – V. 519. – P. 230–239. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517317300248?via%3Dihub> (дата обращения 30.03.2023).
8. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of Bi-and Polimodal distributions and the Nonostwald behavior of Disperse System // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – V. 92. – № 5. – P. 1191–1200.
9. Analysis of milling efficiency of the Vanadis 8 tool steel with additions of vanadium and molybdenum carbides / E.L. Barbedoa, P.H. Gonçalves, M.S. Lamoglia, A.M.P. Pontesa, B.H. B. Kuffner, G.F. Gomesa, G. Silva // Materials Research. – 2021. – V. 24. – № 5. URL: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0054> (дата обращения 31.03.2023).
10. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica / Rajesh Asthana, Prakash Kumar Shrivastava, Hari Bahadur Srivastava, Mirza Javed Beg, Pradeep Kumar // Advances in Polar Science. – 2013. – V. 4. – № 24. – P. 281–295. URL: <http://journal.polar.org.cn/EN/10.3724/SP.J.1085.2013.00281> (дата обращения 31.03.2023).
11. Cholesterol regulates polymodal sensory transduction in Müller glia / Lakk M., Yarishkin O., Baumann J.M., Iuso A., Krizaj D. // Glia. – 2017. – V. 65. – P. 2038–2050. DOI: 10.1002/glia.23213
12. Polymodal TRPV1 and TRPV4 sensors colocalize but do not functionally interact in a subpopulation of mouse retinal ganglion cells / M. Lakk, D. Young, J.M. Baumann, A.O. Jo, H. Hu,

- D. Križaj // *Frontiers*. – 2018. – V. 12. DOI: 10.3389/fncel.2018.00353 URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncel.2018.00353/full> (дата обращения 31.03.2023).
13. Tabilo Alvarez J., Ramirez-Correa P. A brief review of systems, cybernetics, and complexity // *Complexity*. – 2023. – V. 2023. URL: <https://doi.org/10.1155/2023/8205320> (дата обращения 30.03.2023).
14. Stakhov A. Numeral systems with irrational bases for mission-critical applications. – December 2017. – P. 284. URL: <https://doi.org/10.1142/10671> (дата обращения 31.03.2023).
15. Мельник И.А. Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. – М.: РУСАЙНС, 2022. – 76 с.
16. Мельник И.А. Статистическая интенсивность процессов преобразования открытых геологических систем на основе геофизических данных // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2022. – № 4. – С. 22–27.
17. Черников О.А. Литологические исследования в нефтепромысловой геологии. – М.: Недра, 1981. – 236 с.
18. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
19. Исследование механизма образования пирита в водных растворах при низких температурах и давлениях / С.В. Козеренко, Д.А. Храмов, В.В. Фадеев, А.М. Калинин, И.Н. Маров, Г.А. Евтикова, В.С. Русаков // *Геохимия*. – 1995. – № 9. – С. 1553–1565.
20. Mineral chemistry of Ti-rich biotite from pegmatite and metapelitic granulites of the Kerala Khondalite Belt (southeast India): Petrology and further insight into titanium substitutions / B. Cesare, M. Satish-Kumar, G. Cruciani, Sh. Pocker, L. Nodari // *American Mineralogist*. – 2008. – V. 93. – P. 327–338. DOI:10.2138/am.2008.2579

Поступила: 05.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 20.06.2023 г.

Информация об авторах

Мельник И.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.4; 549.905.1; 549.905.3+ 519.254; 519.257

POLYMODALITY OF SECONDARY KAOLINITE DISTRIBUTION IN OPEN SANDY RESERVOIR SYSTEMS

Igor A. Melnik¹,
melnik@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Numerous studies of the forms of distributions of the registered characteristics of the investigated environment according to the results of transformation of open systems have shown that the intensities and contents of transformed elements have a polymodal form of statistical distribution in the case of external impact on the system. Apparently, the essence of the phenomenon of statistical polymodality of transformation of systems is universal. Therefore, the universal theory of polymodal distribution formation can be used to analyze samples of secondary mineral contents in permeable sand reservoirs, which are open systems. Obviously, each mode of the polymodal statistical distribution of the transformed elements will be the result of the manifestation of some attractor.

The purpose of this paper is to present a universal kinematic theory of the formation of a polymodal statistical distribution of the number of transformed elements of an open system, where secondary clay minerals – kaolinites, due to superimposed epigenesis in a sandy reservoir are considered as the formed elements.

The objects of the study are samples of secondary kaolinitization intensity values in sand intervals of oil and gas fields of the Yamal Peninsula and the contents of secondary kaolinite (determined from the core) in Upper Jurassic sand strata of the Stolbovov oil and gas field. Secondary kaoliniteization is caused by the influence of deep fluids.

The research method was determined on the basis of the obtained equation of unified modes of polymodal distribution of the number of transforming elements (in transformation of systems). The number (intensity) of transformed elements is proportional to the ratio of the system transformation time to the flow time of the external influence on the elements of this system. Seven basic constants (attractors) related to the «golden» proportion were theoretically calculated, bringing them into conformity with universal principles of system transformation processes states.

Results. Having compared constants obtained theoretically with calculated unified values of modes of empirical data, the states of system transformation processes with respect to each mode have been determined. Analysis of modes calculated in a polymodal distribution of secondary kaolinite intensities and kaolinite content, as well as comparing mode values (with corresponding transformation principle) with empirical data on transformation processes gave evidence for the validity of the universal kinematic theory.

Conclusions. Thus, using universal principles of transformation, on the basis of the determined contents of secondary kaolinite in the studied intervals of permeable strata, it is possible to allocate zones with the chemical and hydrodynamic properties and characteristics of interest.

Key words:

Polymodal statistical distributions, secondary geochemical processes, superimposed epigenesis processes, secondary kaoliniteization, attractor, geochemistry, open systems, «golden» proportion.

REFERENCES

1. Melnik I.A. The ratio of time parameters of the geochemical process of superimposed epigenesis and the «golden section». *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2015, no. 5, pp. 30–39. In Rus.
2. Melnik I.A. Polymodality of histograms of geological characteristics as a criterion of fluid dynamics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 66–74. In Rus.
3. Lamperta A., Tlustý T. Resonance-induced multimodal body-size distributions in ecosystems, *PNAS*, 2013, vol. 110, no. 1, pp. 205–209. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1211761110> (accessed 30 March 2023).
4. Merlo M.J., Parietti M., Etchegoin J.A. Long-term study of the life cycle of the freshwater snail *Heleobia parchappii* (Mollusca: Cochliopidae) in a lentic environment in Argentina, 2016, vol. 35, no. 1, pp. 49–60. DOI: 10.23818/limn.35.04 Available at: <https://www.limnetica.com/es/long-term-study-life-cycle-freshwater-snail-heleobia-parchappii-mollusca-cochliopidae-lentic> (accessed 30 March 2023).
5. Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments. *The Journal of Geology*, 1978, vol. 86, no. 4, pp. 411–421. Available at: <https://doi.org/10.1086/649710> (accessed 30 March 2023).
6. Binghe Yan, Yulan Zhang, Shuying Zang, Qiang Chen, Li Sun. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in Northeast China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (accessed 30 March 2023).
7. Mendez Torrecillas C.a, Halberta G.W., Lamprou D.A. A novel methodology to study polymodal particle size distributions produced during continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 2017, vol. 519, pp. 230–239. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517317300248?via%3Dihub> (accessed 30 March 2023).
8. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of Bi-and Polimodal distributions and the Nonostwald behavior of Disperse System. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1191–1200.
9. Barbedoa E.L., Gonçalves P.H., Lamoglia M.S., Pontesa A.M.P., Bastos Kuffnera B.H., Gomesa G.F., Silvaa G. Analysis of milling efficiency of the Vanadis 8 tool steel with additions of vanadium and molybdenum carbides. *Materials Research*, 2021, vol. 24, no. 5. Available at: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0054> (accessed 31 March 2023).
10. Rajesh Asthana, Prakash Kumar Shrivastava, Hari Bahadur Srivastava, Mirza Javed Beg, Pradeep Kumar. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica. *Advances in Polar Science*, 2013, vol. 4, no. 24, pp. 281–295. Available at: <http://journal.polar.org.cn/EN/10.3724/SP.J.1085.2013.00281> (accessed 31 March 2023).
11. Lakk M., Yarishkin O., Baumann J. M., Iuso A., Križaj D. Cholesterol regulates polymodal sensory transduction in Müller glia. *Glia*, 2017, vol. 65, pp. 2038–2050. DOI: 10.1002/glia.23213
12. Lakk M., Young D., Baumann J.M., Jo A.O., Hu H., Križaj D. Polymodal TRPV1 and TRPV4 sensors colocalize but do not functionally interact in a subpopulation of mouse retinal ganglion cells.

- Frontiers*, 2018, vol. 12. DOI: 10.3389/fncel.2018.00353 Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncel.2018.00353/full> (accessed 31 March 2023).
13. Tabilo Alvarez J., Ramirez-Correa P. A brief review of systems, cybernetics, and complexity. *Complexity*, 2023, vol. 2023. Available at: <https://doi.org/10.1155/2023/8205320> (accessed 31 March 2023).
 14. Stakhov A. *Numerical systems with irrational bases for mission-critical applications*. December 2017. 284 p. Available at: <https://doi.org/10.1142/10671> (accessed 31 March 2023).
 15. Melnik I.A. *Osnovy statisticheskoi-korrelyatsionnoi interpretatsii materialov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Fundamentals of statistical and correlation interpretation of geophysical well survey data]. Moscow, RUSAJNS Publ., 2022. 76 p.
 16. Melnik I.A. Statistical intensity of transformation processes of open geological systems based on geophysical data. *Geologiya i mineralno-syreyye resursy Sibiri*, 2022, no. 4, pp. 22–27. In. Rus.
 17. Chernikov O.A. *Litologicheskie issledovaniya v neftepromyslovoy geologii* [Lithologic studies in oilfield geology]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 236 p.
 18. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p.
 19. Kozerenko S.V., Khramov D.A., Fadeev V.V., Kalinichenko A.M., Marov I.N., Evtikova G.A., Rusakov V.S. Issledovanie mekhanizma obrazovaniya pirita v vodnykh rastvorakh pri nizkikh temperaturakh i davleniyakh [Study of the mechanism of pyrite formation in aqueous solutions at low temperatures and pressures]. *Geokhimiya*, 1995, no. 9, pp. 1553–1565.
 20. Cesare B., Satish-Kumar M., Cruciani G., Pocker Sh., Nodari L. Mineral chemistry of Ti-rich biotite from pegmatite and metapelitic granulites of the Kerala Khondalite Belt (southeast India): petrology and further insight into titanium substitutions. *American Mineralogist*, 2008, vol. 93, pp. 327–338. DOI: 10.2138/am.2008.2579

Received: 5 April 2023.
Reviewed: 20 June 2023.

Information about the author

Igor A. Melnik, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.181

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

Мальцев Кирилл Иванович¹,
kim3@tpu.ru

Гиль Андрей Владимирович¹,
andgil@tpu.ru

Абрамов Никита Валерьевич¹,
nva12@tpu.ru

Пузырев Станислав Алексеевич¹,
sap34@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки полноты выгорания топлива, эмиссии вредных веществ и температурного напряжения экранных поверхностей топочной камеры пылеугольного котельного агрегата при его реконструкции для организации сжигания природного газа. В настоящее время перевод топливосжигающих установок с твердого топлива на природный газ является весьма актуальным в связи с существенно более низким выбросом углеродных соединений.

Цель: исследование физико-химических процессов в топочной камере на различных нагрузках с факельным сжиганием природного газа и оценка эффективности организации горения при реконструкции пылеугольного котла.

Объекты: топочная камера котельного агрегата паропроизводительностью 210 т/ч, горелочные устройства, параметры топочной среды.

Методы: сравнение результатов аналитических тепловых расчетов и результатов численного моделирования. Численное моделирование горения газового факела выполнено с использованием программного пакета ANSYS Fluent. Для описания турбулентного потока применялись подходы Reynold Avaraged Navier–Stokes, основанные на осреднении уравнений Навье–Стокса по числу Рейнольдса с дополнительными уравнениями массовой плотности турбулентной энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ .

Результаты. Проведено численное исследование физико-химических процессов в топочной камере котельного агрегата после его реконструкции под организацию сжигания природного газа. Получены зависимости изменения температурного уровня, гидродинамики и концентраций компонентов продуктов сгорания в объеме топки на различных нагрузках. Установлено перераспределение высокотемпературных продуктов сгорания к фронтальной и тыльной стенкам, что приводит к образованию зон в пристенном слое со значительным температурным градиентом. Сопла третичного дутья способствуют снижению эмиссии оксидов азота в топочном объеме за счет подавления их образования из-за недостатка кислорода в зоне горения, а также за счет снижения температуры факела в окислительной зоне.

Ключевые слова:

Котельный агрегат, горелочное устройство, газовый факел, численное моделирование, оксиды азота.

Введение

Тепловые электростанции (ТЭС) являются одним из наиболее распространенных источников производства электрической и тепловой энергии во всем мире [1]. Однако они также являются крупнейшими источниками выбросов вредных веществ в атмосферу, таких как оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x) и диоксид углерода (CO_2) [2, 3].

По данным Всемирной метеорологической организации, уровень парниковых газов в атмосфере продолжает расти, что может привести к серьезным последствиям для окружающей среды и здоровья людей. В связи с этим в 2015 г. было принято Парижское соглашение [4], целью которого является удержание роста глобальной средней температуры на уровне не выше 2 °С, повышение способности адаптации к последствиям изменения климата и переход на низкоуглеродное развитие с конечной целью достижения нулевых выбросов к 2050 г. [5].

Один из способов снижения выбросов вредных веществ от ТЭС – переход на сжигание природного газа вместо использования угля или мазута в качестве топлива, так как сжигание газа не производит практически никаких выбросов оксидов серы, а также значительно снижаются выбросы оксидов азота и диоксида углерода.

С начала XXI в. в России заметна тенденция к наращиванию доли природного газа в генерации электрической и тепловой энергии, которая наблюдается до сих пор. За период 2015–2018 гг. потребление угля и нефтепродуктов сократилось, их совокупная доля в балансе снизилась с 33 до 29 %, тогда как объем потребления газа увеличивался в среднем на 3,5 % в год (в том числе за счет роста объема полезного использования попутного нефтяного газа) [6].

Переход на наилучшие доступные технологии в топливноэнергетическом комплексе стимулирует замещение устаревших угольных теплоэлектростанций более экономичными энергоблоками, использующими природный газ и возобновляемую энергию [6, 7].

В связи с этим численное моделирование является стратегическим инструментом для достижения уровня передовых проектов топливосжигающих установок, поскольку позволяет оценить оптимальность компоновки горелочных устройств в совокупности с соплами третичного дутья или рециркуляции продуктов сгорания. Данные системы позволяют снизить выбросы вредных веществ без дорогостоящей очистки дымовых газов [8].

Объект исследования

Объектом исследования является барабанный паровой котел БКЗ-210-140 с П-образной компоновкой (рис. 1). Топочная камера открытого типа по всей высоте прямоугольного сечения имеет размеры по осям 7424×7808 мм. Стены топочной камеры экранированы трубами диаметром 60 мм. Котел спроектирован на сжигание бурых углей в топке с тангенциальной компоновкой прямоточных горелочных устройств.

С целью организации сжигания природного газа рассмотрена проектная схема реконструкции котельного агрегата. На боковых стенах топочной камеры установлены шесть низкоэмиссионных вихревых комбинированных газомазутных горелок ГМВИ (Ш)-30 тепловой мощностью 30 МВт, по схеме треугольника вершиной вниз.

Для подавления образования оксидов азота предусмотрена система двухступенчатого сжигания. Основная часть топлива сжигается при недостатке окислителя, а дожигание происходит за счет подачи воздуха в сопла третичного дутья [9]. Сопла установлены по два на боковых стенах топочной камеры выше верхнего яруса горелок, на высоте 10,5 м, сечением каждого 608×208 мм.

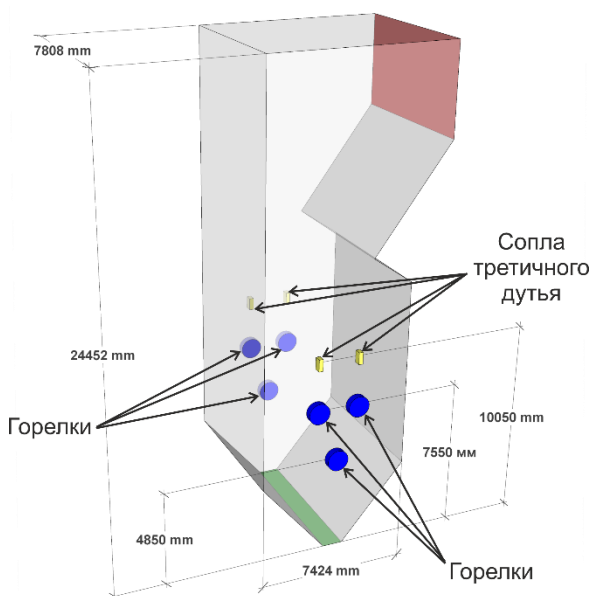


Рис. 1. Геометрическая модель топочной камеры
 Fig. 1. Geometrical model of a boiler furnace chamber

Математическая модель

Для топочной камеры создана CAD-модель, которая была дискретизирована для возможности числен-

ного решения. Расчетная сеточная модель состоит из 1142560 ячеек и обеспечивает сеточно-независимое решение. Моделирование топочных процессов выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Связь давления и скорости разрешалась с помощью алгоритма SIMPLE с фазовой связью при использовании противоточной схемы второго порядка точности для оценки конвективных условий. Градиент давления рассчитывался по схеме Standard. Второй порядок аппроксимации использовался для решения уравнений сохранения импульса, турбулентной кинетической энергии, скорости диссипации энергии турбулентности и средней доли смеси. Расчет выполнялся до тех пор, пока невязка по уравнению неразрывности не составляла $<10^{-5}$, для остальных уравнений $<10^{-6}$. Указанные параметры невязок достигались при выполнении ≈ 1000 итераций.

В численном моделировании процессов горения важную роль играет распределение скоростей в потоке. Модель турбулентности k-ε позволяет описать диссипацию энергии турбулентных вихрей и перенос их импульса, что позволяет определить характеристики потока. Преимуществом модели k-ε является ее высокая точность и сравнительно низкая вычислительная стоимость. При этом поток можно считать несжимаемым вследствие относительно низких скоростей, существенное изменение градиента давления не наблюдается, соответственно турбулентное течение уподоблено, как в пограничном слое плоской пластины [10, 11].

Теплофизические процессы в топочной камере происходят при высоких температурах, поэтому излучение является одним из основных процессов теплообмена. Для достоверного распределения температуры в топочной камере используется модель излучения P-1, в которой газ принимался как серое тело [12, 13].

Поток излучения описывается уравнением:

$$q_l = - \frac{1}{3 \cdot (a + \sigma_s) - C \sigma_s} + \nabla G,$$

где a – коэффициент поглощения; σ_s – коэффициент рассеивания; $C \sigma_s$ – линейно-анизотропный коэффициент фазовой функции; ∇ – оператор набла; G – падающее излучение.

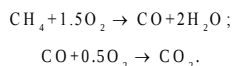
Уравнение переноса для падающего излучения:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - a G + 4 a n^2 \sigma T^4 = S_G,$$

где n – показатель преломления среды; T – температура газов; S_G – определяемый источник излучения; σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Модель P-1 проста и надежна, доказано, что применительно к сжиганию газового топлива она может давать результаты, аналогичные по точности результатам, полученным с использованием более сложных и вычислительно затратных моделей излучения [14, 15]. Рассеянием пренебрегают, так как ожидается, что молекулярное влияние будет пренебрежимо мало, как и количество образующейся сажи, и ее влияние.

Механизм горения газа описан упрощенным способом, который включает двухступенчатое сжигание метана (главного компонента природного газа) с кислородом и окисление монооксида углерода [16, 17]:



Для учета турбулентной диффузии использовалась модель переноса, соответственно выражения аррениусовского типа не использовались для описания кинетики реакций. Предположение о том, что лимитирующим этапом реакции является перемешивание и что фактическая кинетика не имеет значения, оправдано для реагирующих потоков с высокими числами Дамкёлера, для которых реакция протекает мгновенно по сравнению с турбулентным перемешиванием. Поскольку горение происходит на много порядков быстрее, чем турбулентное перемешивание, в этом случае уместно использовать модель «смешивание–реакция». Массовые доли топлива, окислителей и продуктов сгорания были получены с помощью модели Eddy-Break-Up (EBU), основанной на предположении, что турбулентное перемешивание контролирует скорость реакции [18].

Эмиссия оксидов азота оценивалась с помощью постобработки процессов горения в топочной камере. Соответственно, генерация NO_x не оказывает влияния на поля температур, скорость, давление и состав топочной среды. Это подтверждается низкими концентрациями NO_x в расчетной области. Генерация NO_x рассчитана с учетом образования быстрых и термических оксидов азота по механизму Зельдовича [19, 20].

Верификация математической модели проводилась на основе сравнения результатов моделирования с результатами поверочного расчета топочной камеры при нагрузках 100 и 70 % от номинальной (рис. 2). По результатам сравнения отклонение температур на выходе из топочной камеры составляет не более 45 °С, что является допустимым согласно [21].

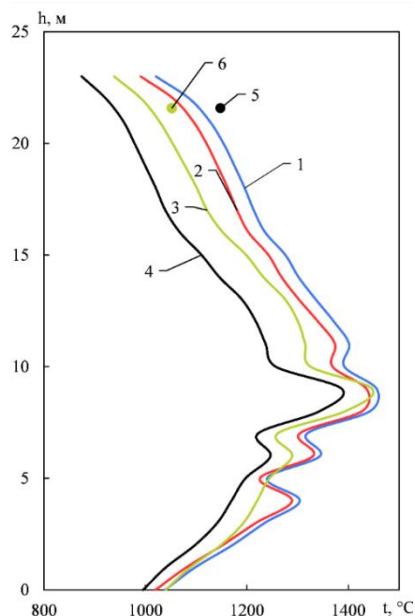


Рис. 2. Распределение температуры по высоте топочной камеры (%): 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50; 5 – 100 (поверочный расчет); 6 – 70 (поверочный расчет)

Fig. 2. Distribution of temperature along the furnace chamber (%): 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50; 5 – 100 (checking calculator); 6 – 70 (checking calculator)

Исходными данными для математического моделирования являются результаты теплового расчета согласно [21].

Подача топлива и окислителя (воздуха) в топочную камеру задавались через массовый расход (кг/с). Доля воздуха, подаваемого через сопла третичного дутья, составляет 30 % на всех рассматриваемых нагрузках. Температура природного газа, подаваемого в топку, принята 30 °С. Температура горячего воздуха составляет 273 °С.

Граничные условия определяются температурой стенки топочной камеры, которая принимается равной 380 °С, и коэффициентом тепловой эффективности экранов, равным 0,65.

Результаты исследования

Распространение потоков газозооушной смеси в топочной камере является определяющим фактором для обеспечения полноты выгорания топлива, устойчивости горения и распределения теплового напряжения по поверхностям нагрева [22].

Аэродинамическая структура топочной среды в поперечных и горизонтальных сечениях при номинальной паровой нагрузке представлена на рис. 3, 4. В сечении по центральной оси топочной камеры (рис. 3, а), согласно встречной компоновке горелок от нижнего яруса, обеспечивается встречно-направленное движение топлива и окислителя со скоростью порядка 20 м/с. Затем потоки соударяются в центральной части топочной камеры и растекаются в нижнюю часть топки (область холодной воронки) с образованием двух горизонтальных вихрей относительно продольной оси топочной камеры, а в верхнюю часть – без формирования крупных вихрей, поскольку восходящие потоки оказываются под существенным влиянием горелочных струй второго яруса. Наличие сопел третичного дутья над горелками второго яруса приводит к снижению скорости восходящего потока (6–7 м/с) и его турбулизации (рис. 3, б).

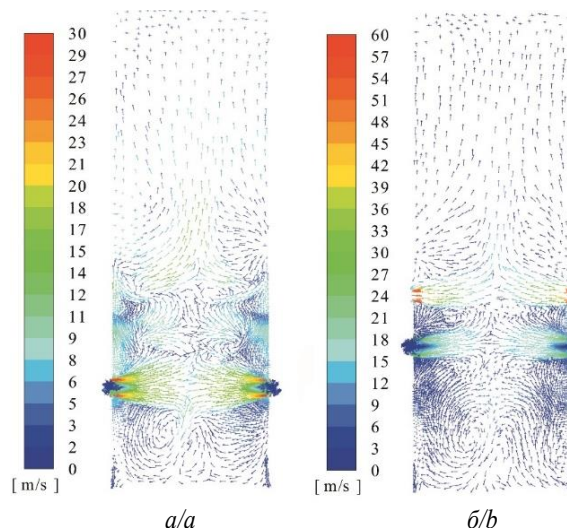


Рис. 3. Векторное поле скоростей (м/с) в поперечном сечении топочной камеры: а) центральная ось топки; б) ось сопел третичного дутья

Fig. 3. Velocity vector field in a transverse section of the furnace chamber: а) central axis of the furnace; б) axis of the tertiary air nozzles

Из результатов моделирования аэродинамики в горизонтальных сечениях топочной камеры (рис. 4) наблюдается столкновение закрученных потоков, истекающих из горелочных устройств (рис. 4, а, б) и прямооточных струй

третьичного воздуха (рис. 4, в), что приводит к движению основной массы потока к фронтальной и тыльной стенам от центральной оси топочной камеры с образованием вертикальных вихрей в каждом углу топки.

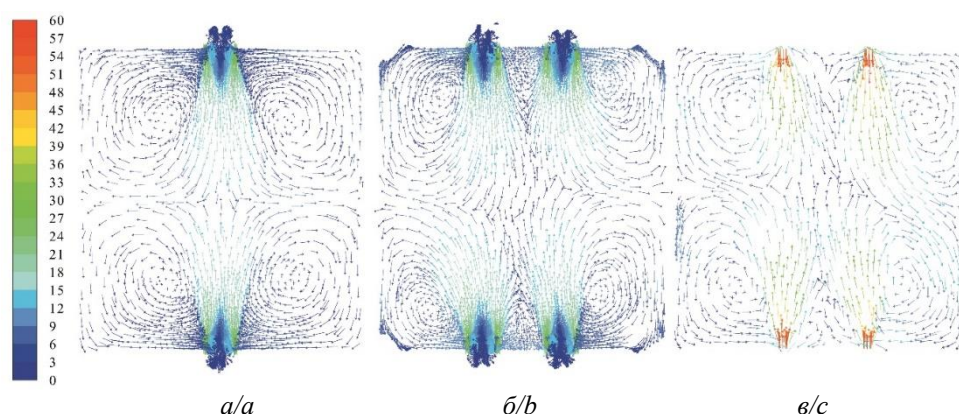


Рис. 4. Векторное поле скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры: а) 1 ярус горелок; б) 2 ярус горелок; в) сопла третичного дутья

Fig. 4. Velocity vector field in a horizontal section of the furnace chamber: a) first tier of burners; b) second tier of burners; c) over-fire air nozzles

Поскольку природный газ является высокореакционным топливом, соответственно ядро горения располагается на уровне горелочных устройств (рис. 5, 6). В среднем значения температур в ядре горения составляют от 1380 до 1480 °C (рис. 2, 5), при этом вследствие столкновения противоположно направленных горелочных струй высокотемпературные потоки вытесняются к фронтальной и тыльным стенам топочной камеры вдоль продольной оси (рис. 5, 6, а, б). Так как сопла третичного дутья установлены непосредственно над горелочными устройствами, то и выше ядра горения потоки с более высокой температурой, чем в среднем по сечению, поднимаются вдоль фронтального и тыльного топочных экранов (рис. 6, в, г).

В связи с выявленным перераспределением потоков выполнена оценка температурного уровня непосредственно в пристенном слое на отметках размещения второго яруса горелок и сопел третичного дутья (рис. 7). Стоит отметить, что по мере приближения к панелям фронтального и тыльного экранов топки наблюдается значительный градиент температур на уровне расположения второго яруса горелок (до 500 °C) (рис. 7, а, б). На уровне расположения сопел третичного дутья температурная неравномерность в пристенном слое снижается и не превышает 200 °C, а по ширине тыльной стены наблюдаются более низкие значения (рис. 7, в, г).

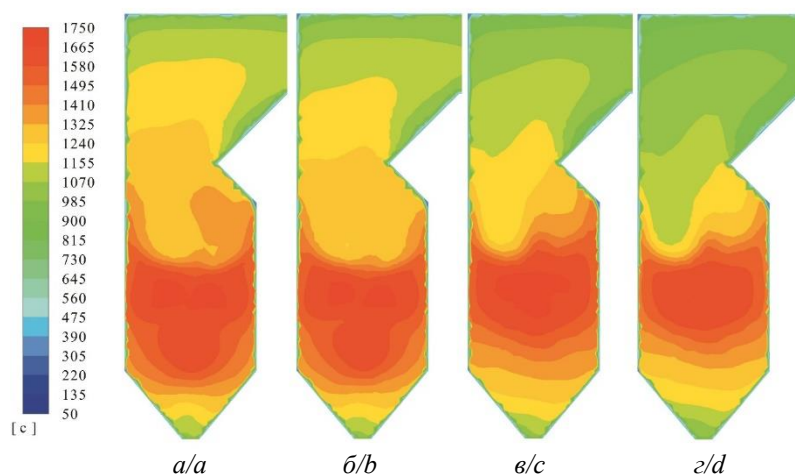


Рис. 5. Распределение температур (°C) в продольном сечении топочной камеры. Нагрузка (%): а) 100; б) 90; в) 70; г) 50

Fig. 5. Distribution of temperature (°C) in a longitudinal section of the furnace chamber. Boiler load (%): a) 100; b) 90; c) 70; d) 50

На рис. 8, 9 представлены результаты эмиссии оксидов азота в топочном объеме при исследуемых нагрузках. Согласно представленным результатам

наиболее интенсивно эмиссия NO_x наблюдается в зоне активного горения при нагрузках 100 и 90 %, что связано с большей зоной активного горения и кон-

центрацией окислителя. При отключении нижнего яруса горелок эмиссия NO_x в зоне активного горения значительно снижается (рис. 8, 9, в, г). Наличие сопел третичного дутья способствует снижению эмиссии

оксидов азота выше зоны активного горения за счет подавления их образования из-за недостатка кислорода в зоне горения, а также за счет снижения температуры факела в окислительной зоне.

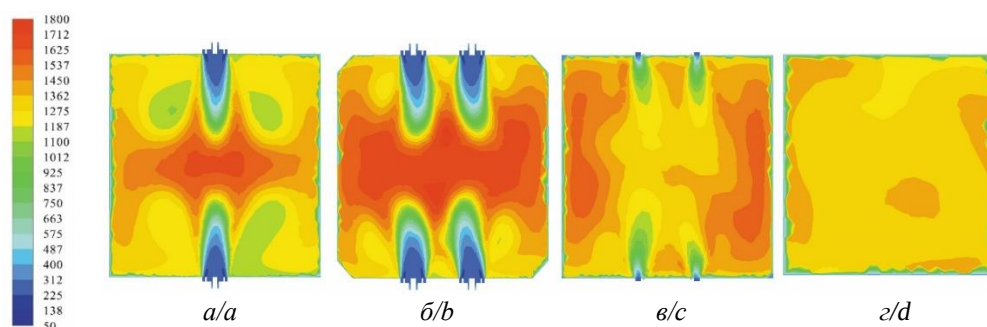


Рис. 6. Распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) в горизонтальном сечении топочной камеры при номинальной нагрузке: а) 1 ярус горелок; б) 2 ярус горелок; в) сопла третичного дутья; г) на уровне аэродинамического выступа

Fig. 6. Distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) in a horizontal section of the furnace chamber at nominal boiler load: а) first tier of burners; б) second tier of burners; в) over-fire air nozzles; д) aerodynamic nose

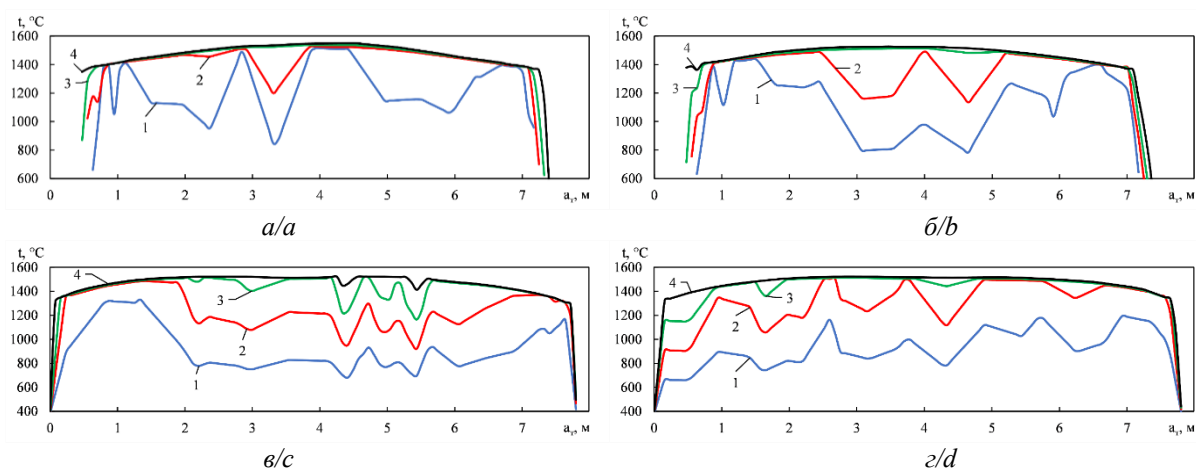


Рис. 7. Распределение температуры в пристенном слое по ширине топочной камеры: а) фронт, верхний ярус горелок; б) тыл, верхний ярус горелок; в) фронт, сопла третичного дутья; г) тыл, сопла третичного дутья. Расстояние от экранных труб (мм): 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200

Fig. 7. Distribution of temperature in the near-wall layer along the furnace chamber width: а) front, second tier of burners; б) rear, second tier of burners; в) front, over-fire air nozzles; д) rear, over-fire air nozzles. Distance from waterwall tubes (mm): 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200

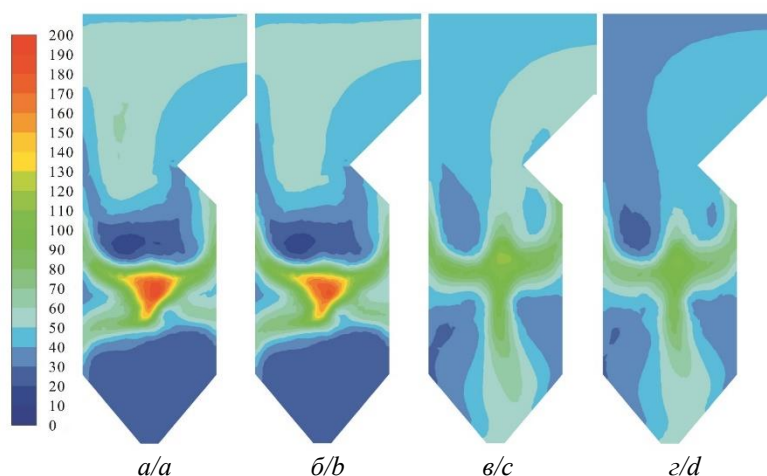


Рис. 8. Распределение оксидов азота (мг/м^3) в продольном сечении топочной камеры. Обозначения – рис. 5

Fig. 8. Distribution of nitrogen oxides in a longitudinal section of the furnace chamber. See Fig. 5 for legend

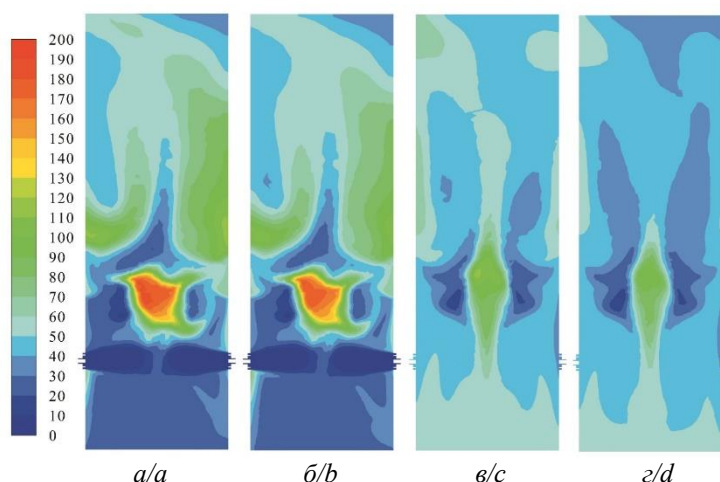


Рис. 9. Распределение оксидов азота (мг/м^3) в поперечном сечении топочной камеры. Обозначения – рис. 5

Fig. 9. Distribution of nitrogen oxides in a transverse section of the furnace chamber. See Fig. 5 for legend

Выгорание природного газа в топочной камере происходит в полном объеме (рис. 10, а), так при нагрузках 90 и 100 % максимальная концентрация СО наблюдается на уровне расположения горелочных устройств, а при снижении нагрузки максимальная концентрация – выше горелок, но на выходе из топочной камеры стремится к нулевым значениям во всех исследованных случаях. Концентрация O_2 на уровне расположения горелочных устройств имеет минимальное значение вследствие недостатка окислителя из-за перераспределения части воздуха на третичное дутье. В дальнейшем по высоте топки концен-

трация возрастает и в выходном окне топки имеет значения от 1,18 до 3,15 %.

При нагрузках 90 и 100 % максимальная концентрация оксидов азота 260 мг/м^3 в зоне активного горения при пересчете на избыток воздуха 1,4, при нагрузках 70 и 50 % максимальная концентрация не превышает 200 мг/м^3 (рис. 10, в). На выходе из топочной камеры во всех исследованных вариантах содержание NO_x составляет порядка 100 мг/м^3 и соответственно не превышает предельно допустимых значений согласно [23].

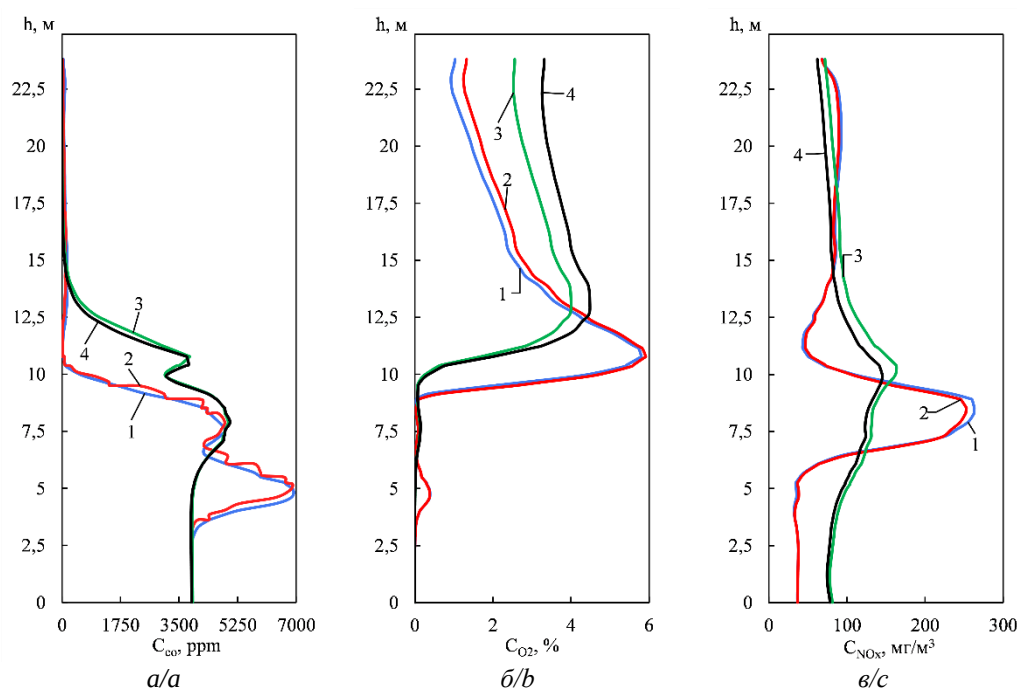


Рис. 10. Распределение среднееинтегральной в горизонтальных сечениях концентрации монооксида углерода (а), кислорода (б) и оксидов азота (в) по высоте топочной камеры. Нагрузка, %: 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50

Fig. 10. Distribution of average integral concentration of (a) carbon oxide, (b) oxygen, and (c) nitrogen oxides in horizontal sections along the furnace chamber height. Boiler load, %: 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50

Заключение

При эксплуатации котельных агрегатов после проведенных реконструкционных работ, связанных с изменением схем сжигания, распространенной проблемой является перегрев стенок экранных труб, что может привести к коррозии и разрыву труб, отключению котла и даже к авариям. Также зачастую происходят изменения, связанные с экологическими показателями. Поэтому в данной работе на основе пакета прикладных программ ANSYS Fluent смоделированы топочные процессы при различных нагрузках.

На основании отлаженной модели определено наличие высокотемпературных зон у фронтальной и тыльной стен, а также значительные градиенты температур. Поскольку температурный уровень в пристенных зонах (особенно при номинальной нагрузке)

превышает допустимые значения (450 °С) для углеродистой стали, это может негативно отразиться на механической прочности испарительных поверхностей нагрева. Существенные температурные градиенты по ширине стен котельного агрегата также могут привести к негативным последствиям, связанным с гидравлической неравномерностью по отдельным трубам в экранных поверхностях.

Схема ступенчатого сжигания с соплами третичного дутья не приводит к потере экономичности работы котельного агрегата от неполноты выгорания топлива, а оказывает положительное влияние на снижение эмиссии оксидов азота.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ember. Global Electricity Review 2023. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/> (дата обращения 17.04.2023)
2. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
3. Росляков П.В. Современные воздухоохраные технологии на тепловых электростанциях (обзор) // Теплоэнергетика. – 2016. – № 7. – С. 46–62.
4. United Nations Climate Change. The Paris Agreement // UNCC. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (дата обращения 10.04.2023).
5. Сценарии декарбонизации в России. URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/9b713c16-cfb4-4da3-aea-66061e1d14f5/SKOLKOVO_EneC_RU_Decarbonisation_Scenarios_in_Russia.pdf (дата обращения 17.04.2023).
6. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утв. Распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2020 г. № 3052-р. – 37 с.
7. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 271 с.
8. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
9. Алехнович А.Н. Снижение оксидов азота в энергетических котлах, сжигающих газ. – Челябинск: Цицеро, 2018. – 74 с.
10. Low NO_x burner technology for ethylene cracking furnaces / W. Bussman, R. Poe, B. Hayes, J. McAdams, J. Karan // AIChE Ethylene Producers Conference Proceeding. – 2001. – V. 10. – P. 793–796.
11. Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a methane-air diffusion flame on its combustion characteristics / A.A. Hosseini, M. Ghodrati, M. Moghiman, S.H. Pourhoseini // Case Studies in Thermal Engineering. – 2020. – V. 18. – 100610.
12. Karpilov I., Pashchenko D. Effect of methane reforming before combustion on emission and calorimetric characteristics of its combustion process // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – V. 46. – P. 38106–38118.
13. Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками / А.В. Гиль, А.С. Заворин, О.М. Кокшарев, Е.С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 18–27.
14. Numerical investigation of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200 MW package boiler / M.A. Habib, E.M.A. Mokheime, S.Y. Sanusi, M.A. Nemitallah // Energy Conversion and Management. – 2014. – V. 83. – P. 296–305.
15. Численное исследование топочных процессов при сжигании непроектных углей в котле производительностью 220 т/ч / К.И. Мальцев, А.В. Гиль, А.С. Заворин, Д.В. Лебедь // Теплоэнергетика. – 2022. – № 12. – С. 73–83.
16. Investigation on the combustion performance enhancement of the premixed methane/air in a two-step micro combustor / J. E, H. Liu, X. Zhao, D. Han, Q. Peng, W. Zuo, T. Meng, R. Qio // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 141. – P. 114–125.
17. FLUENT Theory Guide, Version 17.2. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2016. – 812 p.
18. Habibi A., Merci B., Heynderichx G. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces // Computers and Chemical Engineering. – 2007. – V. 31. – P. 1389–1406.
19. Baukal C.E. The John Zink Hamworthy Combustion handbook. 2nd ed. V. 1. Fundamentals. – Boca Raton: CRC Press, 2012. – 588 p.
20. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. – Heidelberg: Springer Berlin, 2006. – 378 p.
21. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
22. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 484 с.
23. ГОСТ Р 55173-2012. Установки котельные. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.

Поступила: 15.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 26.05.2023 г.

Информация об авторах

Мальцев К.И., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гиль А.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Абрамов Н.В., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Пузырев С.А., студент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.181

THERMOPHYSICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF NATURAL GAS UTILIZATION IN THE RECONSTRUCTION OF A PULVERIZED COAL-FIRED BOILER

Kirill I. Maltsev¹,
kim3@tpu.ru

Andrey V. Gil¹,
andgil@tpu.ru

Nikita V. Abramov¹,
nva12@tpu.ru

Stanislav A. Puzyrev¹,
sap34@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the investigation is caused by the need to assess the completeness of fuel combustion, harmful emissions, and temperature stress of the screen surfaces of a pulverized coal-fired boiler during its reconstruction for natural gas combustion. Currently, the conversion of solid fuel combustion installations to natural gas is highly relevant due to significantly lower emissions of carbon compounds.

The main aim of this research is to study the physicochemical processes in the combustion chamber at various loads with flammable natural gas combustion and evaluate the effectiveness of combustion organization during the reconstruction of a pulverized coal-fired boiler.

Objects: combustion chamber of a boiler unit with a steam capacity of 210 t/h, burners, parameters of the combustion chamber environment.

Methods: comparison of results obtained from analytical thermal calculations and numerical modeling. The numerical simulation of gas flare combustion was performed using the ANSYS Fluent software package. Reynolds Averaged Navier–Stokes approaches based on averaging the Navier–Stokes equations over the Reynolds number with additional equations for the turbulent kinetic energy k and the rate of turbulent kinetic energy dissipation ε were applied to describe the turbulent flow.

Results. A numerical study of the physicochemical processes in the combustion chamber of a boiler unit was conducted after its reconstruction for natural gas combustion. Dependencies of temperature level changes, hydrodynamics, and concentrations of combustion products components in the volume of the combustion chamber at various loads were obtained. It was found that high-temperature combustion products are redistributed towards the front and rear walls, resulting in the formation of zones in the wall layer with a significant temperature gradient. The nozzles of the tertiary air contribute to the reduction of nitrogen oxide emissions in the combustion chamber by suppressing their formation due to oxygen deficiency in the combustion zone, as well as by lowering the temperature of the flame in the oxidizing zone.

Key words:

Boiler unit, burner, gas flame, numerical modelling, nitrogen oxides.

The research was supported by Russian Science Foundation no. 23-29-00274, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00274/>.

REFERENCES

1. Ember. *Global Electricity Review 2023*. Available at: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/> (accessed 17 April 2023).
2. Zhabo V.V. *Okhrana okruzhayushchey sredy na TES i AES* [Environmental protection in the TPP and NPP]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p.
3. Roslyakov P.V. Modern air protection at thermal power plants (review). *Thermal Engineering*, 2016, no. 7, pp. 46–62. In Rus.
4. *United Nations Climate Change. The Paris Agreement. UNCC*. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (accessed 10 April 2023).
5. *Stsenarii dekarbonizatsii v Rossii* [Decarbonization scenarios in Russia]. Available at: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/9b713c16-cfb4-4da3-aeaa-66061e1d14f5/SKOLKOVO_EneC_RU_Decarbonisation_Scenarios_in_Russia.pdf (accessed 17 April 2023).
6. *Strategiya sotsialno-economiceskogo razvitiya Rossiiskoy Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovykh gazov do 2050 goda* [Strategy for socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050]. Approved Decree of the Government of the Russia Federation of October 29, 2020 No. 3052 p. 37 p.
7. ITS 38-2017. *Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii* [Combustion of fuel in large installations for energy production]. Moscow, Byuro Standartinform Publ., 2017. 271 p.
8. Pomerantsev V.V., Arefev K.M., Akhmedov D.B. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Fundamentals of practical combustion theory]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 312 p.
9. Alekhovich A.N. *Snizhenie oksidov azota v energeticheskikh kotlakh, szhigayushikh gaz* [Nitrogen oxide reduction in power boilers burning gas]. Chelyabinsk, Tsitsero Publ., 2018. 74 p.
10. Bussman W., Poe R., Hayes B., McAdams J., Karan J. Low NO_x burner technology for ethylene cracking furnaces. *AIChE Ethylene Producers Conference Proceeding*, 2001, vol. 10, pp. 793–796.
11. Hosseini A.A., Ghodrati M., Moghiman M., Pourhoseini S.H. Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a methane-air diffusion flame on its combustion characteristics. *Case Studies in the Thermal Engineering*, 2020, vol. 18, 100610.
12. Karpilov I., Pashchenko D. Effect of methane reforming before combustion on emission and calorimetric characteristics of its combustion process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, pp. 38106–38118.
13. Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M., Vorontsova E.S. Numerical study of effect of primary air excess on combustion in a furnace chamber of a utility boiler with multi-channel swirl burners. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 18–27. In Rus.

14. Habib M.A., Mokheime E.M.A., Sanusi S.Y., Nemitallah M.A. Numerical investigation of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200 MW package boiler. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 83, pp. 296–305.
15. Maltsev K.I., Gil A.V., Zavorin A.S., Lebed D.V. Numerical study of furnace processes during combustion of off-design coals in a 220 t/h boiler. *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69, pp. 971–980.
16. E J., Liu H., Zhao X., Han D., Peng Q., Zuo W., Meng T., Qio R. Investigation on the combustion performance enhancement of the premixed methane/air in a two-step micro combustor. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 141, pp. 114–125.
17. *FLUENT Theory Guide, Version 17.2*. Canonsburg, PA, ANSYS, Inc., 2016. 812 p.
18. Habibi A., Merci B., Heynderichx G. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, vol. 31, pp. 1389–1406.
19. Baukal C.E. *The John Zink Hamworthy Combustion handbook. Vol. 1. Fundamentals*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2012. 588 p.
20. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation*. Heidelberg, Springer Berlin, 2006. 378 p.
21. *Teplovoy raschet kotlov (normativny metod)* [Boiler thermal design (standard approach)]. St Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 256 p.
22. Khzmalyan D.M. *Teoriya gorennya i topchnye ustroystva* [Theory of combustion and combustion devices]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 484 p.
23. GOST R 55173-2012. *Ustanovki kotelnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [SS R 55173-2012. The boiler installations. General technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 32 p.

Received: 15 May 2023.

Reviewed: 26 May 2023.

Information about the authors

Kirill I. Maltsev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey V. Gil, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic.

Nikita V. Abramov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Stanislav A. Puzyrev, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 533.9.03

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Циммерман Александр Игоревич^{1,2},
alextsimmer@yandex.ru

Шаненков Иван Игоревич^{1,2},
i.i.shanenkov@utmn.ru

Насырбаев Артур Ринатович²,
arn1@tpu.ru

Никитин Дмитрий Сергеевич²,
nikitindmsr@yandex.ru

Сивков Александр Анатольевич²,
sivkov@tpu.ru

¹ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена широким спектром областей применения разнообразных видов генераторов плазмы, в том числе, в составе аналитических устройств, технологических установок и для создания токамаков, ионных и плазменных двигателей, спутников, лазерной техники, а также для нанесения пленок и покрытий на различные поверхности и синтеза микро- и нанопорошков.

Цель: определить наилучший способ инициирования дугового разряда в ускорительном канале коаксиального магнитоплазменного ускорителя, оценить влияние конфигурации канала формирования плазменной структуры на электродинамические нагрузки коаксиального магнитоплазменного ускорителя и рассчитать коэффициент полезного действия преобразования накопленной энергии в подведенную.

Объекты: коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, инициирование дугового разряда, центральный электрод, электрод-ствол, канал формирования плазменной структуры.

Методы: плазмодинамический синтез, измерение и регистрация импульсных токов и напряжений, измерение электроэрозии посредством массы эродированного электрода-ствола, высокоскоростная фоторегистрация плазменной струи.

Результаты. Рассмотрены два способа инициирования дугового разряда с использованием металлических проволочек и графитизации. Установлено, что они не влияют на энергетические параметры процесса плазмодинамического синтеза, однако применение графитизации выглядит предпочтительней в силу большей технологичности процедуры, которая обеспечивает простоту подготовки ускорителя и надежность его работы. Установлена возможность снижения амплитуды тока дугового разряда на 29 % при увеличении длины канала формирования плазменной структуры с 5,5 до 11,5 мм, что обеспечивает уменьшение электродинамических нагрузок на все узлы системы. Экспериментально определена оптимальная длина канала формирования плазменной структуры 9,5 мм, способствующая получению высокого коэффициента полезного действия преобразования накопленной энергии в подведенную и надежности работы системы.

Ключевые слова:

Плазмодинамический синтез, коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, дуговой разряд, импульсная электроразрядная плазма, электроэрозия.

Введение

Интерес к генераторам плазмы (устройства, создающие потоки низкотемпературной плазмы) растет с каждым годом за счет широкого спектра областей их возможного применения: аналитические устройства (например, ионные микроскопы), технологические установки, токамаки, ионные и плазменные двигатели для спутников, нанесение пленок и покрытий на различные поверхности, синтез микро- и нанопорошков, лазерная техника [1–8]. В настоящее время многообразие генераторов плазмы весьма обширно. Если требуются потоки с кинетической энергией ионов E_i до 10 эВ, то они генерируются, например,

плазмотронами. Для многих задач нужны потоки с $E_i > 10$ эВ, которые можно получить с помощью ионных источников (ионные инжекторы) или плазменных ускорителей. Такие генераторы плазмы отличаются тем, что в ионных инжекторах происходит прямое ускорение одноименно заряженных ионов, движущихся вдоль электрического поля, созданного электродами, а в плазменных ускорителях плазма квазинейтральна, поскольку там находятся и ионы, и компенсирующие их объемный заряд электроны. Существует три основных типа плазменных ускорителей: тепловые (основным ускоряющим плазму фактором является градиент давления), термомагнитные

(ускорение за счет градиента давления и силы Ампера) и электромагнитные (ускорение за счет силы Ампера) [9–13].

Электромагнитные плазменные ускорители являются наиболее универсальными, так как магнитное поле в них может быть собственным, то есть создаваться токами, текущими в плазменном объеме между двумя электродами, и внешним, созданным с помощью внешней магнитной системы. Это обеспечивает перспективность применения данных устройств с точки зрения многообразия режимов работы и возможности их регулирования [12–16]. Выделяют два типа электромагнитных плазменных ускорителей: стационарные плазменные двигатели с внешним магнитным полем и коаксиальные (квази)стационарные сильноточные с собственным магнитным полем.

В этот класс генераторов плазмы входит и коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ), который относится к ускорителям типа Z-пинч, так как ток протекает между двумя электродами (центральный электрод и электрод-ствол) вдоль оси симметрии камеры z, а цилиндрический плазменный поток сжимается охватывающими ее по азимуту магнитными силовыми линиями поля [16–18]. Процесс начинается после подключения электродов к источнику энергии, при замыкании цепи происходит пробой промежутка между электродами и образование дугового разряда. Образовавшаяся плазменная структура дугового разряда ускоряется за счет силы Ампера до скоростей, близких к сверхзвуковым значениям (несколько км/с), затем происходит вынос материала вместе с плазменным потоком в камеру ускорителя, где давление и температура достигают критических значений [18].

Существует множество оригинальных модификаций КМПУ, адаптированных для решения конкретных прикладных задач, в том числе таких, как металание макротел, получение ультрадисперсных порошков различных материалов, нанесение покрытий на мишень [18–21]. Вне зависимости от назначения конкретной модификации КМПУ ключевую роль для конечной задачи играют процессы формирования и развития стабильного дугового разряда [21]. В коаксиальной электродной системе они определяются условиями инициирования разряда, конфигурацией канала формирования плазменной структуры и энергетическими параметрами режима работы ускорителя.

В работе исследованы способы инициирования дугового разряда в ускорительном канале КМПУ, влияние конфигурации канала формирования плазменной структуры на электродинамические нагрузки коаксиального магнитоплазменного ускорителя и коэффициент полезного действия преобразования накопленной энергии W_3 в подведенную W .

Экспериментальная часть

Установка плазмодинамического синтеза состоит из емкостного накопителя энергии (I), коаксиального магнитоплазменного ускорителя типа Z-пинч (II) и камеры-реактора (III). Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

Накопитель энергии позволяет осуществлять электропитание ускорителя с возможностью регулирования зарядных энергетических параметров (зарядное напряжение U_3 до 5,0 кВ, зарядная емкость C_3 до 28,8 мФ) и количества последовательных импульсов электропитания (до четырех). Это реализуется путем подачи управляющих сигналов от многоканального генератора задержанных импульсов (ГИ-1) на блоки управления (БУ) игнитронных управляемых разрядников (УР), подключенных к соответствующим секциям конденсаторных батарей. Регистрация энергетических параметров $U(t)$ и $I(t)$ осуществляется с использованием осциллографа Tektronix TDS2012, к которому подключаются выводы от омического делителя напряжения (ДН) и трансформатора Роговского (ТР).

Основными элементами КМПУ являются центральный электрод и электрод-ствол, жестко зафиксированные механически металлической обоймой и электрически соединенные разрушаемой токопроводящей перемычкой, которая может иметь два принципиально отличающихся варианта исполнения. Первый реализуется путем создания фонтанообразного пучка металлических проволочек, размещенных в канале формирования плазменной структуры (КФПС) в стеклопластиковом изоляторе у вершины центрального электрода. КФПС задает геометрию формирующейся плазменной структуры, которая зависит от диаметра и длины канала формирования плазменной структуры. Диаметр КФПС при проведении исследований оставался неизменным, а длину $l_{\text{КФПС}}$ варьировали от 5,5 до 11,5 мм. Второй вариант исполнения заключается в нанесении на стенки КФПС тонкого проводящего углеродного слоя путем распыления графитового аэрозоля.

В собранном виде КМПУ монтируется в герметичную камеру-реактор и подключается к шинам накопителя. Объем камеры-реактора заполнялся кислородом при давлении 10^3 Па.

Емкостной накопитель энергии заряжается до необходимой величины U_3 . При запуске системы ГИ-1 подает импульсы на блоки управления игнитронными разрядниками, что вызывает их срабатывание, после чего батарея конденсаторов ЕНЭ начинает процесс разряда, что обуславливается появлением напряжения на электродах коаксиального магнитоплазменного ускорителя и протеканием разрядного тока по цепи. Далее ток достигает некоторого значения и происходит разрушение перемычки с возникновением дуговой стадии разряда в межэлектродном пространстве КФПС, за счет чего происходит образование плазменной структуры, ускоряющейся вдоль оси z, что приводит к электроэрозионной наработке электрода-ствола, выносу материала из ускорительного канала, его распылению в объеме камеры-реактора с формированием оксидов железа. Следовательно, электроэрозионная наработка является основным методом наработки прекурсоров для синтеза и определяет производительность системы по синтезу дисперсных продуктов, поэтому оценка влияния энергетических параметров на данный показатель является важным этапом при оценке эффективности работы системы.

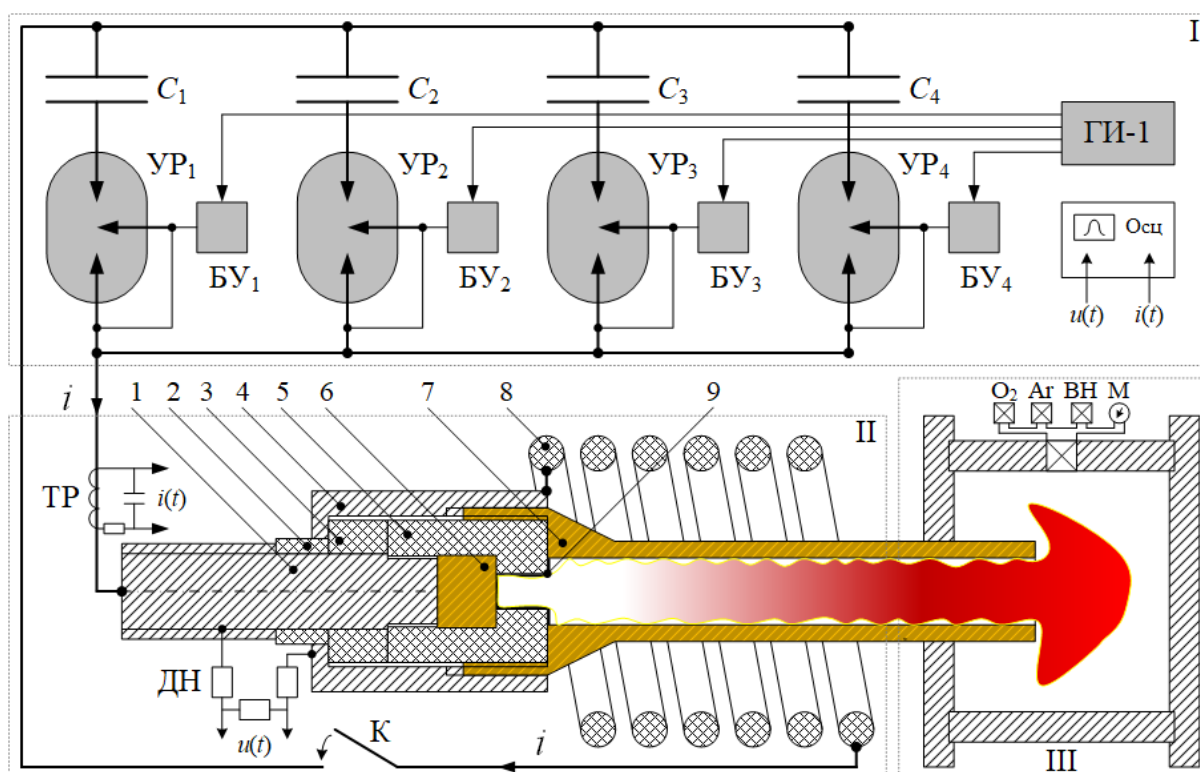


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: I – емкостной накопитель энергии, II – коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (1 – хвостовик центрального электрода, 2 – проходной изолятор, 3 – опорный изолятор, 4 – металлическая обойма, 5 – изолятор наконечника, 6 – стальная вставка центрального электрода, 7 – стальной электрод-ствол, 8 – внешняя индуктивная система, 9 – разрушаемая перемычка), III – камера-реактор (ВН – вакуумный насос, М – манометр)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: I – capacitive energy storage, II – coaxial magnetoplasma accelerator (1 – central electrode shank, 2 – pass-through insulator, 3 – support insulator, 4 – metal holder, 5 – tip insulator, 6 – steel central electrode insertion, 7 – steel barrel electrode, 8 – external inductive system, 9 – destructible jumper), III – reactor chamber (ВН – vacuum pump, М – gauge)

Измерение электроэрозии электродов-стволов осуществлялось на аналитических весах HR-250AZ (A&D, Япония) с дискретностью 0,1 мг. Фотограммы плазменной струи размером кадра 128×128 пикселей были получены с помощью высокоскоростной фоторегистрации на установке Photron FastCAM SA1.1 (Photron Limited, Япония) с частотой 180000 кадров в секунду.

Результаты и обсуждение

Первым ключевым фактором, влияющим на процесс формирования и развития дугового разряда, является способ его инициирования. Как было отмечено ранее, в рассматриваемой системе принципиально возможно реализовать два варианта инициирования дугового разряда в ускорительном канале коаксиального магнитоплазменного ускорителя: с использованием металлических проволочек или с помощью графитизации. Первый вариант (рис. 2, а) – металлические проволочки, установленные между вставкой наконечника центрального электрода и электродом-стволом, второй вариант (рис. 2, б) – нанесение тонкого слоя графитового аэрозоля на внутреннюю поверхность КФПС. С целью определения наиболее эффективного способа инициирования дугового разряда в ускорительном канале КМПУ проведены сравни-

тельные экспериментальные исследования по оценке их влияния на энергетические параметры системы (рис. 3).

На рис. 3 представлены осциллограммы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$, кривые мощности $P(t)$ и подведенной энергии $W(t)$ при рассматриваемых способах инициирования дугового разряда и прочих одинаковых условиях ($U_3=2,5$ кВ, $C_3=14,4$ мФ). Расчет мощности и энергии проводился по общеизвестным формулам (1) и (2) соответственно:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (1)$$

$$w(t) = \sum (p(t) \cdot \Delta t), \quad (2)$$

где $i(t)$, $u(t)$, $p(t)$, $w(t)$ – мгновенные значения тока, напряжения, мощности и подведенной энергии; Δt – шаг времени.

При использовании металлических проволочек, сопротивление которых составляло около 1 мОм, при замыкании силовых ключей по контуру через перемычку в виде проволочек через несколько микросекунд начинает протекать ток разряда емкостного накопителя энергии, который определяется зарядным напряжением и параметрами контура. При достижении током некоторого значения, вероятно, происходит электровзрыв проволочек, сопровождающийся

скачкообразным изменением параметров [20–23], о чем свидетельствует характер плазменной струи на кадрах высокоскоростной фотосъемки (рис. 2, а), после чего и начинается формирование плазменной структуры дугового разряда. Напряжение электро-взрывного импульса в течение нескольких микросекунд плавно снижается до уровня дуговой стадии

разряда. За счет протекания нарастающего тока по электроразрядной плазме происходит ускорение плазменной структуры, что сопровождается ростом мощности разряда $P(t)$ до амплитудного значения, после чего происходит плавное уменьшение мощности в связи с разрядом конденсаторных батарей.

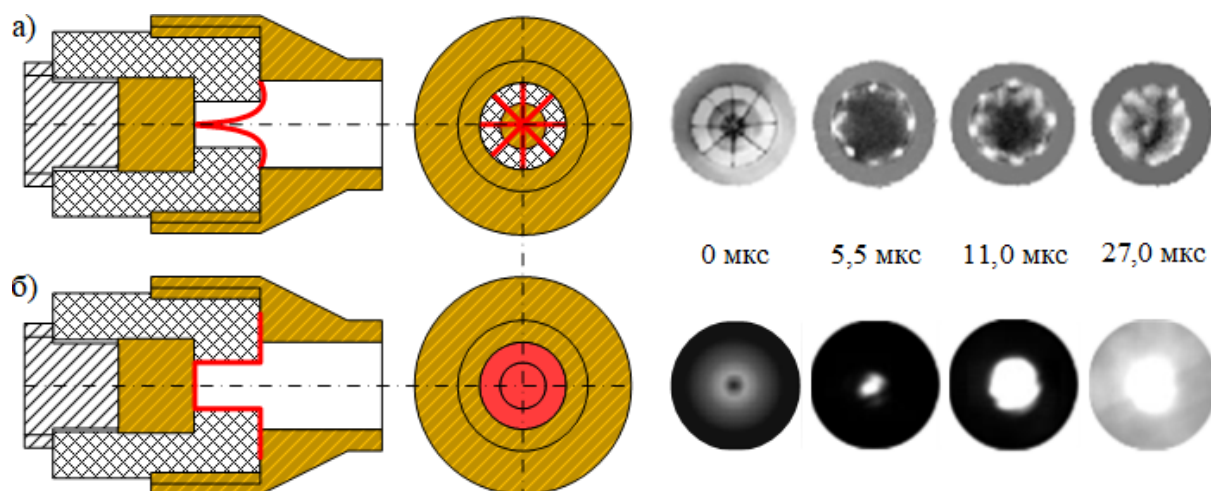


Рис. 2. Узел центрального электрода коаксиального магнитоплазменного ускорителя и высокоскоростные фотографии процесса инициирования дугового разряда: а) металлическими проволочками; б) графитизацией поверхности

Fig. 2. Coaxial magnetoplasma accelerator central electrode assembly and high-speed photograms of arc discharge initiation: а) metal wires; б) graphitized surface

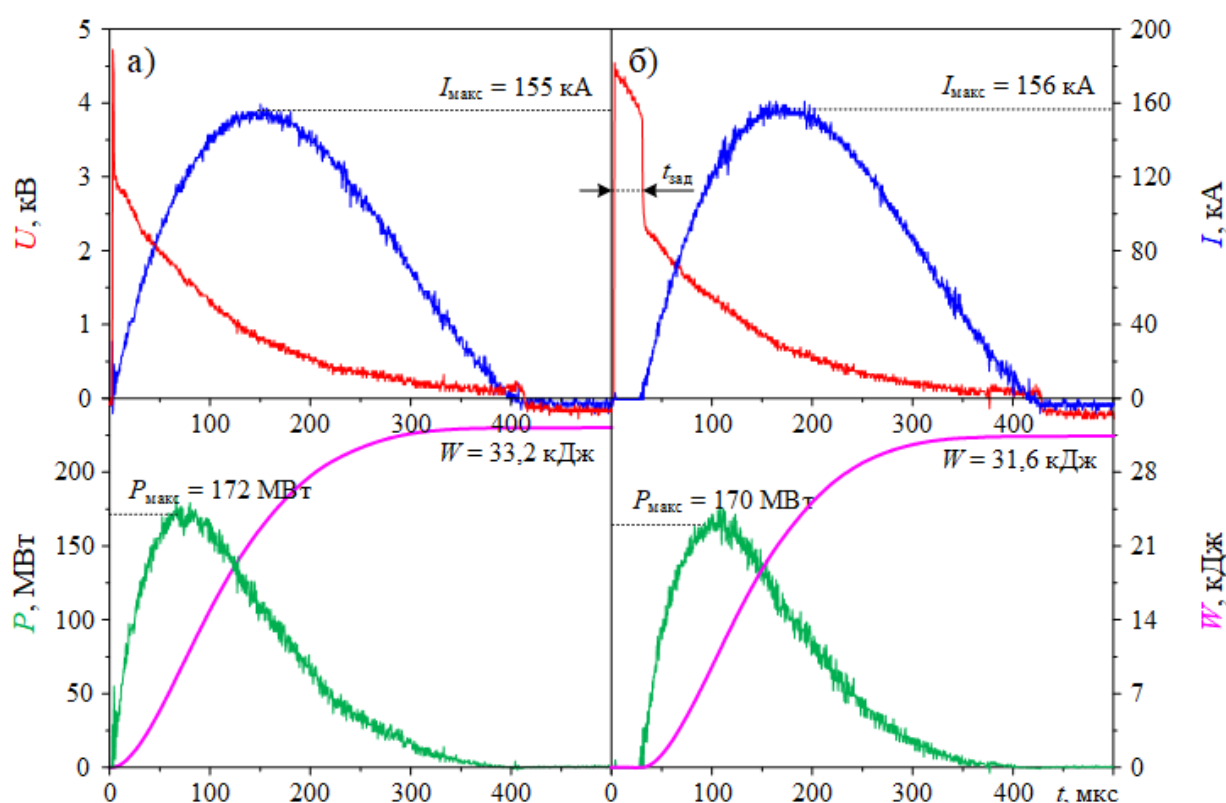


Рис. 3. Осциллограммы $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ и $W(t)$ процесса плазмодинамического синтеза при разных способах инициирования дугового разряда: а) металлические проволочки; б) графитизация поверхности

Fig. 3. Oscillograms of $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ and $W(t)$ of the plasma dynamic synthesis for different methods of arc discharge initiation: а) metal wires; б) surface graphitization

При использовании графитизации в качестве токопроводящей перемычки между электродами ускорителя наблюдается изменение в формировании дугового разряда. Подача напряжения на электроды ускорителя генерирует ток по углеродной перемычке, обусловленный величиной зарядного напряжения и общим сопротивлением контура, включающего сопротивление углеродной перемычки значением около 300 Ом. Под действием тока перемычка нагревается и электрически разрушается через некоторое время $t_{\text{зад}}$ – время задержки. Данный процесс можно описать с помощью теории теплового пробоя [24–27], обусловленного тепловыми процессами, протекающими в материале при воздействии на него электрического поля. Тепловой пробой происходит в случае выделения в диэлектрическом материале за счет высоких диэлектрических потерь большого количества энергии, превышающего значения, которые могут быть рассеяны в текущих условиях в окружающую среду. В рассматриваемом случае межэлектродное пространство, заполненное диэлектриком, электрически неоднородно, поскольку углеродный слой перемычки обладает повышенной проводимостью. При подаче напряжения возникает множество дискретных каналов повышенной проводимости, обеспечивающих Джоулев разогрев перемычки, что приводит к еще большему нарастанию тока в цепи, так как сопротивление межэлектродного участка резко уменьшается. Происходит нарушение теплового равновесия, процесс становится лавинообразным: проводимость и температура взаимно «разгоняют» друг друга. В итоге происходит дальнейшее нарастание тепла до момента, когда количество теплоты, выделяемое в объеме КФС за счет диэлектрических потерь, превышает количество теплоты, рассеиваемое системой в текущих условиях. Это является моментом возникновения теплового пробоя с последующим формированием плазменной структуры дугового разряда [28–30], как это видно на кадрах высокоскоростной фотосъемки (рис. 2, б).

Судя по осциллограммам (рис. 3), оба способа инициирования плазменной струи являются сопоставимыми по энергетическим параметрам. Применение металлических проволочек образует процесс, близкий к электровзрыву проводников [31, 32]. Использование метода графитизации приводит к тепловому пробую межэлектродного промежутка и появлению времени задержки, которое требуется на разогрев. При сравнении рассматриваемых способов инициирования предпочтение следует отдать графитизации поверхности изолятора, так как этот метод является более технологичным и надежным, простым в исполнении, а также экономит время на подготовку наконечника, что подтверждено многочисленными экспериментами.

Другим немаловажным фактором, влияющим на процесс развития дугового разряда, является диаметр ускорительного канала электрода-ствола, поэтому с целью определения наиболее эффективного диаметра ускорительного канала (УК) с позиции минимизации энергетики процесса при сохранении массы синтезированного продукта проведены исследования при диаметрах 12, 16 и 22 мм.

Электрод-ствол в плазмодинамическом методе является основным из расходных материалов. Во время процесса плазмодинамического синтеза железа, эродируемое с поверхности УК, вовлекается в движение плазменного потока, после чего распыляется в объеме камеры-реактора со свободной границы сверхзвуковой плазменной струи, в результате чего происходит кристаллизация жидкофазного материала в кислородсодержащей атмосфере и образование микро- и наночастиц оксида железа. Масса синтезируемого материала в данном случае будет определяться параметрами газовой среды и, самое главное, количеством эродированного материала, зависящим от энергетических параметров процесса и геометрии ускорительного канала. Для изучения влияния энергетических параметров на продукты плазмодинамического синтеза были проведены три экспериментальных серии с разными диаметрами ускорительных каналов (12, 16 и 22 мм) электродов-стволов. В каждой серии изменялось зарядное напряжение U_z , а параметры газообразной среды (100 % O_2) и суммарная емкость конденсаторов C_z оставались неизменными. Длина ускорительных каналов электрод-стволов $l_{\text{ук}}$ в серии экспериментов варьировалась незначительно. Исходные данные серии экспериментов, конструкционные параметры ускорительного канала (d – диаметр УК, $V_{\text{ук}}$ – объем УК) энергетические параметры (U_d – напряжение на электродах ускорителя в дуговой стадии разряда при максимальном значении тока, $I_{\text{макс}}$ – амплитуда тока дугового разряда, $P_{\text{макс}}$ – максимальная мощность, $t_{\text{имп}}$ – время импульса), массы электроэрозии электродов-стволов $\Delta m_{\text{ств}}$, а также удельные величины подведенной энергии $W/V_{\text{ук}}$ и электроэрозии $\Delta m/W$ представлены в табл. 1.

Сравнение результатов исследований при одинаковой удельной подведенной энергии (эксп. № 1.6, 2.1 и 3.1) свидетельствует о том, что уменьшение диаметра ускорительного канала электрода-ствола позволяет увеличить электроэрозионную наработку материала на ~65 % при более низких значениях подведенной энергии (№ 1.6 – 82,7 кДж, № 3.6 – 44,8 кДж).

На рис. 4 представлен график зависимости удельной электроэрозии от удельной подведенной энергии при разных диаметрах УК электродов-стволов. Из этой зависимости видно, что при уменьшении диаметра УК с 22 до 12 мм и при неизменной удельной энергии $W/V_{\text{ук}}=0,97\pm0,02$ кДж/см³ удельная электроэрозия повышается, таким образом, использование стального электрода-ствола с внутренним диаметром $d=12$ мм позволяет увеличить наработку синтезированного материала относительно больших калибров, а также увеличить максимальную удельную подведенную энергию для еще большей наработки материала.

На рис. 5 представлены осциллограммы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$, кривые мощности $P(t)$ и подведенной энергии $W(t)$, полученные в экспериментах с практически идентичной величиной удельной энергии $W/V_{\text{ук}}=0,97\pm0,02$ кДж/см³ (эксп. № 1.6, 2.1 и 3.1). Данные эксперименты выбраны из соображений демонстрации преимуществ системы при работе с меньшим диаметром УК. Во всех экспериментах при указанной

величине удельной подведенной энергии удастся достичь приблизительного равенства по удельной электроэрозионной наработке $\Delta m/W$ (№ 1.6 – 65,6 мг/кДж, № 2.1 – 68,8 мг/кДж и № 3.1 – 79,3 мг/кДж).

Таблица 1. Энергетические параметры серии экспериментов по выбору оптимального диаметра ускорительного канала

Table 1. Energy parameters of an experimental series on the choice of the optimal accelerating channel diameter

№ No.	d мм mm	$I_{ук}$ I_{ac} мм mm	$V_{ук}$ V_{ac} см ³ cm ³	U_c U_c кВ kV	C_c C_c мФ mF	W_c W_c кДж kJ	$U_{дг}$ U_{gr} кВ kV	$I_{макс}$ I_{max} кА kA	$P_{макс}$ P_{max} МВт MW	W W кДж kJ	$t_{имп}$ t_{pul} мкс μs	$\Delta m_{ств}$ Δm_b г/г g/g	$W/V_{ук}$ W/V_{ac} кДж/см ³ kJ/cm ³	$\Delta m/W$ $\Delta m/W$ мг/кДж mg/kJ
1.1	22	234,5	85,9	3,00	14,4	64,8	1,0	144	164	22,3	508	0,4	0,26	18,0
1.2		234,5	81,2	3,25	14,4	76,1	1,2	162	191	44,6	492	1,0	0,55	28,4
1.3		234,2	85,8	3,50	14,4	88,2	1,2	174	220	49,6	499	1,8	0,58	36,3
1.4		234,5	89,1	3,75	14,4	101,3	1,2	189	243	53,8	477	2,1	0,60	39,0
1.5		239,0	89,2	4,00	14,4	115,2	1,3	201	266	60,2	469	2,6	0,67	43,2
1.6		239,0	88,4	4,00	19,2	153,6	1,4	228	329	82,7	590	6,0	0,99	65,6
2.1	16	216,2	44,0	2,80	14,4	56,5	0,9	113	101	24,2	448	2,7	0,98	68,8
2.2		213,8	44,6	3,00	14,4	64,8	1,0	167	190	43,0	423	4,0	1,07	73,7
2.3		208,7	43,6	3,00	14,4	64,8	1,0	193	201	47,8	433	4,3	1,18	81,3
2.4		216,3	45,7	3,20	14,4	73,7	1,1	191	213	51,6	434	6,2	1,27	103,1
2.5		205,7	41,9	3,30	14,4	78,4	1,1	211	252	57,9	452	8,2	1,48	116,7
2.6		210,5	42,3	3,50	14,4	88,2	1,3	175	265	61,8	432	9,0	1,58	124,7
3.1	12	180,0	20,4	1,90	14,4	26,0	0,8	106	82	19,3	413	1,5	0,95	79,3
3.2		180,0	20,4	2,10	14,4	31,8	0,9	122	99	23,5	413	2,5	1,15	104,5
3.3		180,0	20,4	2,30	14,4	38,1	0,9	142	121	27,6	404	3,6	1,36	130,1
3.4		180,0	20,4	2,50	14,4	45,0	0,9	155	137	31,9	404	4,5	1,57	147,8
3.5		180,0	20,4	2,70	14,4	52,5	1,1	167	185	39,7	424	8,3	2,05	219,3
3.6		180,0	20,4	2,90	14,4	60,6	1,1	180	192	44,8	409	9,9	2,20	240,6

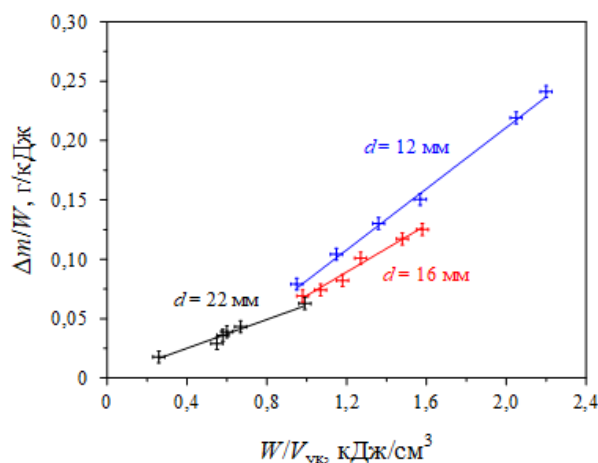


Рис. 4. График зависимости удельной электроэрозии $\Delta m/W$ от удельной подведенной энергии $W/V_{ук}$ при разных диаметрах ускорительных каналов электродов-стволов

Fig. 4. Graph of the dependence of specific electric erosion $\Delta m/W$ on the specific supplied energy W/V_{ac} at different acceleration channel diameters of barrel electrodes

Однако ключевым отличием является то, что достижение таких удельных показателей осуществляется при разных энергетических параметрах процесса. Так, из сравнения осциллограмм наглядно видно значительное уменьшение амплитуды тока дугового разряда в 2 раза, мощности дугового разряда в 4 раза и величины подведенной энергии в 5 раз (эксп. № 1.6 и 3.1). Согласно закону Ампера, представленному в формуле (3), уменьшение тока приводит к снижению электродинамических усилий на все узлы системы, что, несомненно, является положительным моментом,

поскольку позволяет продлить ресурс работы всех элементов конструкции.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot L}{r}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; I_1, I_2 – величины токов в проводниках (шинах), А; L – длина проводников, м; r – расстояние между проводниками (шинами), м.

Таким образом, уменьшение диаметра электрода-ствола в рассматриваемой системе является целесообразным как с позиции формирования дугового разряда с минимальным воздействием на элементы разрядного контура, так и с позиции повышения производительности по получению дисперсных материалов при меньших энергетических затратах.

Геометрические параметры канала формирования плазменной структуры также играют важную роль в процессе инициирования дугового разряда, поскольку задают конфигурацию плазменной структуры и, соответственно, влияют на её ускорение и энергетические характеристики процесса. Для оценки влияния геометрии КФС на электрические характеристики дугового разряда проведена серия экспериментов с изменением длины канала формирования плазменной структуры от 5,5 до 11,5 мм (рис. 6). Диаметр во всех случаях оставался неизменным, что обусловлено технологическими особенностями изготовления наконечника центрального электрода. Зарядное напряжение ($U_c=2,5$ кВ) и зарядная емкость накопителя энергии ($C_c=14,4$ мФ) были неизменными во всей серии экспериментов. За счет регистрации во время процесса синтеза значений тока дугового разряда $i(t)$ и напряжения на электродах $u(t)$ построены кривые $i(t)$ и $u(t)$, а также кривые мощности $p(t)$ и подведенной энергии $w(t)$, представленные на рис. 7.

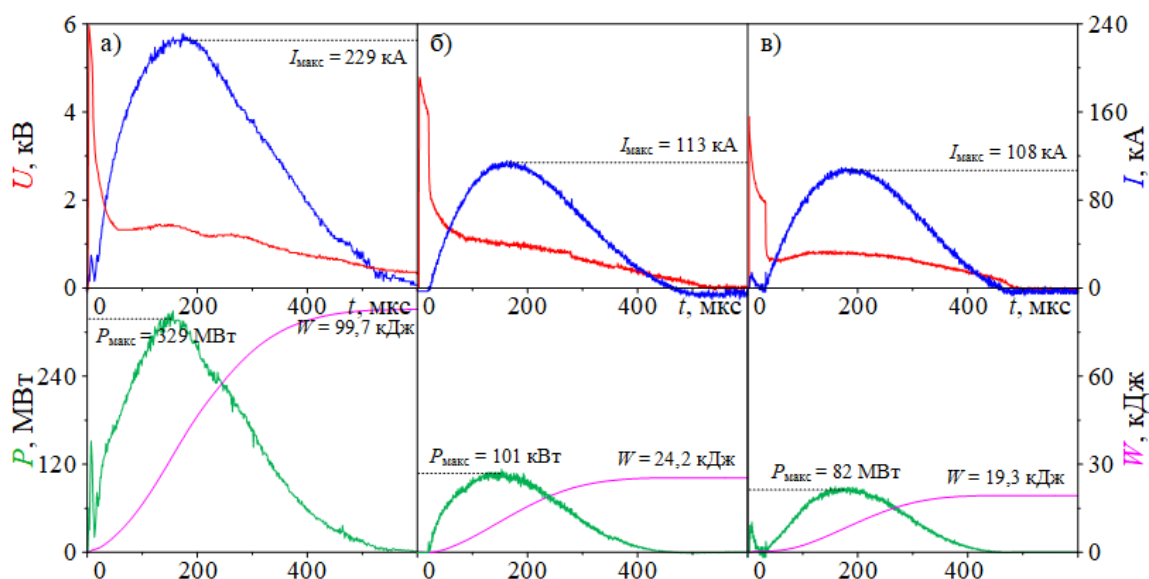


Рис. 5. Осциллограммы $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ и $W(t)$ процесса плазодинамического синтеза при удельной энергии $W/V_{ж}=0,97\pm0,02$ кДж/см³ (а – эксп. № 1.6, б – эксп. № 2.1, в – эксп. № 3.1)

Fig. 5. Oscillograms of $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ and $W(t)$ of the plasma dynamic synthesis at the specific energy $W/V_{ac}=0,97\pm0,02$ kJ/cm³ (а – experiment № 1.6, б – experiment № 2.1, в – experiment № 3.1)

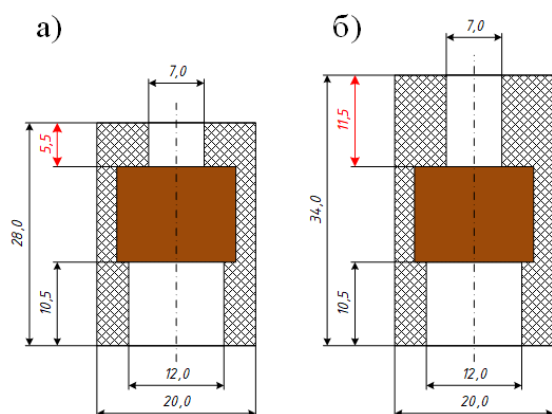


Рис. 6. Графическое изображение конструкции наконечника центрального электрода с разной длиной канала формирования плазменной структуры (мм): а) 5,5; б) 11,5

Fig. 6. Graphical representation of the central electrode tip design with different plasma formation zone lengths (mm): а) 5,5; б) 11,5

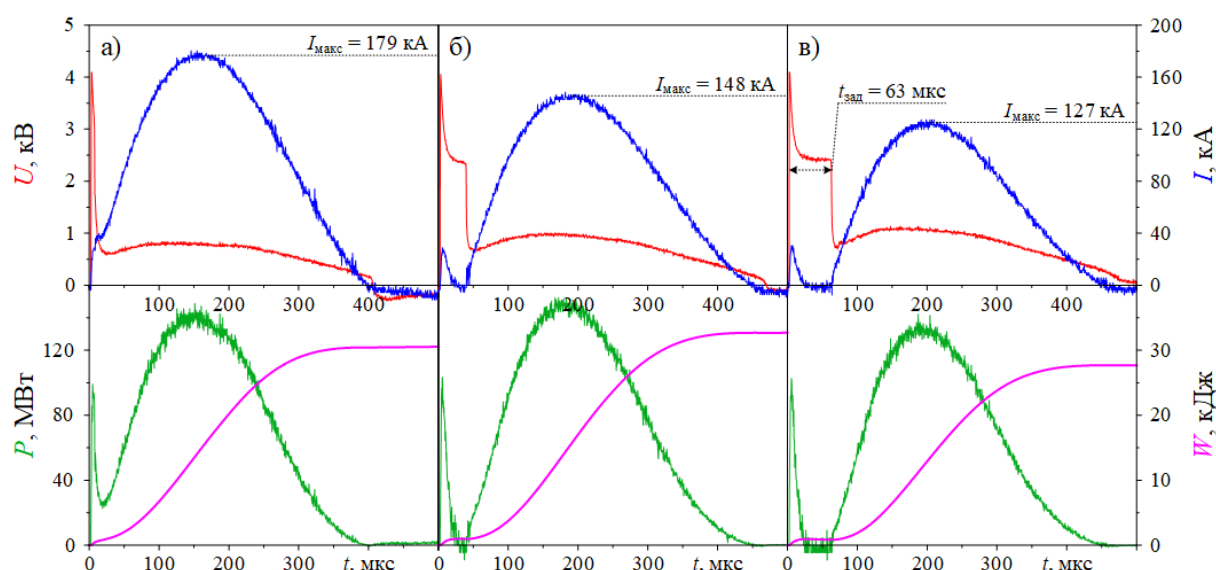


Рис. 7. Осциллограммы $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ и $W(t)$ процесса плазодинамического синтеза при разных длинах канала формирования плазменной структуры (мм): а) 5,5; б) 9,5; в) 11,5

Fig. 7. Oscillograms of $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$, and $W(t)$ of the plasma dynamic synthesis at different lengths of the plasma formation zone (mm): а) 5,5; б) 9,5; в) 11,5

Основные энергетические параметры серии экспериментов представлены в табл. 2. Из представленных данных видно, что увеличение длины КФПС приводит к росту длительности времени задержки, что в основном обусловлено повышением величины сопротивления разрушаемой углеродной перемычки от 4,4 до 9,0 мОм. Помимо отмеченных особенностей характера осциллограмм, увеличение длины канала формирования плазменной структуры также сказыва-

ется на уменьшении амплитуды тока дугового разряда и приводит к увеличению напряжения дуги. Главным условием ограничения $I_{\max}$ дугового разряда является уменьшение разности напряжения источника питания U_3 и противоположно направленного падения напряжения на дуге U_d , что отображено в выражении (4):

$$U_3 - U_d = \Delta U \rightarrow 0. \quad (4)$$

Таблица 2. Энергетические параметры серии экспериментов по выбору оптимальной длины канала формирования плазменной структуры

Table 2. Energy parameters of an experimental series on the choice of the optimal length of plasma formation zone

$l_{\text{КФПС}}/l_{\text{PFZ}}$ мм/мм	U_3/U_c кВ/кВ	C_3/U_c мФ/мФ	$U_d/U_{\text{ар}}$ кВ/кВ	$I_{\max}/I_{\max}$ кА	$P_{\max}/P_{\max}$ МВт/МВт	$t_{\text{имп}}/t_{\text{пул}}$ Мкс/μs	W кДж/кДж	η %	$t_{\text{зад}}/t_{\text{дел}}$ Мкс/μs	$R_d/R_{\text{ар}}$ мОм/мΩ
5,5	2,5	14,4	0,76	179	139	384	30,2	67,1	8	4,4
7,5			0,90	165	148	396	31,7	70,4	13	5,7
8,5			0,91	156	144	404	31,9	70,9	27	6,0
9,5			0,97	148	144	409	32,6	72,4	39	6,8
10,5			1,02	143	150	414	32,9	73,1	35	7,7
11,0			1,09	132	146	420	31,4	69,7	31	8,3
11,5			1,02	127	128	383	27,7	59,8	63	9,0

Прекращение нарастания рабочего тока происходит в момент времени, когда $U_d=U_3$. Поэтому рост $I_{\text{КФПС}}$, обеспечивающий повышение U_d , в котором определяющую долю составляет падение напряжения на участке КФПС, приводит к постоянному снижению $I_{\max}$. Однако на фоне монотонно растущих R_d , U_d и снижающегося $I_{\max}$, наблюдается появление максимума мощности разряда $P_{\max}$ и выделившейся в УК энергии W при длине КФПС 9,5–10,5 мм. Дальнейшее увеличение длины КФПС закономерно для данных условий сопровождается снижением мощности и энергии, выделяющейся в УК, и переходом процесса в «коммутационный» режим, близкий к режиму работ токоограничивающего выключателя. Поэтому часть накопленной энергии остается в ЕНЭ и не используется, о чем свидетельствует положительное значение остаточного напряжения (рис. 7, в). Наиболее очевидно это иллюстрирует кривая зависимости КПД преобразования накопленной энергии в ЕНЭ энергии W_3 в подведенную энергию W , выделившуюся в УК (рис. 8). Зависимость коэффициента полезного действия экспериментальной установки от длины канала формирования плазменной структуры КПД установки считалось по формуле (5):

$$\eta = \frac{W}{W_3} = \frac{W}{\frac{C_3 \cdot U_3^2}{2}} = \frac{2 \cdot W}{C_3 \cdot U_3^2}, \quad (5)$$

где W_3 , C_3 , U_3 – зарядные энергия (накопленная), емкость накопителя энергии, напряжение соответственно.

Видно, что КПД практически линейно растет при увеличении КФПС от 5,5 до 10,5 мм и достигает значения $\eta \approx 73$ %. Это обеспечивает максимальную электроэрозионную наработку материала, выносимого из УК с наибольшей скоростью плазменной струи при минимально возможном уровне $I_{\max}$. Однако при используемой конструкции КМПУ с $l_{\text{КФПС}}=10,5$ мм возрастает вероятность разрушения КФПС, особенно при повторных использованиях наконечника цен-

трального электрода. Таким образом, с целью исключения отказов или нестабильной работы КМПУ выбран наконечник с $l_{\text{КФПС}}=9,5$ мм, дающий некоторое снижение η до ~ 72 %.

Только за счет такого изменения конструкции наконечника центрального электрода существует возможность уменьшить максимальный ток на 29 %. Однако увеличение длины КФПС при использовании графитизации в качестве способа иницирования дугового разряда приводит к возрастанию времени задержки, что может привести к закрытию игнитрона без разряда конденсаторной батареи. Помимо отмеченных конструкционных ограничений, целесообразным представляется режим работы с максимальным КПД преобразования накопленной энергии в подведенную.

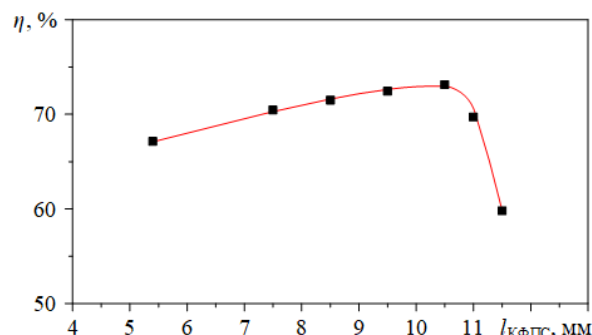


Рис. 8. Зависимость коэффициента полезного действия преобразования энергии в экспериментальной установке плазмодинамического синтеза от длины канала формирования плазменной структуры

Fig. 8. Dependence of the energy conversion efficiency in the experimental plasma dynamic synthesis unit on the length of the plasma formation zone

Заключение

Рассмотрены два способа иницирования дугового разряда с использованием металлических проволо-

чек и графитизации. Установлено, что они не влияют на энергетические параметры процесса плазмодинамического синтеза, однако применение графитизации выглядит предпочтительней в силу технологичности такого подхода, который обеспечивает простоту подготовки ускорителя и надежность его работы. Установлена возможность снижения амплитуды тока дугового разряда на 29 % при увеличении длины канала формирования плазменной структуры с 5,5 до 11,5 мм, что обеспечивает уменьшение электродинамических нагрузок на все узлы системы.

Экспериментально определена оптимальная длина канала формирования плазменной структуры 9,5 мм, способствующая получению высокого КПД преобразования накопленной энергии в подведенную и надежности работы системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания № FEWZ-2021-0014 (Научно-технические основы и прикладные решения комплексной энерготеплотехнологической переработки биомассы для обеспечения экологически чистых технологий в энергетике и металлургии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Laroussi M. Cold plasma in medicine and healthcare: The new frontier in low temperature plasma applications // *Frontiers in Physics*. – 2020. – V. 8. – Article no. 74.
- Power efficiency estimation of an inductive plasma generator using propellant mixtures of oxygen, carbon-dioxide and argon / R. Georg, A.R. Chadwick, B.B. Dally, G. Herdrich // *Acta Astronautica*. – 2021. – V. 179. – P. 536–545.
- Local pressure calibration method of inductively coupled plasma generator based on laser Thomson scattering measurement / J. Sun, Y.Q. Liu, Y. Zheng, J. Shi, Y. Li, Y. Zhao, X. Zhang, H. Cai, X. Zhu, X. Sun, Z. Chao, H. Yin, H. Ding // *Scientific Reports*. – 2022. – V. 12. – № 1. – P. 1–9.
- The assessment of carbon dioxide dissociation using a single-mode microwave plasma generator / G. Mogildea, M. Mogildea, C. Popa, G. Chiritoi // *Molecules*. – 2020. – V. 25. – № 7. – Article no. 1558.
- Sanito R.C., You S.J., Wang Y.F. Application of plasma technology for treating e-waste: A review // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – T. 288. – Article no. 112380.
- Research status of engine emissions treated by nonthermal plasma / Z. Zhang, Z. Sui, C. Song, W. Lu, X. Fan, H. Li, P. Wang // *Environmental Technology & Innovation*. – 2023. – Article no. 103007.
- Proch J., Niedzielski P. Recent applications of continuous flow chemical vapor and hydride generation (CVG, HG) coupled to plasma-based optical emission spectrometry (ICP OES, MIP OES) // *Talanta*. – 2022. – V. 243. – Article no. 123372.
- Microwave plasma torch mass spectrometry for some Rare Earth Elements / L. Yuan, X. Zhou, Y. Cao, N. Yan, L. Peng, X. Lai, H. Tao, L. Li, T. Jiang, Z. Zhu // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2022. – V. 15. – № 12. – Article no. 104379.
- Sari A. Characterization of photoneutron fluxes emitted by electron accelerators in the 4–20 MeV range using Monte Carlo codes: a critical review // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2023. – V. 191. – Article no. 110506.
- Undulator design for a laser-plasma-based free-electron-laser / A. Ghaith, M.-E. Couprie, D. Oumbarek-Espinos, I.A. Andriyash, F. Massimo, J.A. Clarke, M. Courthold, V. Bayliss, A. Bernhard, M. Trunk, M. Valléau, O. Marcouillé, A. Chancé, S. Licciardi, V. Malka, F. Nguyen, G. Dattoli // *Physics reports*. – 2021. – V. 937. – P. 1–73.
- Subramaniam V., Panneerchelvam P., Raja L.L. Modeling of thermalization phenomena in coaxial plasma accelerators // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2018. – V. 51. – № 21. – Article no. 215203.
- Measurement of plasma stream velocity in a pulsed plasma accelerator / N. Talukdar, A. Ahmed, S. Borthakur, N.K. Neog, T.K. Borthakur, J. Ghosh // *Physics of Plasmas*. – 2019. – V. 26. – № 6. – Article no. 062711.
- Current sheet characteristics of a parallel-plate electromagnetic plasma accelerator operated in gas-prefilled mode / S. Liu, Y. Huang, H. Guo, T. Lin, D. Huang, L. Yang // *Physics of Plasmas*. – 2018. – V. 25. – № 5. – Article no. 053506.
- Beemer H.D., McNab I.R. Launch parameters of a lunar ice payload traveling via electromagnetic mass accelerator // *Acta Astronautica*. – 2023. – V. 207. – P. 24–32.
- Tanaka M., Murakami M. Relativistic and electromagnetic molecular dynamics simulations for a carbon-gold nanotube accelerator // *Computer Physics Communications*. – 2019. – V. 241. – P. 56–63.
- Optical emission spectroscopy investigation of the current sheet in a small-bore parallel-plate electromagnetic plasma accelerator / S. Liu, Y. Huang, Y. Zhang, W. Zhan, M. Yu, L. Yang // *Physics of Plasmas*. – 2018. – V. 25. – № 11. – Article no. 113505.
- Subramaniam V., Raja L.L. A plasma-vacuum interface tracking algorithm for magnetohydrodynamic simulations of coaxial plasma accelerators // *Journal of Computational Physics*. – 2018. – V. 366. – P. 207–225.
- Multi-pulse operation of coaxial magnetic plasma accelerator for dynamic synthesis of iron oxide powder / A.A. Sivkov, I.I. Shanenkov, A.S. Ivashutenko, M.I. Gukov, L. Li, G. Li, V. Khan // *Russian Physics Journal*. – 2019. – V. 62. – № 6. – P. 1001–1008.
- Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Никитин Д.С. Прямой динамический синтез нанодисперсных фаз оксидов титана при распылении электроразрядной плазмы титана в воздушную атмосферу // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 42. – № 23. – С. 21–27.
- Влияние энергетики плазмодинамического синтеза в системе Si-C на фазовый состав и дисперсность продукта / А.А. Сивков, Д.С. Никитин, А.Я. Пак, И.А. Рахматуллин // *Российские нанотехнологии*. – 2015. – Т. 10. – № 1–2. – С. 34–39.
- Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis / A. Sivkov, D. Nikitin, I. Shanenkov, A. Ivashutenko, I. Rakhmatullin, A. Nassirbayev // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2019. – V. 79. – P. 123–130.
- Morozov V., Kats V. Forming and propagation of the cracks initiated with electric explosion of wires in polymer materials // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – V. 39. – P. 432–440.
- Copper ferrite/copper oxides (I, II) nanoparticles synthesized by electric explosion of wires for high performance photocatalytic and antibacterial applications / E.A. Glazkova, O.V. Bakina, N.G. Rodkevich, A.A. Mosunov, E.A. Vornakova, V.R. Chzhzhou, M.I. Lerner // *Materials Science and Engineering: B*. – 2022. – V. 283. – Article no. 115845.
- Influences of the burden on the fracture behaviour of rocks by using electric explosion of wires / J. Peng, X. Wang, F. Zhang, X. Yang, J. Gao // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2022. – V. 118. – Article no. 103270.
- Control of cluster coalescence during formation of bimetallic nanoparticles and nanoalloys obtained via electric explosion of two wires / K.V. Suliz, A.Y. Kolosov, V.S. Myasnichenko, N.I. Nepsha, N.Y. Sdobnyakov, A.V. Pervikov // *Advanced Powder Technology*. – 2022. – V. 33. – № 3. – Article no. 103518.
- Interface detection from laser drilling of air plasma-sprayed thermal barrier coatings by laser-induced breakdown spectroscopy / W. Cheng, Y. Liu, W. Wang, X. Zhao, D. Peng // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2021. – V. 137. – Article no. 106351.
- Dynamic breakdown of passive films on stainless steel during in situ thermal oxidation / Y. Chen, P. Tang, S. Qiao, S. Liu, X. Yang, A. Li // *Corrosion Science*. – 2022. – V. 209. – Article no. 110799.
- Effects of frequency and thermal conductivity on dielectric breakdown characteristics of epoxy/cellulose/BN composites fabricated by ice-templated method / T. Yao, K. Chen, T. Niu,

- Y. Yang // Composites Science and Technology. – 2021. – V. 213. – Article no. 108945.
29. Pal S., Reddy K.V., Deng C. Improving thermal stability and Hall-Petch breakdown relationship in nanocrystalline Cu: a molecular dynamics simulation study // Materials Letters. – 2022. – V. 324. – Article no. 132821.
30. Küchler A. High voltage engineering fundamentals – technology – applications. – Berlin: Springer Vieweg, 2018. – 650 p.
31. Wadhwa C.L. High voltage engineering. – New Delhi: New Age International, 2007. – 312 p.
32. Франц В. Пробой диэлектриков. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 208 с.

Поступила: 17.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 10.05.2023 г.

Информация об авторах

Циммерман А.И., лаборант-исследователь лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета; аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шаненков И.И., кандидат технических наук, заведующий лабораторией ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета; младший научный сотрудник Лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Насырбаев А.Р., инженер организационного отдела Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Никитин Д.С., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сивков А.А., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 533.9.03

INFLUENCE OF CONFIGURATION OF THE ELECTRODE SYSTEM OF A COAXIAL MAGNETOPLASMA ACCELERATOR ON ARC DISCHARGE FORMATION AND DEVELOPMENT

Alexander I. Tsimmerman^{1,2},
alextsimmer@yandex.ru

Ivan I. Shanenkov^{1,2},
i.i.shanenkov@utmn.ru

Artur R. Nassyrbayev²,
arn1@tpu.ru

Dmitry S. Nikitin²,
nikitindmsr@yandex.ru

Alexander A. Sivkov²,
sivkov@tpu.ru

¹ Tyumen State University,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is explained by a wide range of practical areas, where various plasma generators can be used, including analytical devices, technological installations, tokamaks, ion and plasma engines, satellites, laser technology, as well as by the possibility of applying them for both producing coatings on various surfaces and synthesizing fine and nanopowders.

The main aim of the research is to determine the best way to initiate an arc discharge in the acceleration channel of the coaxial magnetoplasma accelerator, to estimate the effect of the plasma formation zone configuration on the electrodynamic loads of the accelerator, and to calculate the efficiency of conversion of stored energy to supplied one.

Objects: coaxial magnetoplasma accelerator, arc discharge initiation, central electrode, electrode-barrel, plasma formation zone.

Methods: experiment, plasma dynamic synthesis, measurement and registration of pulsed currents and voltages, electrical erosion measurement by means of weighing the eroding electrode-bore, high-speed photoregistration of the plasma jet.

Results. Two methods of arc discharge initiation using metal wires and graphitization were considered. It is established that they do not affect the energy parameters of the plasma dynamic synthesis, but the graphitization looks preferable due to the greater processability of the procedure that provides easy accelerator preparation and reliability of its operation. The possibility of reducing the arc discharge current amplitude by 29 % with increasing the plasma formation zone length from 5,5 to 11,5 mm was established that results in reducing electrodynamic loads on all system nodes. The optimal plasma formation zone length of 9,5 mm was determined to provide obtaining a high efficiency of conversion of stored energy into supplied energy and reliability of the system operation.

Key words:

Plasma dynamic synthesis, coaxial magnetoplasma accelerator, arc discharge, pulsed electric discharge plasma, electric erosion.

The research was financially supported by the State assignment no. FEWZ-2021-0014 (Scientific and technical bases and applied solutions of complex energy heat technology processing of biomass for providing environmentally friendly techniques in power engineering and metallurgy).

REFERENCES

1. Laroussi M. Cold plasma in medicine and healthcare: The new frontier in low temperature plasma applications. *Frontiers in Physics*, 2020, vol. 8, article no. 74.
2. Georg R., Chadwick A.R., Dally B.B., Herdrich G. Power efficiency estimation of an inductive plasma generator using propellant mixtures of oxygen, carbon-dioxide and argon. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 179, pp. 536–545.
3. Sun J., Liu Y. Q., Zheng Y., Shi J., Li Y., Zhao Y., Zhang X., Cai H., Zhu X., Sun X., Chao Z., Yin H., Ding H. Local pressure calibration method of inductively coupled plasma generator based on laser Thomson scattering measurement. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 1–9.
4. Mogildea G., Mogildea M., Popa C., Chiritoi G. The assessment of carbon dioxide dissociation using a single-mode microwave plasma generator. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 7, article no. 1558.
5. Sanito R.C., You S.J., Wang Y.F. Application of plasma technology for treating e-waste: a review. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 288, article no. 112380.
6. Zhang Z., Sui Z., Song C., Lu W., Fan X., Li H., Wang P. Research status of engine emissions treated by nonthermal plasma. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, article no. 103007.
7. Proch J., Niedzielski P. Recent applications of continuous flow chemical vapor and hydride generation (CVG, HG) coupled to plasma-based optical emission spectrometry (ICP OES, MIP OES). *Talanta*, 2022, vol. 243, article no. 123372.
8. Yuan L., Zhou X., Cao Y., Yan N., Peng L., Lai X., Tao H., Li L., Jiang T., Zhu, Z. Microwave Plasma Torch Mass Spectrometry for some Rare Earth Elements. *Arabian Journal of Chemistry*, 2022, vol. 15, no. 12, article no. 104379.
9. Sari A. Characterization of photoneutron fluxes emitted by electron accelerators in the 4–20 MeV range using Monte Carlo codes: a critical review. *Applied Radiation and Isotopes*, 2023, vol. 191, article no. 110506.
10. Ghaith A., Couprie M.-E., Oumbarek-Espinos D., Andriyash I.A., Massimo F., Clarke J.A., Courthold M., Bayliss V., Bernhard A., Trunk M., Valléau M., Marcouillé O., Chancé A., Licciardi S., Malka V., Nguyen F., Dattoli G. Undulator design for a laser-

- plasma-based free-electron-laser. *Physics reports*, 2021, vol. 937, pp. 1–73.
11. Subramaniam V., Panneerchelvam P., Raja L.L. Modeling of thermalization phenomena in coaxial plasma accelerators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, no. 21, article no. 215203.
 12. Talukdar N., Ahmed A., Borthakur S., Neog N. K., Borthakur T.K., Ghosh J. Measurement of plasma stream velocity in a pulsed plasma accelerator. *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 6, article no. 062711.
 13. Liu S., Huang Y., Guo H., Lin T., Huang D., Yang L. Current sheet characteristics of a parallel-plate electromagnetic plasma accelerator operated in gas-prefilled mode. *Physics of Plasmas*, 2018, vol. 25, no. 5, article no. 053506.
 14. Beemer H.D., McNab I.R. Launch parameters of a lunar ice payload traveling via electromagnetic mass accelerator. *Acta Astronautica*, 2023, vol. 207, pp. 24–32.
 15. Tanaka M., Murakami M. Relativistic and electromagnetic molecular dynamics simulations for a carbon-gold nanotube accelerator. *Computer Physics Communications*, 2019, vol. 241, pp. 56–63.
 16. Liu S., Huang Y., Zhang Y., Zhan W., Yu M., Yang L. Optical emission spectroscopy investigation of the current sheet in a small-bore parallel-plate electromagnetic plasma accelerator. *Physics of Plasmas*, 2018, vol. 25, no. 11, article no. 113505.
 17. Subramaniam V., Raja L.L. A plasma-vacuum interface tracking algorithm for magnetohydrodynamic simulations of coaxial plasma accelerators. *Journal of Computational Physics*, 2018, vol. 366, pp. 207–225.
 18. Sivkov A.A. Multi-pulse operation of coaxial magnetic plasma accelerator for dynamic synthesis of iron oxide powder. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 1001–1008.
 19. Sivkov A.A., Gerasimov D.Y., Nikitin D.S. Direct dynamic synthesis of nanodispersed phases of titanium oxides upon sputtering of electrodischarge titanium plasma into an air atmosphere. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, pp. 16–19.
 20. Sivkov A.A., Nikitin D.S., Pak A.Y., Rakhmatullin I.A. Influence of plasmodynamic synthesis energy in Si-C system on the product phase composition and dispersion. *Nanotechnologies in Russia*, 2015, vol. 10, no. 1–2, pp. 34–41.
 21. Sivkov A., Nikitin D., Shanenkov I., Ivashutenko A., Rakhmatullin I., Nassyrbayev A. Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, vol. 79, pp. 123–130.
 22. Morozov V., Kats V. Forming and propagation of the cracks initiated with electric explosion of wires in polymer materials. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 39, pp. 432–440.
 23. Glazkova E.A., Bakina O.V., Rodkevich N.G., Mosunov A.A., Vornakova E.A., Chzhou V.R., Lerner M.I. Copper ferrite/copper oxides (I, II) nanoparticles synthesized by electric explosion of wires for high performance photocatalytic and antibacterial applications. *Materials Science and Engineering: B*, 2022, vol. 283, article no. 115845.
 24. Peng J., Wang X., Zhang F., Yang X., Gao J. Influences of the burden on the fracture behaviour of rocks by using electric explosion of wires. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, vol. 118, article no. 103270.
 25. Suliz K.V., Kolosov A.Y., Myasnichenko V.S., Nepsha N.I., Sdobnyakov N.Y., Pervikov A.V. Control of cluster coalescence during formation of bimetallic nanoparticles and nanoalloys obtained via electric explosion of two wires. *Advanced Powder Technology*, 2022, vol. 33, no. 3, article no. 103518.
 26. Cheng W., Liu Y., Wang W., Zhao X., Peng D. Interface detection from laser drilling of air plasma-sprayed thermal barrier coatings by laser-induced breakdown spectroscopy. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, vol. 137, article no. 106351.
 27. Chen Y., Tang P., Qiao S., Liu S., Yang X., Li A. Dynamic breakdown of passive films on stainless steel during in situ thermal oxidation. *Corrosion Science*, 2022, vol. 209, article no. 110799.
 28. Yao T., Chen K., Niu T., Yang Y. Effects of frequency and thermal conductivity on dielectric breakdown characteristics of epoxy/cellulose/BN composites fabricated by ice-templated method. *Composites Science and Technology*, 2021, vol. 213, article no. 108945.
 29. Pal S., Reddy K.V., Deng C. Improving thermal stability and Hall-Petch breakdown relationship in nanocrystalline Cu: a molecular dynamics simulation study. *Materials Letters*, 2022, vol. 324, article no. 132821.
 30. Küchler A. *High voltage engineering fundamentals – technology – applications*. Berlin, Springer Vieweg, 2018. 650 p.
 31. Wadhwa C.L. *High voltage engineering*. New Delhi, New Age International, 2007. 312 p.
 32. Frants V. *Proboy dielektrikov* [Dielectric samples]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury Publ., 1961. 208 p.

Received: 17 April 2023.

Reviewed: 10 May 2023.

Information about the authors

Alexander I. Tsimmerman, laboratory assistant researcher, Tyumen State University; postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ivan I. Shanenkov, Cand. Sc., head of the laboratory, Tyumen State University; junior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artur R. Nassyrbayev, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry S. Nikitin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Sivkov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.311.212

РЕЖИМЫ РАБОТЫ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ

Лукутин Борис Владимирович¹,
lukutin48@mail.ru

Шандарова Елена Борисовна¹,
shandarovaelena@mail.ru

Попов Михаил Михайлович¹,
mix_mix13@tpu.ru

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Использование гидроэнергетического потенциала России для производства электроэнергии является одним из самых чистых и экологически безопасных методов, так как при этом не происходит выброса вредных веществ и углекислого газа в атмосферу. Кроме того, это надежный и эффективный источник энергии, так как вода является постоянным источником энергии. Для производства электроэнергии из воды используются гидрогенераторы, которые эффективно преобразуют энергию потока воды в электрическую энергию. Автобалластные системы имеют некоторые недостатки, которые связаны с трудностями обеспечения высокого качества производимой электроэнергии микрогидроэлектростанций. Это связано с тем, что нагрузка на автономную систему электроснабжения может изменяться не только по величине, но и по характеру, что существенно повышает требования к устройствам генерирования электроэнергии и стабилизации ее параметров.

Цель: определение диапазонов изменения выходных электрических параметров гидрогенератора, который не регулируется и работает в составе инверторной микрогидроэлектростанции для сельского бытового потребителя. Также ставится задача формулирования требований к гидрогенератору и силовым преобразовательным устройствам в статических и динамических режимах работы автономной системы электроснабжения.

Объект: микрогидроэлектростанция инверторного типа.

Методы: имитационное моделирование, программирование в среде Matlab Simulink.

Результаты. Разработана имитационная модель системы электроснабжения с инверторной микроГЭС. Предложена структура микроГЭС, а также получены диапазоны изменения напряжения генератора микроГЭС.

Ключевые слова:

микроГЭС, эффективность, алгоритм управления, стабилизация, инвертор, график нагрузки, накопитель электроэнергии.

Введение

Гидравлическая энергия малых водотоков широко используется для производства электроэнергии с помощью последовательного гидро-механического и электро-механического преобразования первичного энергоресурса – потока воды, обладающего кинетической и потенциальной составляющими гидроэнергии, первоисточником которых является гравитация Земли.

Относительно высокая энергетическая плотность потока воды по сравнению с другими природными возобновляемыми энергоресурсами: ветром, инсоляцией, а также возможность стабилизировать рабочий поток воды гидротурбины обеспечивают производство более дешевой электроэнергии по сравнению с другими установками возобновляемой энергетики. Например, в [1–4] предложена идея создания и оптимизации системы электроснабжения с эффективными источниками генерации энергии, которые могут использовать возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Эта концепция направлена на создание оптимальной конфигурации микросетей для повышения эффективности использования ВИЭ.

Возможность стабилизации энергии рабочего потока воды гидротурбины с помощью напорного тру-

бопровода, обеспечивающего неизменный напор и расход воды, логично приводит к возможности построения системы, стабилизирующей тормозной момент электромашинного генератора с помощью управляемой балластной нагрузки. Предложенная схема регулирования [5] позволяет обеспечить высокое качество выходных электрических параметров системы. В результате гидрогенератор работает в статическом режиме в оптимальной рабочей точке, генерируя электроэнергию с приемлемыми характеристиками качества: величины и частоты переменного напряжения [6]. Общей проблемой в управлении микроГЭС является нестабильное вращение турбины, вызванное изменением нагрузки от потребителей. Это приводит к изменению частотных колебаний в системе, которые могут вызвать повреждения как со стороны генерации, так и со стороны потребителей. В работе [7] приводят способ регулирования частоты с использованием емкостного накопителя энергии. Достоинствами балластных систем стабилизации режима работы микрогидроэлектростанции (микроГЭС) являются их относительная простота и, соответственно, дешевизна. Однако для обеспечения эффективной регулировки выходного напряжения микроГЭС по величине и частоте необходима двухканальная си-

стема регулирования мощности с приоритетом токового канала относительно частотного [8]. Это позволит обеспечить быстрый отклик системы на изменения нагрузки и поддерживать стабильность работы микроГЭС в различных условиях эксплуатации. В качестве регуляторов балластной нагрузки предлагаются системы стабилизации дискретного или фазорегулируемого типа с использованием управляемых силовых полупроводниковых приборов [9].

Недостатки автобалластных систем связаны с трудностями обеспечения высокого качества генерируемой электроэнергии микроГЭС в силу изменяющейся не только по величине, но и по характеру нагрузки автономной системы электроснабжения. Кроме того, собственно балластные нагрузки обычно представляют собой электронагревательные элементы, тепловая энергия которых не всегда нужна потребителю. Установленная мощность балласта должна равняться установленной мощности гидрогенератора, соответственно, балластная система вносит заметный вклад в технико-экономические характеристики энергетического оборудования микроГЭС.

Развитие силовой преобразовательной техники и электромашиностроения позволяют сегодня обеспечить высокое качество выходного напряжения микроГЭС с помощью автономного инвертора при одновременном снижении требований к ограничению диапазона частот вращения гидрогенератора. При достаточной механической прочности ротора генератора, например, используя магнитоэлектрический генератор, можно отказаться от системы балластной стабилизации. В ряде работ рассмотрены вопросы повышения отказоустойчивости электрических гидрогенераторов, однако не рассматриваются особенности функционирования в статических и динамических режимах работы [10–14]. В работе [15] приведены исследования рабочих режимов микроГЭС с переменной частотой вращения гидрогенератора.

Преимуществами инверторной микроГЭС являются дальнейшее упрощение конструкции гидрогенератора, наличие звена постоянного тока в структуре преобразователей первичной электроэнергии, что позволяет легко интегрировать в их состав другие возобновляемые источники энергии, такие как солнечные панели или ветрогенераторы [16, 17].

Таким образом, по результатам литературного обзора следует, что на сегодняшний день актуальными направлениями исследований в области микрогидроэнергетики являются: совершенствование автобалластных систем стабилизации напряжения микроГЭС и изучение возможностей перспективных микроГЭС инверторного типа.

Целью данной статьи является определение диапазонов изменения выходных электрических параметров нерегулируемого гидрогенератора, работающего в составе инверторной микроГЭС на сельского бытового потребителя, и формулировка требований к нему, а также к силовым преобразовательным устройствам в статических и динамических режимах работы автономной системы электроснабжения.

Имитационное моделирование инверторной микрогидроэлектростанции

Структурная схема предлагаемой микроГЭС приведена на рис. 1. Турбина (Т) вращает генератор (Г) с возбуждением от постоянных магнитов. Выходное напряжение генератора U_{Γ} и его частота f_{Γ} определяются энергетическим балансом системы «турбина–генератор–нагрузка» и зависят от частоты вращения гидрогенератора, величины и характера тока генератора I_{Γ} . Далее переменное напряжение с нестабильными параметрами выпрямляется выпрямителем (В) и далее инвертируется автономным инвертором (АИ) с одновременной стабилизацией параметров выходного напряжения нагрузки $U_{\text{н}}$.

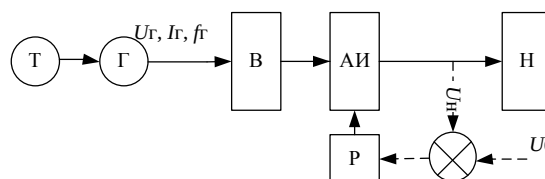


Рис. 1. Структурная схема микроГЭС со стабилизацией выходного напряжения инвертором

Fig. 1. Block diagram of a microelectric power station with output voltage stabilization by an inverter

Стабилизация величины выходного напряжения осуществляется ПИ-регулятором (Р), воздействующим на коэффициент широтно-импульсной модуляции (ШИМ) инвертора в соответствии с заданной уставкой по напряжению U_0 .

Построение рассматриваемого энергоисточника автономной системы электроснабжения требует анализа энергетических потоков в системе с целью формулировки требований к энергетическому оборудованию инверторной микрогидроэлектростанции. Исходными данными для анализа являются механическая характеристика пропеллерной гидротурбины и график бытовых электрических нагрузок сельских домов. Экспериментальная мощностная характеристика нерегулируемой пропеллерной гидротурбины, рабочий поток воды которой стабилизирован напорным трубопроводом, приведена на рис. 2 [18]. На рис. 2 показаны зависимости мощности (Р) и момента (М) турбины от частоты её вращения (Ω) для двух значений открытия направляющего устройства а при неизменном напоре воды, составляющем 9 м.

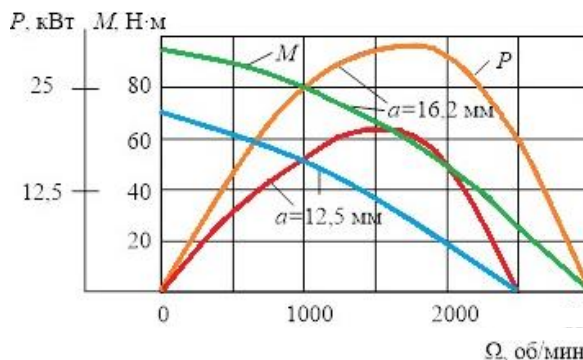


Рис. 2. Мощностная характеристика гидротурбины

Fig. 2. Power characteristics of a hydraulic turbine

Типовые графики электропотребления сельских домов приведены на рис. 3 [19].

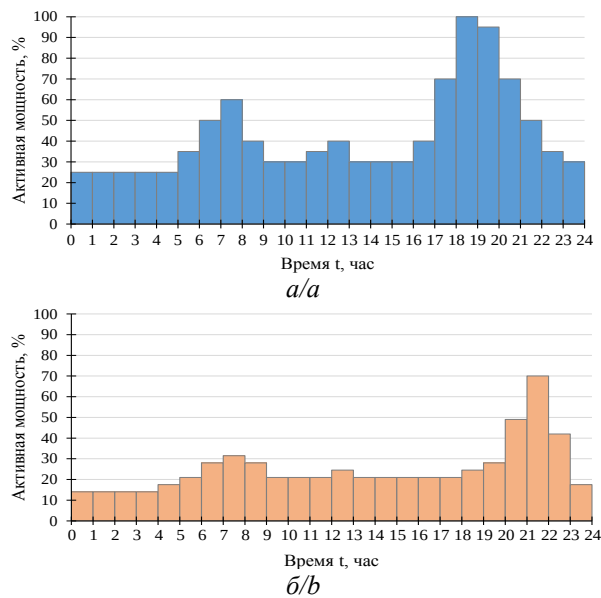


Рис. 3. Типовые графики электропотребления сельского дома для зимнего (а) и летнего периода (б)

Fig. 3. Typical schedules of electricity consumption of a rural house for the winter (a) and summer (b) period

Рабочая точка на характеристике гидротурбины определяется тормозной мощностью электромашиного генератора, соответствующей текущей мощности электропотребления. Учитывая максимальную мощность гидротурбины 30 кВт, полагаем соответствующую пиковую мощность электропотребления.

В соответствии с рис. 3, а, суточные значения мощности электрических нагрузок микроГЭС изменяются в диапазоне от 25–27 % пикового потребления в ночное время и до 100 % во время вечернего максимума нагрузки. Соответственно, частота вращения гидрогенератора с нерегулируемой гидротурбиной варьируется в широком диапазоне, что сопровождается изменением параметров генерируемого напряжения: величины $U_{\text{г}}$ и частоты $f_{\text{г}}$. Изменение частоты влияет на величину индуктивных сопротивлений генератора а, следовательно, и на его внешнюю характеристику.

Таким образом, все выходные параметры магнитоэлектрического синхронного генератора: напряжение, ток, мощность и частота, взаимосвязаны между собой и с мощностной характеристикой гидротурбины и изменяются в течение суток в соответствии с графиками электрических нагрузок. Возможность использования модели синхронного генератора представлена в [20] с помощью программы MathCad.

Диапазоны изменений величины и частоты генерируемого напряжения задают требования к параметрам преобразующих устройств инверторной микроГЭС. Выбор энергетических характеристик генерирующего и преобразующего оборудования рассматриваемой микроГЭС, а также системы стабилизации

напряжения на нагрузке, целесообразно производить путём имитационного моделирования процессов энергопреобразования в системе *MATLAB Simulink*.

Укрупнённая схема имитационной модели в системе *MATLAB Simulink* автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС со стабилизацией выходного напряжения регулированием коэффициента модуляции ШИМ-инвертора приведена на рис. 4.

В модели использованы стандартные моделирующие блоки: синхронный генератор с постоянными магнитами, трёхфазный мостовой выпрямитель, трёхфазный автономный инвертор напряжения (АИН) с ШИМ. На вход системы управления (СУ) с выхода регулятора подается текущее значение коэффициента модуляции, определяющего величину основной гармоники выходного напряжения инвертора. СУ формируют эталонные синусоидальные напряжения фаз с предмодуляцией третьей гармоникой. В результате три сформированных сигнала 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 принималось равной 30 кВт, полная – 37,5 кВт. Активная мощность нагрузки каждой фазы в процессе моделирования изменялась от 100 Вт до 13 кВт, реактивная оставалась неизменной и равной 500 Вар.

Характеристика нерегулируемой пропеллерной гидротурбины с напорным трубопроводом представлена аппроксимирующим полиномом в относительных единицах (о.е.) относительно максимума мощности:

$$P(\omega) = -1,697 \cdot \omega^3 - 1,3581 \cdot \omega^2 + 3,0451 \cdot \omega + 0,0062.$$

В качестве регулятора коэффициента модуляции ШИМ-инвертора использован ПИ-регулятор с передаточной функцией $W(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p}\right)$. Парамет-

ры ПИ-регулятора рассчитывались из передаточной функции объекта (отношение напряжения на выходе выпрямителя к входному). В результате моделирования установлено, что передаточная функция может быть представлена инерционным звеном первого порядка

$$W(p) = \frac{k}{1 + T_1 p} = \frac{0,85}{1 + 0,115 p}.$$

Далее методом полной компенсации для заданной передаточной функции, являющейся критерием качества,

$$W_{\text{зд}}(p) = \frac{1}{1 + T_{\text{зд}} p}$$

$$\text{находились значения параметров регулятора } k_p = \frac{T_1}{2 \cdot k \cdot T_{\text{зд}}}, \quad T_{\text{и}} = T_1.$$

Так как передаточная функция объекта находилась для одного режима нагрузки, то полученные коэффициенты корректировались для обеспечения стабилизации во всех режимах работы станции.

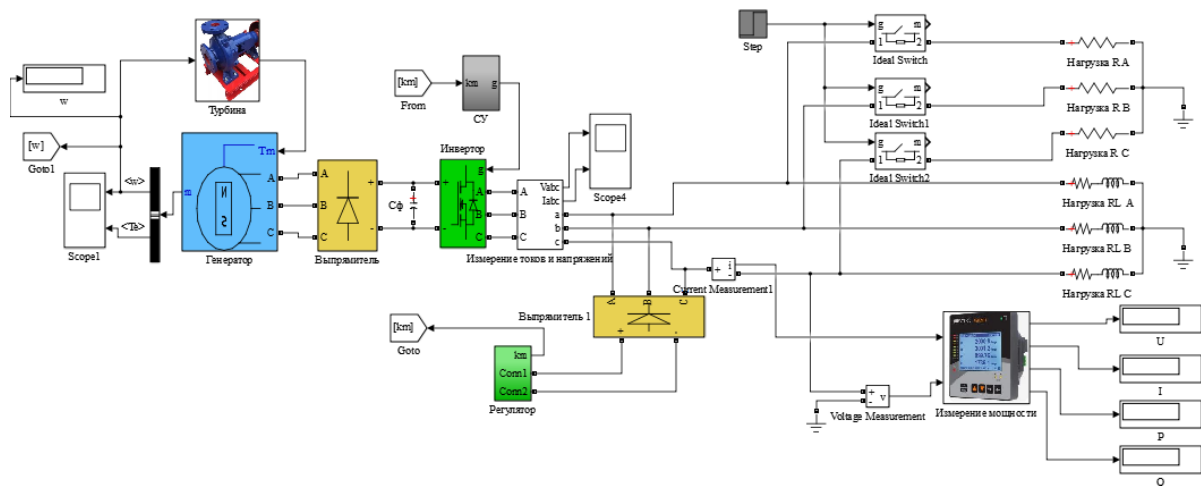


Рис. 4. Имитационная модель системы электроснабжения с инверторной микроГЭС

Fig. 4. Simulation model of an electric power supply system with an inverter microelectric power station

Результаты моделирования

Результаты моделирования в виде графических зависимостей частоты вращения гидрогенератора и его напряжения от нагрузки микроГЭС показаны на рис. 5, 6. Как видно из графиков, частота вращения и напряжение на генераторе сильно зависят от изменения мощности потребителей. Так, действующее значение напряжения меняется от $1,4U_{\text{ном}}$ до $0,65U_{\text{ном}}$ при увеличении мощности нагрузки от 0 до 1,3 номинальной, где за номинальное значение принято напряжение генератора 1 при его номинальной нагрузке.

Угловая скорость гидрогенератора изменяется от $0,98\omega_{\text{ном}}$ до $0,52\omega_{\text{ном}}$ для того же диапазона изменения нагрузки и при базовой частоте вращения $\omega_{\text{ном}}$, соответствующей оборотам холостого хода. Обе характеристики изменяются практически одинаково, что объясняется пропорциональной связью между ЭДС генератора и частотой его вращения при условии неизменности магнитного потока.

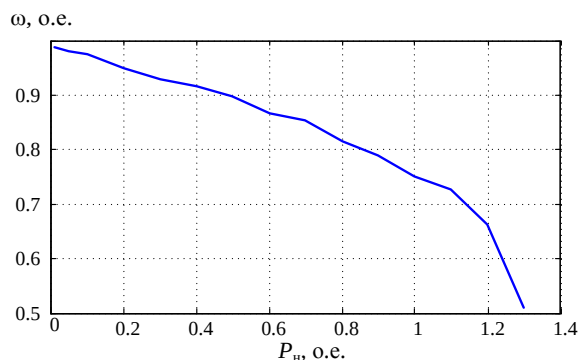


Рис. 5. Зависимость угловой скорости вращения гидрогенератора от активной мощности нагрузки

Fig. 5. Dependence of the angular rotation speed of the hydrogenerator on the active load power

Коэффициент несинусоидальности выходного напряжения инвертора без фильтрации не превышает 40 %. Применение фильтров позволит улучшить

форму кривой напряжения на нагрузке до необходимого уровня.

U, о.е.

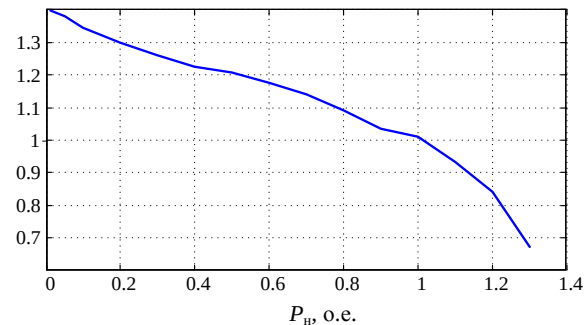


Рис. 6. Зависимость действующего значения напряжения гидрогенератора от активной мощности нагрузки

Fig. 6. Dependence of the effective value of the hydrogenerator voltage on the active power of the load

Коэффициент полезного действия преобразования электроэнергии гидрогенератора в энергию, потребляемую нагрузкой, находится в пределах 80–85 %. В плане энергопреобразования первичной энергии рабочего потока воды в электроэнергию нагрузки следует отметить экономию воды, которая расходуется только на покрытие нагрузок в отличие от систем балластного регулирования микроГЭС

На рис. 7 представлен результат работы регулятора, стабилизирующего действующее значение напряжения в переходном режиме при изменении активной мощности нагрузки в момент времени 0,05 с от $0,4P_{\text{ном}}$ до $0,9P_{\text{ном}}$ и в последующем установившемся режиме. Как показали результаты моделирования регулированием коэффициента модуляции инвертора можно обеспечить стабилизацию напряжения в пределах $\pm 5\%$ во всем диапазоне изменения мощности электрических нагрузок микроГЭС.

Характер переходного режима аperiodический, длительность переходного процесса составляет 0,2 с.

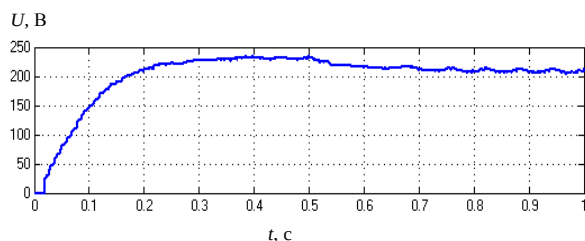


Рис. 7. Переходный процесс изменения действующего значения напряжения при набросе нагрузки инверторной микроГЭС

Fig. 7. Transient process of changing the current voltage value when loading an inverter microelectric power station

Выводы

1. Предложенные компьютерные модели позволяют оценить зависимости действующего значения генерируемого напряжения и угловой скорости вращения нерегулируемого гидрогенератора от активной мощности нагрузки с учётом энергетического взаимодействия гидротурбины пропеллерного типа, синхронного генератора с постоянными магнитами и электрической нагрузки автономной системы электроснабжения, представленной типовым графиком электропотребления сельского дома.
2. Путём имитационного моделирования установлен диапазон изменения напряжения генератора микроГЭС: при снижении нагрузки от номинального значения до холостого хода напряжение увеличивается на 40 %. Следовательно, рабочий диапазон входного напряжения инвертора, с учётом коэф-

фициента преобразования выпрямителя по напряжению, должен соответствовать полученному значению.

3. Угловая скорость вращения гидрогенератора при снижении его нагрузки от номинальной, принимаемой за 1, до холостого хода увеличивается на 25 % (рис. 5), что определяет требования к его механической прочности.
4. Разработанная имитационная модель инверторной микроГЭС позволила установить возможность обеспечения устойчивого режима её работы и стабилизации выходного напряжения в установившихся и переходных режимах применением инверторного типа регулирования выходного напряжения. Для регулирования коэффициента модуляции ШИМ-инвертора целесообразно использование ПИ-регулятора, обеспечивающего стабилизацию напряжения в пределах $\pm 5\%$ во всем диапазоне изменения мощности электрических нагрузок.
5. Проведённые исследования показали перспективность предложенной структуры инверторной микрогидроэлектростанции, обладающей простотой и известными преимуществами инверторных энергоисточников в части обеспечения потребителя качественной электроэнергией.
6. Предложенная имитационная модель инверторной микроГЭС позволяет проводить широкий спектр исследований режимов её работы в автономной системе электроснабжения с целью оптимизации технико-экономических характеристик комплекса электроснабжения с использованием энергии потоков воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Ачитаев А.А., Жидков А.А., Наумкин Н.С. Исследование влияния замещения возобновляемых источников энергии в составе схемы питания собственных нужд малых и микро-ГЭС // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – Т. 14 (6). – С. 656–666. DOI: 10.17516/1999-494X-034.
3. Participation of load aggregator in grid frequency stabilization with consideration of renewable energy resources integration / E. Mudaheranwa, H. Berkem Sonder, Ye-O. Udoakah, L. Cipcigan, C.E. Ugalde-Loo // Energy Reports. – 2023. – V. 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. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Регулятор балластной нагрузки автономной микроГЭС // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 307. – № 3. – С. 121–126.
6. 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. – с. 100–135.
7. Optimal design capacitive energy storage (ces) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm / M. Ali, M. Ruswandi Djalal, M. Fakhrurozi, Kadarayono, Budiman, D. Ajiatmo // Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS). – Batu, Indonesia, 2018. – P. 21–26.
8. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанция с автобалластной нагрузкой, регулируемой по частоте выходного напряжения // Электромеханика. – 1990. – № 6. – С. 111–119.
9. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Фазорегулируемые автобалластные системы стабилизации выходных параметров микрогэс // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 113–118.
10. Шубин С.С. и др. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний // Известия Томского политехнического университета. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214.
11. Борисов С.В., Колтунова Е.А., Кладиев С.Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 114–121.
12. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 102–111.
13. 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.
14. Коровкин Н.В., Гулай С.Л., Верховцев Д.А. Оптимизация параметров гидрогенератора // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. – № 4. – С. 42–50.
15. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2013. – V. 28. – № 2. – P. 452–459.

16. Modified particle swarm optimisation technique for optimal design of small renewable energy system supplying a specific load at Mansoura University / A. Hassan, M. Saadawi, M. Kandil, M. Saeed // IET Renewable Power Generation. – 2014. – V. 9. – P. 474–483.
17. Розаев И.А., Колотков С.Е. Система управления электрической подстанцией // Информационные технологии в науке, управлении, в социальной сфере и медицине. Сборник научных трудов. – 2014. – Т. 2. – С. 97–99.
18. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от Микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
19. Алюнов А.Н. Интерактивные расчеты систем электроснабжения // Онлайн Электрик URL: <https://online-electric.ru/dbase/graph24.php> (дата обращения 15.04.2023).
20. Математические модели синхронных генераторов при различных пространственных расстояниях точки возмущения / Ю.Н. Исаев, В.А. Колчанова, С.С. Тарасенко, О.В. Тихомирова // Международная конференция по машиностроению, системам автоматизации и управления (MEACS). – Томск, Россия, 2015. – С. 1–5.

Поступила: 21.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 08.06.2023 г.

Информация об авторах

Лукутин Б.В., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики.

Шандарова Е.Б., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики.

Попов М.М., старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики.

UDC 621.311.212

OPERATING MODES OF MICRO-HYDROELECTRIC POWER PLANT WITH OUTPUT VOLTAGE STABILIZATION USING INVERTER CONTROL

Boris V. Lukutin¹,
lukutin48@mail.ru

Elena B. Shandarova¹,
shandarovaelena@mail.ru

Mikhail M. Popov¹,
mix_mix13@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. The use of Russia's hydroelectric potential for electricity generation is one of the cleanest and environmentally friendly methods as it does not result in the emission of harmful substances and carbon dioxide into the atmosphere. Moreover, it is a reliable and efficient source of energy as water is a constant source of energy. Hydro turbines are used to convert the energy of water flow into electrical energy, which effectively ensures more reliable and stable production capacity for hydroelectric installations. However, micro-hydroelectric power plants have some drawbacks related to difficulties in ensuring the high quality of produced electricity of autonomous power supply systems. This is due to the fact that the load on the autonomous power supply system can vary not only in magnitude but also in nature, which makes it difficult to maintain a stable level of electricity production.

The main goal of the research is to determine the ranges of variation of the output electrical parameters of a non-regulated hydrogenerator operating as part of an inverter-based micro-hydroelectric power station for rural domestic consumers. Additionally, the task is to formulate requirements for the hydrogenerator and power conversion devices in static and dynamic operating modes of the autonomous power supply system.

Object: inverter-based micro-hydroelectric power station.

Methods: simulation modeling, and programming in Matlab Simulink.

Results. A simulation model of an electric power supply system with an inverter microelectric power station was developed. The structure of microelectric power station is proposed, as well as the ranges of voltage changes of the microelectric power station generator are obtained.

Key words:

microelectric power station, efficiency, control algorithm, stabilization, inverter, load graph, power storage.

REFERENCES

- Kharchenko 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 Rus.
- Achitaev A.A., Zhidkov A.A., Naumkin N.S. Investigation of the impact of substitution of renewable energy sources as part of the supply scheme for auxiliary needs of small and micro hydropower plants. *Journal of the Siberian Federal University «Engineering and Technology»*, 2021, pp. 656–666. In Rus.
- Mudaheranwa E., Berkem Sonder H., Udoakah Ye-O., 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.
- 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.
- Lukutin B.V., Obukhov S.G. Ballast load regulator for micro hydropower plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 307, no. 3, pp. 121–126. In Rus.
- 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, no. 4, pp. 100–135.
- Ali M., Ruswandi Djalal M., Fakhrurozi M., Kadaryono, Budiman, Ajiatmo D. 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.
- Lukutin B.V., Obukhov S.G. Mikrogidroelektrostantsiya s avtoballastnoy nagruzkoy, reguliruemoj po chastote vykhodnogo napryazheniya [Microhydro power plant with auto-ballast load regulated by the output voltage frequency]. *Elektromekhanika*, 1990, no. 6, pp. 111–119.
- 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 Rus.
- Shubin S.S. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214.
- Borisov S.V. Koltunova E.A., Kladiev S.N. Sovershenstvovanie struktury imitatsionnoy modeli tyagovogo asinkhronnogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza [Improvement of the structure of the simulation model of the traction asynchronous electric drive of the mine electric locomotive]. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2021, vol. 247, pp. 114–124.
- Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I. The use of a water-submersible hydrogenator of combined excitation as an alternative source of energy for small and middle rivers. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 102–111. In Rus.
- 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 Rus.
- Korovkin N.V., Gulay S.L., Verhovcev D.A. Optimization of hydro generator parameters. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy series*, 2019, no. 4, pp. 42–50. In Rus.

15. 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.
16. Hassan A., Saadawi M., Kandil M., Saeed M. Modified particle swarm optimisation technique for optimal design of small renewable energy system supplying a specific load at Mansoura University. *IET Renewable Power Generation*, 2020, vol. 9, pp. 474–483.
17. Rozaev I.A., Kolotkov S.E. Sistema upravleniya elektricheskoy podstantsiy [Electrical substation control system]. *Information technologies in science, management, social sphere and medicine. Collection of scientific papers*, 2014, vol. 2, pp. 97–99.
18. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. *Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsy* [Autonomous power supply from Microhydropower plants]. Tomsk, STT, 2001. 120 p.
19. Alyunov A.N. *Interaktivnye raschety sistem elektrosnabzheniya* [Interactive calculations of power supply systems]. Available at: <https://online-electric.ru/dbase/graph24.php> (accessed 15 April 2023).
20. Isaev Yu.N., Kolchanova V.A., Tarasenko S.S., Tikhomirova O.V. Matematicheskie modeli sinhronnykh generatorov pri razlichnykh prostranstvennykh rasstoyaniyakh točki vozmushcheniya [Mathematical models of synchronous generators at different spatial distances of the disturbance points]. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, Russia, 2015. pp. 1–5.

Received: 21 April 2023.

Reviewed: 8 June 2023.

Information about the authors

Boris V. Lukutin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena B. Shandarova, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mikhail M. Popov, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 539.26:549.514.51+548.75:549.514

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

Коровкин Михаил Владимирович^{1,2},
mvk@tpu.ru

Ананьева Людмила Геннадьевна¹,
lga@tpu.ru

Жерлицын Андрей Алексеевич³,
andzh@oit.hcei.tsc.ru

Кондратьев Сергей Сергеевич³,
Kondratiev@oit.hcei.tsc.ru

Савинова Олеся Вячеславовна¹,
logvinenkoov@tpu.ru

Курская Вероника Сергеевна⁴,
kurskayav111@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

³ Институт сильноточной электроники СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

⁴ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Актуальность исследования определяется необходимостью оценки степени преобразования кварцевого сырья в его естественном залегании, а также изменением свойств сырья и изделий на его основе при различных условиях эксплуатации. Нами использовались методы рентгеновской дифракции и инфракрасной спектроскопии для оценки степени кристалличности различных кристаллических кварцевых материалов и изделий из диоксида кремния, которые показали удовлетворительную схожесть результатов и могут быть рекомендованы для использования в мировой практике.

Объекты: искусственно выращенный кварц, в том числе образцы синтетического кварца с примесью алюминия, зонально окрашенный монокристалл кварца с примесью двух- и трёхвалентного железа; природные кристаллы аметиста, дымчатого кварца, оптический кварц; образцы плавленого кварца, изделия из технического и оптического кварцевого и силикатного стекла; а также мелкозернистые образцы кварцитов, в том числе их микро- и наноразмерные фракции.

Методы: оптическая и электронная сканирующая микроскопия, рентгеноспектральный анализ, инфракрасная спектроскопия, рентгеновская дифракция.

Результаты. Показано, что степень кристалличности кварцевого сырья и изделий на его основе определяется наличием структурного упорядочения в ближней зоне, характеризующей кристаллическое состояние, соответствующее фазе α -кварца, что уверенно регистрируется методами XRD и FTIR. Локальная разупорядоченность высокочистого кварца или кварцитов, имеющих в своей структуре различные примеси или дефекты, возникающие под действием внешних воздействий или эксплуатации, вызывает ухудшение их свойств и, как следствие, уменьшение степени кристалличности.

Ключевые слова:

кварц, кварциты, диоксид кремния, кварцевое стекло, индекс кристалличности, рентгеновская дифракция, инфракрасная спектроскопия.

Введение

Хорошо известно, что кристаллические и аморфные вещества отличаются своими оптическими, механическими, электрическими и прочими свойствами. Появление кристаллической фазы изменяет плотность, твёрдость, адгезию, прочность, проницаемость и другие свойства материалов и покрытий на их основе. Постоянно возрастающее применение высокочистого кварцевого сырья (диоксида кремния) в высоких технологиях обусловлено получением на его основе новых перспективных материалов: оптического стекловолокна, стеклокерамики, стекла специального назначения [1–5], а также микро- и наноразмерных материалов [6–8], требующих контроля степени кристалличности, влияющей как на активацию, так и на деградацию их свойств. Кварц является химически инертным соединением благодаря высокому совершенству структуры.

Считается, что степень кристалличности, или коэффициент (индекс) кристалличности, – это величина,

показывающая, какая часть вещества (по массе или объёму) является кристаллической. Для определения степени кристалличности используются различные методы, но наиболее распространённым является метод рассеяния рентгеновских лучей: по параметрам дифрактограмм оценивается отношение суммарного рассеяния кристаллитов к общему рассеянию от кристаллических и аморфных областей. В работе [6] понятие «кристалличность» связывается со степенью структурного совершенства кристаллической решётки кварца, а в работах [9–11] – с размером кристаллитов.

Для оценки степени преобразования и кристаллического совершенства кварца в работе [12] было предложено использовать метод рентгеновской дифракции, а «индекс кристалличности» K_{сi} (или QCI) рассчитывать по параметрам мультиплетного пика в области 67...69° на рентгеновской дифрактограмме, однако какие-либо физически обоснованные аргументы в пользу его использования для оценки кристалличности отсутствуют.

В работе [13] предложено использовать метод инфракрасной спектроскопии (ИК) для оценки степени кристалличности халцедонов (скрытокристаллической тонковолокнистой разновидности кварца). Низкотемпературная кристаллическая фаза α -кварца определяется наличием двойного пика ИК-поглощения в диапазоне $800\ldots 778\text{ см}^{-1}$ [14]. Характерный для α -кварца двойной пик ИК-поглощения при 778 и 797 см^{-1} обусловлен фундаментальными колебаниями разного типа симметрии Si-O-Si связей в кремнекислородном тетраэдре [15, 16]. С изменением степени кристалличности вид данного дублета изменяется, и, по мнению И.И. Плюсниной [13], именно его можно использовать для получения относительного критерия оценки кристалличности кварца.

В данной работе методами рентгеновской дифракции и инфракрасной спектроскопии нами оценена степень кристалличности природных и синтетических кристаллов кварца, а также проведён сравнительный анализ кристалличности некоторых материалов и изделий на основе диоксида кремния.

Методика исследования

Исследовались образцы искусственно выращенного кварца, полученного в различных условиях: образцы синтетического кварца с примесью алюминия; зонально окрашенных монокристаллов кварца с примесью двух- и трёхвалентного железа [14], выращенные в ВНИИ синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС, г. Александров), представленные В.Г. Балакиревым; кристаллы природного аметиста, дымчатого кварца (Полярный Урал, Россия) и бразильского оптического кварца; образцы плавленого кварца, изделия из технического и оптического кварцевого и силикатного стекла; а также мелкозернистые образцы кварцитов месторождений «Сопка-248» и «Белокаменское» (Антоновская группа месторождений, Кемеровская область, Россия) [17, 18], суперкварцитов (месторождение Бурал-Сарьдаг, Бурятия, Россия) [19–21], в том числе их микро- и наноразмерные фракции [7, 8].

Рентгенограммы снимались с шагом около $0,02$ в интервале $5\ldots 70$ град. 2θ с вращением 30 об/мин и выдержкой $0,1$ сек в точке под рентгеновским $\text{CuK}\alpha$ -излучением на дифрактометре X'Pert PRO. Для исследований приготовлены тонкорастёртые (менее 2 мкм) образцы, затем спрессованные в «таблетку». Результаты регистрации спектров рентгеновской дифракции (X-ray diffraction – XRD) обрабатывались специальной программой с выводом данных в цифровой форме [22].

Расчёт индекса кристалличности K_{ci} проводился по методу Мурата и Нормана [12] с использованием экспериментальных значений величины пика (212), соответствующего $2\theta=67,74^\circ$ мультиплетного (квинтиплетного) пика в области $67\ldots 69^\circ$ на рентгеновской дифрактограмме. На всех полученных нами рентгенограммах расчётный максимум в квинтиплетном пике соответствует значению $2\theta=67,7797 \pm 0,0003$, в отличие от предложенного в [12] значения $2\theta=67,74^\circ$ (рис. 1).

Для расчёта индекса кристалличности по формуле $K_{ci}=10Fa/b$ нами использовались экспериментальные значения интенсивности пика при $2\theta=67,77^\circ$ (рис. 1), где a/b – отношение интенсивности пика при $2\theta=67,77^\circ$ к интенсивности фона; $F=1,67$ – коэффициент масштабирования, используемый в [12] для обеспечения оценки индекса кристалличности $K_{ci}=10$ для эталонных, наиболее совершенных кристаллов оптического кварца. В наших расчётах коэффициент масштабирования принимался также равным значению $1,67$.

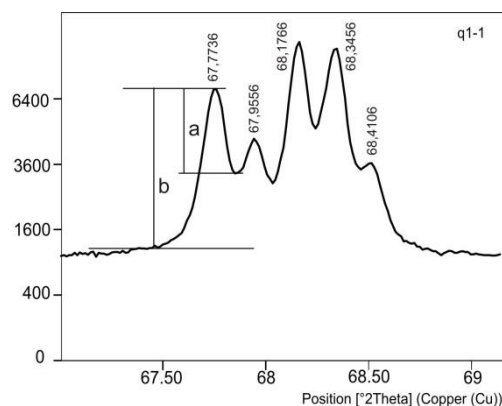


Рис. 1. Пояснение к расчёту индекса кристалличности по методу Мурата и Нормана [12] по параметрам мультиплетного пика в области $67\ldots 69^\circ$ на рентгеновской дифрактограмме (XRD)

Fig. 1. Explanation of the calculation of the crystallinity index by the method of Murat and Norman [12] according to the parameters of the multiplet peak in the region of $67\ldots 69^\circ$ on the X-ray diffraction pattern (XRD)

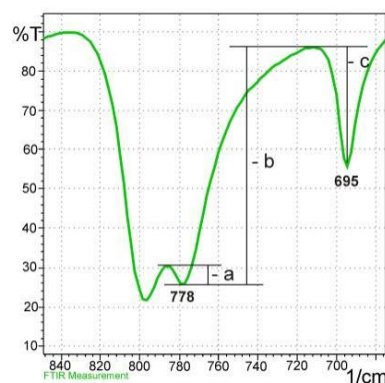


Fig. 2. Explanation of the crystallinity index calculating method based on changes in the absorption peaks at 778 and 695 см^{-1} in the infrared absorption spectrum (FTIR)

Рис. 2. Пояснение к методике расчёта индекса кристалличности по изменению величины пиков поглощения 778 см^{-1} в спектрах инфракрасного поглощения (Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR)

Fig. 2. Explanation of the method for calculating the crystallinity index by changing the magnitude of the absorption peaks at 778 см^{-1} in the infrared absorption spectra (FTIR)

Спектры ИК-поглощения регистрировались на спектрофотометре IR Prestige-21 фирмы «Shimadzu» с преобразованием Фурье (FTIR-8400S) в интервале $300\ldots 4000\text{ см}^{-1}$ с разрешением $0,001\text{ см}^{-1}$ (FT-IR), с помощью программного обеспечения IRsolution. Ис-

следуемый образец (массой 0,5 мг) растирали в агатовой ступке до фракции менее 2 мкм и смешивали с порошком КВг марок ОЧ или ЧДА, и прессовали в прозрачные тонкие диски. Положение двойного пика при 778 и 797 см⁻¹ по спектру, средняя интенсивность, отсутствие суперпозиции других полос и большая чувствительность к структурным изменениям явились причиной его использования в [13] для расчёта индекса кристалличности по формуле:

$$K_{ci}=10fa/b,$$

где a/b – отношение величины слабого пика 778 см⁻¹ к его коротковолновому плечу; f – коэффициент пропорциональности для эталонного кварца, принимаемый в работе [13] равным 2,8; в данной работе использовался выравнивающий коэффициент пропорциональности $f=6$ (рис. 2).

Рассчитанные значения индекса кристалличности методами XRD и FTIR представлены в таблице.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Кристалличность материалов, вытекающая из понятия идеального кристалла, подразумевает идеальный порядок в трех измерениях на атомном уровне. Отклонения от идеального кристалла могут возникать главным образом из-за различных физических или структурных дефектов [11]. Степень совершенства кристаллической решётки природных и синтетических кристаллов кварца, конечно, различается, и, как правило, природные кристаллы оптического кварца и горного хрусталя отличаются высокой степенью совершенства кристаллической структуры и высокими значениями индекса кристалличности (таблица, № 5).

Кварцевые материалы характеризуются отчётливым квинтиплетным пиком 2 θ в области 67...69° на рентгеновской дифрактограмме; дублетом при 778 и 797 см⁻¹ и наличием пика при 695 см⁻¹ в спектрах инфракрасного поглощения (рис. 3, кривая 1), что является характерным признаком кристаллической фазы α -кварца [14–16]. Следует отметить, что фундаментальные колебания при 778 см⁻¹ по отношению к 797 и 695 см⁻¹ относятся к колебаниям разного типа симметрии [15]. Индексы кристалличности кварцевых материалов, рассчитанные по приведённым выше методикам, отмечаются достаточно высокими значениями (таблица).

Спектры инфракрасного поглощения в характеристической области сходны и для кристаллов мориона (рис. 3, кривая 5; таблица, № 6), в которых дымчатая окраска обусловлена образованием дырочных центров в результате замещения кремния Si⁴⁺ в кремнекислородных тетраэдрах алюминием Al³⁺; и для кристаллов аметиста (рис. 3 кривая 4; таблица, № 7), фиолетовая окраска которых обусловлена центрами окраски, образованными ионами железа Fe²⁺, изоморфно замещающими кремний Si⁴⁺, и в синтетических кристаллах кварца, буровато-жёлтая и зелёная окраска которого обусловлена вариациями структурной и неструктурной примеси ионов железа Fe²⁺ и Fe³⁺ (рис. 3, кривые 2, 3) [14]. Различие структурной упорядоченности природных и искусственно выра-

щенных кристаллов кварца зависит от содержания точечных дефектов [6, 11, 23] и отражается в изменении Kci (QCI) индекса кристалличности (таблица, № 6–11), которое может быть оценено по его значениям, полученным методами XRD и FTIR. Вполне возможно, что изменение Kci отражает общую закономерность изменения дефектной структуры кристаллического кварца и материалов на его основе, однако для получения некоторых «абсолютных» значений Kci нужны дополнительные, более детальные исследования, учитывающие, в том числе, и пробоподготовку исследуемых образцов [6]. В работе [24] показана корреляция рассчитанных на основе рентгенографических измерений индексов кристалличности и параметров совершенства кристаллического строения природных образцов кварца различного генезиса.

Таблица. Значения индекса кристалличности различных материалов на основе кремнезёма, полученные методами XRD и FTIR

Table. Values of the crystallinity index of various silica-based materials, calculated by XRD and FTIR methods

№ No.	Образец/Sample	Индекс кристалличности, Kci Crystallinity index, Kci	
		XRD	FTIR
1	Кварцит (месторождение Сопка-248) Quartzite (Sopka-248 deposit)	2,88...6,78	1,90...5,60
2	Кварцит (месторождение Белокаменское) Quartzite (Belokamenskoe deposit)	4,65...6,71	2,41...2,67
3	Суперкварцит (месторождение Бурал-Сардаг, Бурятия) Superquartzite (Bural-Sardag deposit, Buryatia)	6,66...7,34	6,0...6,39
4	Суперкварцит, измельчённый электроимпульсным дроблением Superquartzite crushed by electric pulse method		4,99...5,21
5	Бразильский оптический кварц – горный хрусталь Brazilian optical quartz	9,51...9,95	8,67...9,60
6	Природный дымчатый кварц (морион) Natural smoky quartz (morion)	7,33...7,48	7,68...8,17
7	Природный кристалл аметиста Natural amethyst	7,22...7,40	8,18...8,57
8	Синтетический кварц (ВНИИСиМС) Synthetic quartz	7,32...7,84	
9	• зелёный/green		3,75... 5,11
10	• жёлтый (цитрин)/yellow (citrine)		3,13...4,00
11	• прозрачный пьезокварц transparent piezoquartz		5,88...6,10
12	Технические кварцевое «стекло» (пластина) Technical quartz glass (plate)	8,48...8,57	2,54...3,16
13	Техническое силикатное стекло Technical silicate glass	0	0
14	Оптическое «кварцевое» стекло (пластина) Optical quartz glass (plate)	0	0
15	Плавленный кварц/Fused quartz	0	0
16	Плавленный кварцит/Fused quartzite	0	0
17	Наноразмерный диоксид кремния Nanoscale silicon dioxide	0	0

На дифрактограммах образцов плавленого кварца не наблюдается мультиплетный пик в области 2 θ

67...69° и отсутствуют пики ИК поглощения при 778 и 695 см⁻¹, что свидетельствует об отсутствии в нём кристаллической фазы. Образцы силикатного технического стекла и плавленого кварцита также не содержат кристаллической фазы, но спектр инфракрасного поглощения слегка изменяется за счёт изоморфного замещения кремния на алюминий в тетраэдрической позиции. С возрастанием степени замещения кремния алюминием дублет между 900 и 1100 см⁻¹ преобразуется в триплет таким образом, что средний пик триплета становится главным (рис. 4, спектры 1, 2) [14–16]. Образцы наноразмерного диоксида кремния, полученного методом магнетронного распыления через стадию высокотемпературного плавления [7], представлены сложным дублетом поглощения в области 1200...900 см⁻¹, характерным для чистого тетрасиликатного иона (рис. 4, спектр 6).

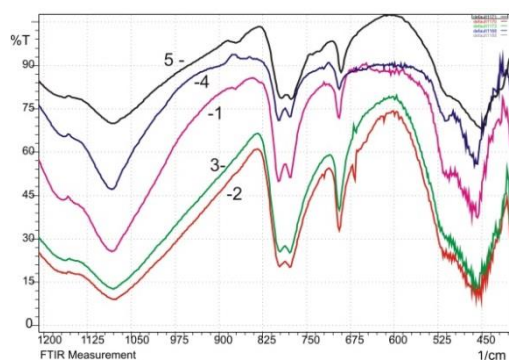


Рис. 3. Фрагменты спектров ИК-поглощения кристаллов кварца (таблица): 1 – синтетический кварц (№ 8); 2 – цитрин (№ 11); 3 – синтетический кварц зелёного цвета (№ 10); 4 – аметист (№ 7); 5 – морион (№ 6)

Fig. 3. Fragments of the IR absorption spectra of quartz crystals (Table): 1 – synthetic quartz (no. 8); 2 – citrine (no. 11); 3 – green synthetic quartz (no. 10); 4 – amethyst (no. 7); 5 – morion (no. 6)

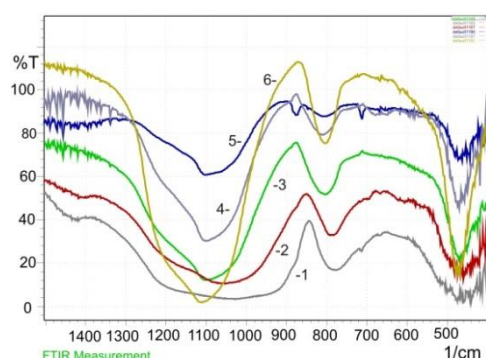


Рис. 4. Фрагменты спектров ИК-поглощения: 1 – техническое силикатное стекло; 2 – плавленый кварцит; 3 – оптическая «кварцевая» трубка; 4 – оптическое «кварцевое» стекло; 5 – кварцевая пластина; 6 – наноразмерный диоксид кремния, полученный методом магнетронного распыления

Fig. 4. Fragments of IR absorption spectra of materials: 1 – technical silicate glass; 2 – fused quartzite; 3 – optical «quartz» tube; 4 – optical «quartz» glass; 5 – quartz plate; 6 – nanosized silicon dioxide obtained by magnetron sputtering

Особый вид изделий из диоксида кремния представляют стёкла и ситаллы, которые могут содержать кристаллическую фазу. Такие изделия используются для пропускания ультрафиолетового излучения в различных оптических приборах в качестве оптических и технических трубок, линз, световодов, в том числе оптоволоконных. ИК-спектры и дифрактограммы отдельных образцов стекла идентичны таковым для плавленого диоксида кремния (рис. 4, спектры 3–5).

Однако для некоторых изделий из технического кварцевого, так называемого «стекла» (таблица, № 12), наблюдается пик при $2\theta=67,77^\circ$ на рентгенограммах XRD и характерный для α -кварца двойной пик ИК-поглощения при 778 и 797 см⁻¹, появление которых указывает на наличие кристаллической фазы. Такие изделия (например, ситаллы), относящиеся к материалам с заданными свойствами, заранее содержат микрокристаллы кварца в результате их приготовления. Для отдельных образцов (оптические линзы, призмы, пластины) значения индекса кристалличности таких изделий изменяются в широких пределах и могут достигать довольно высоких значений, характерных для структурно упорядоченных кристаллов кварца с очень высокой степенью совершенства кристаллической решётки. Стекло характеризуется отсутствием в его структуре дальнего порядка, но, возможно, что в стеклообразных материалах может присутствовать кристаллическая фаза кварца в виде микрокристаллитов, находящихся в аморфной матрице кремнезёма, образование которых возможно как в результате технологического процесса приготовления (стеклокерамики, ситаллов), так и в результате старения и деградации в процессе их эксплуатации. Поэтому в спектрах рентгеновской дифракции и инфракрасного поглощения отражается наличие кристаллической фазы α -кварца.

Несмотря на то, что установить однозначную связь Кс_и с размером кристаллитов пока не удалось [9, 10], становится ясным, что их обнаружение методами FTIR и XRD кристаллической фазы кварца в кремнезёме становится возможным при появлении микро- (или даже нано-) кристаллитов. Так, минимальный размер кварцевых зёрен, получаемый механическим или электроимпульсным дроблением кварцитов [8, 25], составляет десятки нанометров, однако они сохраняют свою кристаллическую структуру (таблица, № 4; рис. 6). Наноразмерные частицы кремнезёма, полученные путём магнетронного распыления [7], представляют собой аморфную структуру диоксида кремния без образования кристаллической фазы даже в крупных агломератах (таблица, № 17; рис. 5).

В кварцитах осадочного происхождения [19, 26] в результате постепенного уплотнения кремнистой биогенной толщи начинает появляться кристаллическая фаза α -кварца (таблица, № 1, 2), уверенно идентифицируемая методами XRD и FTIR [27–29], хотя размеры кварцевых зёрен составляют всего лишь десятки нанометров (рис. 6). В условиях длительного динамического стресса образуются кварциты с более крупными зёрнами [30, 31], которые характеризуются

повышенными значениями индекса кристалличности (6,66...7,34), свидетельствующими о высокой степени их преобразования (таблица, № 3).



Рис. 5. Агломерат аморфных наночастиц диоксида кремния

Fig. 5. Agglomerate of amorphous silicon dioxide nanoparticles

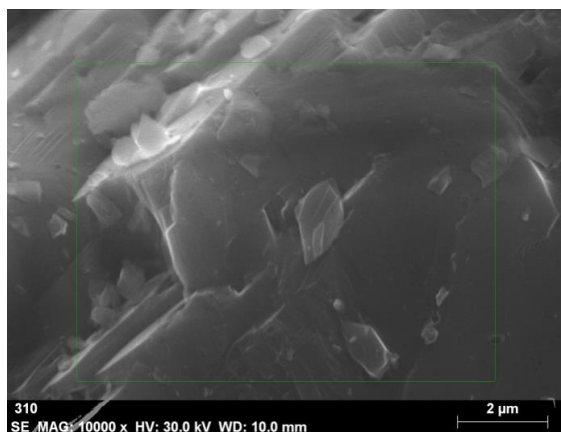


Рис. 6. Структура образца кварцита, полученная с помощью электронного микроскопа

Fig. 6. Quartzite sample structure obtained using an electron microscope

Следует отметить, что изменение кристалличности позволяет не только оценивать степень метаморфизма кварцитов [26] и изменение условий минералообразования опалов, агатов, халцедонов [32–35], но и может служить минералогическим признаком перспективных газонасыщенных коллекторов [36, 37].

С возникновением кристаллической фазы α -кварца на рентгенограммах кварцитов отчетливо появляется мультиплетный пик в области $67...69^\circ$ и усиливаются интенсивности рефлексов, соответствующие появлению основных кристаллографических форм кварца: тригональному трапецоэдру, ромбоэдру, гексагональной призме и дипирамидам. И наоборот, частичное разупорядочение и деформация кристаллической решетки кварца приводит к заметному уширению и изменению интенсивности рефлексов на рентгенограммах [24, 38], видимо, так же как и в колебательных спектрах инфракрасного поглощения. При

этом происходит исчезновение ближнего порядка расположения атомов в кварце и, соответственно, уменьшение, вплоть до полного исчезновения, его кристалличности, и появление аморфной структуры.

Локальная разупорядоченность высококислых суперкварцитов, подверженных измельчению методом электроразрядного дробления также вызывает уменьшение степени кристалличности (таблица, № 4), что обусловлено появлением механических напряжений и дефектов структуры (и даже появлением оплавленных (аморфных) зёрен) в результате воздействия высокоэнергетического разряда [39].

Аморфизация кристаллической структуры кварца также может быть вызвана внешним облучением нейтронами [40] и/или внутренним (авто) облучением радиоактивных элементов, содержащихся в кристалле. В работах [41, 42] убедительно показано, что изменение структуры ближнего порядка кристаллов циркона при воздействии высокоэнергетических α -частиц урана в результате автооблучения вызывает разупорядочение его кристаллической структуры (метамиктизацию).

По нашему мнению, образование кристаллической фазы α -кварца в кварцитах (или стеклах) на начальной стадии кристаллизации может быть связано с появлением элемента структуры (кластера), который характеризуется не только структурной упорядоченностью в ближней зоне и проявлением элементов кристаллографической симметрии, но и соответствующей электронной структурой, описываемой квантово-химическими расчётами и адекватным описанием плотности электронных состояний [43]. Возможно, что таким кластером, образующим минимальный размер кристаллита около 10 нм, может быть соединение $\text{Si}_{47}\text{O}_{52}$.

Рассчитанные нами значения индекса кристалличности кварцитов и природного кварца удовлетворительно согласуются с оценками кристаллических, например, кварцевых песков [44].

Заключение

Несмотря на то, что индекс K_{ci} , определяемый методом XRD, связан с параметрами кристаллической структуры образцов, а индекс (CI), определяемый методом FTIR, связан с колебательными модами молекулярных связей, оба подхода показали аналогичное качественное поведение. Полученные методом XRD и FTIR расчётные значения индекса кристалличности кварцевых материалов являются весьма относительными, но, по нашему мнению, достаточно достоверно отражают степень их структурной упорядоченности. Наиболее высокими значениями индекса кристалличности характеризуются образцы кристаллического (природного и синтетического) кварца. Минимальный разброс значений K_{ci} свидетельствует об устойчивых процессах кристаллизации и формировании совершенных и упорядоченных кристаллов.

Появление области структурного упорядочения, характеризующей кристаллическое состояние, соответствующее фазе α -кварца, наблюдается в ближней зоне, что уверенно регистрируется методами XRD и

FTIR. Можно предположить, что кристалличность диоксида кремния связана с появлением кластера кристалла кварца размером около 10 нм, в котором начинают проявляться основные кристаллографические формы кварца (облик), отражающиеся на рентгеновских дифрактограммах и в спектрах инфракрасного поглощения. Тригональный облик и развитие

граней тригонального трапецоэдра и тригональной дипирамиды изначально рассматривались как благоприятные макроскопические признаки оптического кварца [45].

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00371).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jung L. High purity natural quartz. – New Jersey: Quartz Technology, Inc., 1992. – 550 p.
2. Processing of quartz lumps rejected by silicon industry to obtain a raw material for silica glass / M.F.M. Santos, E. Fujiwara, E.A. Schenkel, J. Enzweiler, C.K. Suzuki // International Journal of Mineral Processing. – 2015. – V. 135. – P. 65–70.
3. Rare-earth doped sol-gel derived oxyfluoride glass-ceramics: Structural and optical characterization / C.E. Secu, M. Secu, C. Ghica, L. Mihut // Optical Materials. – 2011. – V. 33. – № 11. – P. 1770–1774.
4. Chithambo M.L., Niyonzima P. Radioluminescence of annealed synthetic quartz // Radiation Measurements. – November 2017. – V. 106. – P. 35–39.
5. Optical glass based on the East Sayan mountain quartzites / A.I. Nepomnyashchikh, M.G. Volkova, A.P. Zhaboedov, A.S. Paklin, T.Y. Sizova, A.M. Spiridonov, A.M. Fedorov, A.A. Shalaev, R.Y. Shendrik, A.K. Lesnikov, P.A. Lesnikov // Glass Phys. Chem. – 2018. – V. 44. – № 2. – P. 130–136.
6. Marinoni N., Broekmans M.A.T.M. Microstructure of selected aggregate quartz by XRD, and a critical review of the crystallinity index // Cement and Concrete Research. – 2013. – V. 54. – P. 215–225.
7. Kosmachev P.V., Vlasov V.A., Skripnikova N.K. Structure and properties of SiO₂ nanopowder obtained from high-silica raw materials by plasma method // Russian Physics Journal. – 2017. – V. 60 (2). – P. 249–253.
8. Production of high-purity quartz concentrate by electrical pulse fragmentation / L. Ananyeva, S. Ilenok, M. Korovkin, E. Kumpyak, A. Zherlitsyn // Proceedings – 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics. – Tomsk, 17–21 September 2018. – P. 209–213.
9. Hlavay J., Jonas S., Elek S., Inczedy J. Spectroscopic characterization and quantitative estimation of natural weathering of silicates in sediments of Dikrong river, India // Clays and Clay Minerals. – 1978. – V. 26 (2). – P. 139–143.
10. Ramasamy V., Ponnusamy V. Analysis of air suspended particles of Coimbatore-a FTIR study // Indian J. Phys. – 2009. – V. 88 (3). – P. 301–312.
11. Differentiating between long and short range disorder in infra-red spectra: on the meaning of «crystallinity» in silica / Y. Asscher, G.D. Sasso, L. Nodari, I. Angelini, T.B. Tiziana Boffa Ballaran, G. Artioli // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2017. – V. 19. – P. 21783–21790.
12. Murata K.J., Norman II M.B. An index of crystallinity for quartz // American Journal of Science. – 1976. – V. 276. – P. 1120–1130.
13. Плюснина И.И. Исследование структурной неупорядоченности халцедонов методом инфракрасной спектроскопии // ДАН СССР. – 1978. – Т. 240. – № 4. – С. 839–842.
14. Минералогия и кристаллофизика ювелирных разновидностей кремнезёма / В.Г. Балакирев, Е.Я. Киевленко, Л.В. Никольская, М.И. Самойлович, В.Е. Хаджи, Л.И. Цинобер. – М.: Недра, 1979. – 149 с.
15. Силинь А.Р., Трухин А.Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. – Рига: Зинатне, 1985. – 244 с.
16. Scott J.F., Porto S.P.S. Longitudinal and transverse optical lattice vibrations in quartz // Phys. Rev. – 1967. – V. 161. – P. 903–910.
17. Захаров В.Б. Геологическое строение Антоновской группы месторождений кварцитов // Горный журнал. – 2000. – № 7. – С. 7–9.
18. Ананьева Л.Г., Коровкин М.В. Минералого-геохимическое изучение кварцитов Антоновской группы месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 3. – С. 50–55.
19. Quartz concentrates based on compact quartzite / A.I. Nepomnyashchikh, M.G. Volkova, A.P. Zhaboedov, A.M. Fedorov // Inorganic Materials. – 2018. – V. 54. – P. 805–808.
20. Mechanisms of high-purity quartzite formation at the Bural-Sardyk deposit (Russia) / D.T.S. Ayurzhanaeva, A.M. Fedorov, A.M. Mazukabzov, A.I. Nepomnyashchikh, E.A. Ochirova, V.F. Posokhov // Russian Geology and Geophysics. – 2020. – V. 61 (10). – P. 1075–1087.
21. Ресурсы кварцевого сырья Гарганской зоны Восточносибирского кварцитоносного района / А.М. Федоров, В.А. Макрыгина, А.М. Мазукабзов, А.И. Непомнящих, Д.Ц. Аюрганаева, М.Г. Волкова // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 96–106.
22. Description for X-ray diffractometer X'Pert PRO // The Analytical X-ray Company. – 2013. – 20 p.
23. Ильичёва О.М., Наумкина Н.И., Лыгина Т.З. О структурном совершенстве природного и синтетического кремнезёма // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 8. – С. 459–464.
24. Песков А.В., Ольховская В.А. Измерение рентгенографических параметров кварца для безэталонной экспрессной оценки содержания минералов // Вестник Самарского гос. техн. ун-та, сер. технические науки. – 2017. – № 1 (53). – С. 153–164.
25. ИК-спектроскопия нанокристаллов кварца, образовавшихся при интенсивном дроблении гетерогенного материала (гранита) / В.И. Веттерген, Р.И. Мамалимов, Г.А. Соболев, С.М. Киреевкова, Ю.А. Морозов, А.И. Смутьская // Физика твёрдого тела, 2011. – Т. 53. – Вып. 12. – С. 2371–2375.
26. Коровкин М.В., Ананьева Л.Г. Оценка степени метаморфизма кварцитов Антоновской группы месторождений по данным минералогических исследований // Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии. – Томск: Томский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2013. – Вып. 2. – С. 139–145.
27. Коровкин М.В., Ананьева Л.Г., Анциферова А.А. Оценка степени преобразования кварцитов методом инфракрасной спектроскопии // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 47–54.
28. Разва О.С., Ануфриенкова А.М., Коровкин М.В. Оценка степени преобразования кварцитов методом рентгеновской дифракции // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 7-2. – С. 27–28.
29. Assessment of quartz materials crystallinity by x-ray diffraction / M. Korovkin, L. Ananieva, T. Nebere, A. Antsiferova // Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials (RTEP2015). – 2016. – V. 110. – 012095, 4 p.
30. Жабоедов А.П., Непомнящих А.И., Пресняков Р.В. Исследование кварцитов месторождения Бурал-Сардык (Восточный Саян) // Вопросы естествознания. – 2015. – № 2 (6). – С. 38–40.
31. Geochemistry and petrology of superpure quartzites from East Sayan Mountains, Russia / A.M. Fedorov, V.A. Makrygina, A.I. Nepomnyashchikh, A.P. Zhaboedov, A.V. Parshin, V.F. Posokhov, Y.V. Sokolnikova // Acta Geochimica. – 2019. – V. 38. – Iss. 1. – P. 22–39.
32. Люминесценция кварц-халцедоновых образований Кузбасса и её связь с геохимическими особенностями агаевой минерализации / Н.Н. Борозновская, Е.В. Звягинцева, А.П. Корнева, Т.С. Небера // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 170–178.
33. Цыпленко М.М. Структурный типоморфизм кварца хрустальных пегматитов (Ошкинское пегматитовое поле, Западная Монголия) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Томск, 2020. – Т. I. – С. 113–114.

34. Moxon T., Palyanova G. Agate genesis: a continuing enigma // Minerals. – 2020. – V. 10. – № 953. – P. 1–26.
35. Zhang X., Ji L., He X. Gemological characteristics and origin of the Zhanguohong agate from Beipiao, Liaoning Province, China: a combined microscopic, X-ray diffraction, and Raman spectroscopic study // Minerals. – 2020. – V. 10 (5). – P. 401.
36. Особенности минерального состава низкопроницаемых кремнисто-глинистых пород-коллекторов берёзовской свиты севера Западной Сибири / Л.Г. Ананьева, А.А. Дорошенко, С.С. Ильенко, Я.О. Карымова, М.В. Коровкин, Ю.А. Максимова, А.В. Пестерев, О.Н. Процкий, О.В. Савинова, М.О. Хрущева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 114–123.
37. Литолого-минералогическое обоснование стратификации нижнеберёзовской подсвиты Медвежьего и Вынгапуровского месторождений / Л.Г. Ананьева, А.А. Дорошенко, А.А. Дорошенко, Д.И. Изосимов, Я.О. Карымова, И.В. Качинская, М.В. Коровкин, С.В. Нерсесов, О.В. Постникова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 89–99.
38. Лютоев В.П. Структура и спектроскопия халцедона. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 116 с.
39. Применение электроимпульсного дробления для получения высокочистого кварцевого концентрата / Л.Г. Ананьева, А.А. Жерлицын, С.С. Кондратьев, М.В. Коровкин, О.В. Савинова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2022. – Т. 9. – № 1. – С. 126–132.
40. Радиационные эффекты в d-кварце / Г.С. Жданов, В.Г. Зубов, Е.В. Колонцова, Л.П. Осипова, И.В. Телегина // Кристаллография. – 1963. – Т. 8. – Вып. 2. – С. 207–212.
41. Features of metamict zircons based on their micrographs and the data of electron microprobe analysis / S.L. Votyakov, D.A. Zamyatin, Yu.V. Shchapova, A.V. Porotnikov, A.A. Krasnobaev // Doklady Earth Sciences. – 2014. – V. 457. – № 1. – P. 882–886.
42. Zamyatin D.A., Votyakov S.L., Shchapova Yu.V. JPD-analysis as a new approach for studying the zircon texture with micron spatial resolution with application to geochronology // Doklady Earth Sciences. – 2014. – V. 485. – № 2. – P. 376–380.
43. Некрашевич С.С., Гриценко В.А. Электронная структура оксида кремния (обзор) // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56. – Вып. 2. – С. 209–223.
44. Radwan O.A., Humphrey J.D., Al-Ramadan K.A. Quartz crystallinity index of Arabian sands and sandstones // Earth and Space Science. – 2021. – V. 8. – № 9. – № 1029.
45. Карякин А.Е. Кристаллографические признаки оптического кварца // Записки Всес. мин. об-ва. – 1948. – Т. 77. – В. 4. – С. 272–278.

Поступила: 11.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 18.04.2023 г.

Информация об авторах

Коровкин М.В., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор отделения нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; профессор факультета инновационных технологий, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Ананьева Л.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Жерлицын А.А., кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт сильноточной электроники СО РАН.

Кондратьев С.С., ведущий инженер, Институт сильноточной электроники СО РАН.

Савинова О.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Курская В.С., аспирант, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

UDC 539.26:549.514.51+548.75:549.514

ASSESSMENT OF CRYSTALLINITY DEGREE OF QUARTZ RAW MATERIALS

Mikhail V. Korovkin^{1,2},
mvk@tpu.ru

Lyudmila G. Ananyeva¹,
lga@tpu.ru

Andrey A. Zherlitsyn³,
andzh@oit.hcei.tsc.ru

Sergey S. Kondratiev³,
Kondratiev@oit.hcei.tsc.ru

Olesya V. Savinova¹,
logvinenkoov@tpu.ru

Veronika S. Kurskaya⁴,
kurskayav111@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
2/3, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

⁴ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to assess the degree of transformation of quartz raw materials in its natural occurrence, as well as, changes in the properties of raw materials and products are exploited under various operating conditions. X-ray diffraction and Infrared spectroscopy was used to assess the degree of crystallinity of various crystalline quartz materials and products made of silicon dioxide, which showed satisfactory convergence of results and can be recommended for use in world practice.

Objects: artificially grown quartz, including samples of synthetic quartz with an admixture of aluminum, zone-colored single crystal of quartz with an admixture of two and ferric iron; natural crystals of amethyst, smoky quartz, optical quartz; samples of fused quartz, products made of technical and optical quartz and silicate glass; as well as fine-grained samples of quartzites, including their micro- and nano-sized fractions.

Methods: optical and electron scanning microscopy, X-ray spectral and analysis, infrared spectroscopy, X-ray diffraction.

Results. The paper shows that the degree of crystallinity of quartz raw materials and products based on it is determined by the presence of a structural ordering in the near zone that characterizes the crystalline state corresponding to the α -quartz phase, which is confidently recorded by XRD and FTIR methods. The local disorder of high-purity quartz or quartzites having various impurities or defects in their structure that arise under the influence of external influences or exploitation causes deterioration of their properties and decrease in the degree of crystallinity.

Key words:

quartz, quartzites, silicon dioxide, quartz glass, crystallinity index, x-ray diffraction method, FTIR.

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00371).

REFERENCES

- Jung L. *High purity natural quartz*. New Jersey, Quartz Technology, Inc., 1992. 550 p.
- Santos M.F.M., Fujiwara E., Schenkel E.A., Enzweiler J., Suzuki C.K. Processing of quartz lumps rejected by silicon industry to obtain a raw material for silica glass. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, no. 135, pp. 65–70.
- Secu C.E., Secu M., Ghica C., Mihut L. Rare-earth doped sol-gel derived oxyfluoride glass-ceramics: Structural and optical characterization. *Optical Materials*, 2011, vol. 33, no. 11, pp. 1770–1774.
- Chithambo M.L., Niyonzima P. Radioluminescence of annealed synthetic quartz. *Radiation Measurements*, November 2017, vol. 106, pp. 35–39.
- Nepomnyashchikh A.I., Volcova M.G., Zhaboedov A.P., Paklin A.S., Sizova T.Y., Spiridonov A.M., Fedorov A.M., Shalaev A.A., Shendrik R.Y., Lesnikov A.K., Lesnikov P.A. Optical glass based on the East Sayan mountain quartzites. *Glass Phys. Chem.*, 2018, vol. 44, no. 2, pp. 130–136.
- Marinoni N., Broekmans M.A.T.M. Microstructure of selected aggregate quartz by XRD, and a critical review of the crystallinity index. *Cement and Concrete Research*, 2013, vol. 54, pp. 215–225.
- Kosmachov P.V., Vlasov V.A., Skripnikova N.K. Structure and properties of SiO₂ nanopowder obtained from high-silica raw materials by plasma method. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60 (2), pp. 249–253.
- Ananyeva L., Ilenok S., Korovkin M., Kumpyak E., Zherlitsyn A. Production of high-purity quartz concentrate by electrical pulse fragmentation. *Proceedings – 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics*. Tomsk, 2018. pp. 209–213.
- Hlavay J., Jonas S., Elek S., Inczedy J. spectroscopic characterization and quantitative estimation of natural weathering of silicates in sediments of Dikrong River, India. *Clays and Clay Minerals*, 1978, vol. 26 (2), pp. 139–143.
- Ramasamy V., Ponnusamy V. Analysis of air suspended particles of Coimbatore-a FTIR study. *Indian J. Phys.*, 2009, vol. 88 (3), pp. 301–312.
- Asscher Y., Sasso G.D., Nodari L., Angelini I., Tiziana Boffa Ballaran T.B., Artioli G. Differentiating between long and short range disorder in infra-red spectra: on the meaning of «crystallinity» in silica. *Phys. Chem. Phys.*, 2017, vol. 19, pp. 21783–21790.
- Murata K.J., Norman II M.B. An index of crystallinity for quartz. *American Journal of Science*, 1976, vol. 276, pp. 1120–1130.
- Plyusnina I.I. Study of the structural disorder of chalcedony by infrared spectroscopy. *DAN SSSR*, 1978, vol. 240, no. 4, pp. 839–842. In Rus.
- Balakirev V.G., Kievlenko E.Ya., Nikolskaya L.V., Samoilovich M.I., Khadzhi V.E., Tsinober L.I. *Minerologiya i kristallogizika yuvelirnykh raznovidnostey kremnezema* [Mineralogy and crystal physics of jewelry varieties of silica]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 149 p.
- Silin A.R., Trukhin A.N. *Tochnye defekty i elementarnye vzbuzhdeniya v kristallicheskom i stekloobraznom SiO₂* [Point defects and elementary excitations in crystalline and glassy SiO₂]. Riga, Zinatne Publ., 1985. 244 p.
- Scott J.F., Porto S.P.S. Longitudinal and transverse optical lattice vibrations in quartz. *Phys. Rev.*, 1967, vol. 161, pp. 903–910.

17. Zakharov V.B. Geological structure of the Antonovskaya group of quartzite deposits. *Mining Journal*, 2000, no. 7, pp. 7–9. In Rus.
18. Ananeva L.G., Korovkin M.V. Mineralogical and geochemical study of quartzites of the Antonovskaya group of deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 3, pp. 50–55. In Rus.
19. Nepomnyashchikh A.I., Volkova M.G., Zhaboedov A.P., Fedorov A.M. Quartz concentrates based on compact quartzite. *Inorganic Materials*, 2018, vol. 54, pp. 805–808.
20. Ayurzhanbaeva D.T.S., Fedorov A.M., Mazukabzov A.M., Nepomnyashchikh A.I., Ochirova E.A., Posokhov V.F. Mechanisms of high-purity quartzite formation at the Bural-Sardyk deposit (Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61 (10), pp. 1075–1087.
21. Fedorov A.M., Makrygina V.A., Mazukabzov A.M., Nepomnyashchikh A.I., Ayurzhanbaeva D.T.S., Volkova M.G. Resources of quartz raw materials, Gargan block, East Sayan quartzite-bearing area. *Georesursy*, 2021, vol. 23 (4), pp. 96–106. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.11>.
22. *Description for X-ray diffractometer X'Pert PRO*. The Analytical X-ray Company, 2013. 20 p.
23. Ilyicheva O.M., Naumkina N.I., Lygina T.Z. On the structural perfection of natural and synthetic silica. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2010, no. 8, pp. 459–464. In Rus.
24. Peskov A.V., Olkhovskaya V.A. Measurement of X-ray parameters of quartz for standard-free express assessment of mineral content. *Bulletin of the Samara State University. Ser. Technical science*, 2017, no. 1 (53), pp. 153–164. In Rus.
25. Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Sobolev G.A., Kireenkova S.M., Morozov Yu.A., Smulskaya A.I. IR spectroscopy of quartz nanocrystals formed during intensive crushing of a heterogeneous material (granite). *Solid State Physics*, 2011, vol. 53, no. 12, pp. 2371–2375. In Rus.
26. Korovkin M.V., Ananeva L.G. Otsenka stepeni metamorfizma kvartsitov Antonovskoy gruppy mestorozhdeniy po dannym mineralogicheskikh issledovaniy [Assessment of the degree of metamorphism of quartzites of the Antonovskaya group of deposits according to mineralogical studies]. *Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Azii* [Mineralogy, geochemistry and mineral resources of Asia]. Tomsk, Tomsk CNTI – a branch of the Federal State Budgetary Institution «REA» of the Ministry of Energy of Russia Publ., 2013. Iss. 2, pp. 139–145.
27. Korovkin M.V., Ananeva L.G., Antsiferova A.A. Estimation of the degree of transformation of quartzite by infrared spectrometry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 47–54. In Rus.
28. Razva O.S., Anufrienkova A.M., Korovkin M.V. Evaluation of the degree of transformation of quartzites by X-ray diffraction. *Modern high technologies*, 2014, no. 7-2, pp. 27–28. In Rus.
29. Korovkin M., Ananieva L., Nebera T., Antsiferova A. Assessment of quartz materials crystallinity by x-ray diffraction. *Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials*, 2016, vol. 110, 012095, 4 p.
30. Zhaboedov A.P., Nepomnyashchikh A.I., Presnyakov R.V. Investigation of quartzites from the Bural-Sardyk deposit (Eastern Sayan). *Problems of natural sciences*, 2015, no. 2 (6), pp. 38–40. In Rus.
31. Fedorov A.M., Makrygina V.A., Nepomnyashchikh A.I., Zhaboedov A.P., Parshin A.V., Posokhov V.F., Sokolnikova Y.V. Geochemistry and petrology of superpure quartzites from East Sayan Mountains, Russia. *Acta Geochimica*, 2019, vol. 38, no. 1, pp. 22–39.
32. Boroznovskaya N.N., Zvyagintseva E.V., Korneva A.P., Nebera T.S. Luminescence of quartz-chalcedony formations of Kuzbass and its relationship with the geochemical features of agate mineralization. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 170–178. In Rus.
33. Tsyplenko M.M. Strukturny tipomorfizm kvartsa khrustalenykh pegmatitov (Oshkinskoe pegmatitovoe pole, Zapadnaya Mongoliya) [Structural typomorphism of quartz of crystal-bearing pegmatites (Oshkinskoe pegmatite field, Western Mongolia)]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXIV Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 75-letiyu Pobedy v Velikoy i Belukoi Otechestvennoy voyne* [Problems of geology and exploitation of subsoils. Proceedings of the XXIV International Symposium named after Academician M.A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 75th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War]. Tomsk, 2020. pp. 113–114.
34. Moxon T., Palyanova G. Agate genesis: a continuing enigma. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 953, pp. 1–26.
35. Zhang X., Ji L., He X. Gemological characteristics and origin of the Zhangguohong agate from Beipiao, Liaoning Province, China: a combined microscopic, X-ray diffraction, and Raman spectroscopic study. *Minerals*, 2020, vol. 10 (5), pp. 401.
36. Ananyeva L.G., Doroshenko A.A., Ilenok S.S., Karymova Y.O., Korovkin M.V., Maksimova Y.A., Pesterev A.V., Protosky O.N., Savinova O.V., Khrushcheva M.O. Features of mineral composition of low-permeable siliceous-clay reservoir rocks from the berezovskaya formation in the north of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 114–123.
37. Ananyeva L.G., Doroshenko A.A., Doroshenko A.A., Izosimov D.I., Karymova Y.O., Kachinskas I.V., Korovkin M.V., Nersesov S.V., Postnikova O.V. Lithological and mineralogical substantiation of the lower berezovskaya subformation stratification of the medvezhye and vyngapurovskoe deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 89–99. In Rus.
38. Lyutov V.P. *Struktura i spektroskopiya khaltsedona* [Structure and spectroscopy of chalcedony]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2004. 116 p.
39. Ananyeva L.G., Zherlitsyn A.A., Kondratyev S.S., Korovkin M.V., Savinova O.V. Using of electric pulse fragmentation for the production of high-purity quartz concentrate. *Fundamental and applied issues of mining sciences*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 126–132. In Rus.
40. Zhdanov G.S., Zubov V.G., Kolontsova E.V., Osipova L.P., Telegina I.V. Radiatsionnye efekty v d-kvartse [Radiation effects in d-quartz]. *Crystallography*, 1963, vol. 8, Iss. 2, pp. 207–212.
41. Votyakov S.L., Zamyatin D.A., Shchapova Yu.V., Porotnikov A.V., Krasnobayev A.A. Features of metamict zircons based on their micrographs and the data of electron microprobe analysis. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 457, no. 1, pp. 882–886.
42. Zamyatin D.A., Votyakov S.L., Shchapova Yu.V. JPD-analysis as a new approach for studying the zircon texture with micron spatial resolution with application to geochronology. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 485, no. 2, pp. 376–380.
43. Nekrashevich S.S., Gritsenko V.A. Electronic structure of silicon oxide (Review). *Solid State Physics*, 2014, vol. 56, Iss. 2, pp. 209–223. In Rus.
44. Radwan O.A., Humphrey J.D., Al-Ramadan K.A. Quartz crystallinity index of Arabian sands and sandstones. *Earth and Space Science*, 2021, vol. 8, no. 9, no. 1029.
45. Karyakin A.E. Kristallograficheskie priznaki opticheskogo kvartsa [Crystallographic features of optical quartz]. *Notes of the Soviet Mineralogical Society*, 1948, vol. 77, no. 4, pp. 272–278.

Received: 11 April 2023.

Reviewed: 18 April 2023.

Information about the authors

Mikhail V. Korovkin, Dr. Sc., professor, senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, National Research Tomsk State University.

Lyudmila G. Ananyeva, Cand Sc., associate professor National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey A. Zherlitsyn, Cand Sc., head of laboratory, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

Sergey S. Kondratyev, lead engineer, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

Olesya V. Savinova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Veronika S. Kurskaya, graduate student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

УДК 651.263:622.691.24

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ CCS В КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Никитенков Алексей Николаевич^{1,2},
sputnik70@yandex.ru

Новиков Дмитрий Анатольевич^{3,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Максимова Анастасия Алексеевна^{2,3},
rock.nastaya64@gmail.com

Пенигин Артем Витальевич⁴,
Penigin.AV@gazpromneft-ntc.ru

Вараксина Ирина Валерьевна³,
VaraksinalV@ipgg.sbras.ru

Жуковская Елена Анатольевна⁴,
Zhukovskaya.EA@gazpromneft-ntc.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3

⁴ ООО «Газпромнефть НТЦ»,
Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75–79, литер Д.

Актуальность. В мировой практике широко используется технология по геологическому хранению углекислого газа в глубоких водоносных горизонтах, позволяющая снижать эмиссию парниковых газов в атмосферу Земли и минимизировать их влияние на глобальное изменение климата.

Цель: выявление особенностей взаимодействия в системе «вода – порода – углекислый газ» применительно к карбонатным коллекторам, широко распространенным в гидрогеологических бассейнах на территории РФ и потенциально пригодных к использованию для размещения в них углекислого газа. Эти процессы рассмотрены на примере древней Сибирской платформы, где в настоящее время идет рост промышленной добычи углеводородов и реализация серии масштабных проектов в сфере нефте- и газохимии.

Методы. Для решения поставленной задачи применено математическое физико-химическое моделирование. Расчёты реализованы программным комплексом HydroGeo, в котором обеспечение достижения химических равновесий для системы «вода–порода» реализовано на основе метода констант равновесия.

Результаты. Полученные результаты позволили оценить направленность происходящих в рассмотренных коллекторах геохимических процессов, а также дать качественную оценку изменения порового пространства в условиях различной степени его насыщения углекислотой. Установлено, что при насыщении раствора CO₂ наблюдается закономерное его подкисление с переходом химических элементов преимущественно к формам комплексных ионов, связанных с гидрокарбонат-ионом и ионами хлора (Mn, Na, K). В то же время на формы миграции Ca и Fe насыщение углекислотой такого сильного влияния не оказывает. Отдельно обращает на себя внимание Al, который при появлении углекислоты из комплексных форм практически полностью переходит в Al³⁺. В изученных эталонах наблюдается достаточно интенсивное преобразование пород коллектора с перераспределением элементов между первичной и вторичной минеральными фазами (как растворение, так и осаждение минералов до нескольких сотен г/дм³) при сравнительно небольших абсолютных изменениях величины открытой пористости. В ряде рассмотренных объектов за счет снижения pH происходит растворение кальцита и доломита. Направленность преобразований, а также тренд изменения фильтрационно-емкостных свойств определяются конкретным минералогическим сочетанием пород коллектора и содержащегося в них рассола, а также стадией эволюции рассматриваемой системы (первая часть рассмотренных сочетаний изначально далека от равновесного состояния и продолжает взаимодействовать, вторая – близка к равновесию – переходит в неравновесное состояние за счёт насыщения углекислотой).

Ключевые слова:

Технология CCS, физико-химическое моделирование, взаимодействие вода–порода–газ, коэффициент насыщения, формы миграции химических элементов, карбонатный коллектор, Сибирская платформа.

Введение

Проблема увеличения содержания углекислого газа в атмосфере, являющаяся следствием антропогенной активности, уже несколько десятилетий привлекает внимание ученых. Изменение состава атмосферы, насыщение ее парниковыми газами, в соответствии с современным общепринятым в среде экологов мнением, приводит к изменению климата. Причина – выбросы углекислоты при работе промышленных предприятий и использовании ископаемого топлива [1].

В России существуют благоприятные гидрогеологические условия для размещения больших объемов углекислого газа в глубоких водоносных горизонтах [2]. При размещении в них углекислоты необходимо иметь представление как о геологическом строении, так и о гидрогеологических условиях и взаимодействиях, происходящих в системе «вода–порода–газ». Процесс размещения CO₂, связанный с нарушением естественного гидрогеологического, гидродинамического и геотермического режимов, может приводить к

загрязнению атмосферы, обусловленному его утечкой через литологические окна и дизъюнктивные нарушения [3].

В настоящее время в мире реализуется большое количество проектов по размещению углекислого газа в разновозрастных геологических формациях, которые сильно отличаются по геохимическим особенностям системы «вода–порода», а также термобарическим условиям. Проекты CCS реализуются в терригенных и карбонатных коллекторах различной степени засоления. Во многих странах мира на правительственном уровне принимаются решения по минимизации последствий антропогенного влияния на атмосферу Земли, включая управление различными секторами экономики через фискальные меры и развитие системы торговли углеродными единицами (квотами). Результаты последних исследований можно рассмотреть на примере Северной Америки [4–6] и Южной [7], Европы [8–11], Китая [12–16], Японии [17], Индии [18, 19], Индонезии [20, 21], России [22].

В данной работе рассмотрены результаты физико-химического моделирования взаимодействий в системе «вода–порода» для карбонатных коллекторов при различных степенях насыщения раствора CO_2 с коэффициентами насыщения 0,2–1, осуществленного средствами программного комплекса HydroGeo [23, 24].

Полученные результаты позволяют охарактеризовать направленность происходящих в карбонатном коллекторе геохимических процессов, а также дать качественную оценку изменению порового пространства в условиях различной степени его насыщения углекислотой.

Методика исследования

Для решения поставленной задачи применен метод математического физико-химического моделирования. Его принципы и описание взаимодействий в системе «вода–порода» взяты из основ физической химии [25] и неравновесной термодинамики [26]. В нашем случае моделирование реализовано программным комплексом HydroGeo [1, 2], в котором для моделирования внутренних источников/стоков вещества реализован метод констант равновесия [27].

Моделирование взаимодействия между горной породой–раствором– CO_2 в рамках данной работы реализовано путём итерационной оценки состояний системы при ее насыщении углекислотой с коэффициентами насыщения 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1, а также результатов химических взаимодействий в получившемся растворе, идущих до достижения в нём условного равновесия. При анализе состава вод и пород в результатах представлены значения соответствующих характеристик системы после приведения её в равновесное состояние. В качестве критерия его достижения принято замедление процессов растворения-осаждения всех представленных в моделируемой системе компонентов твердой фазы до пренебрежимо малых величин.

Процесс настройки модели включает в себя выбор формирующих систему базовых ионов, а также ассоциатов и твёрдой фазы. В качестве последней был

произведен подбор минералов, слагающих карбонатные коллектора, дополненный на основе экспертных оценок набором вторичных минералов, образование которых теоретически возможно при рассматриваемых геохимических условиях. Система включает в себя 15 базовых ионов: H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{3+} , OH^- , $(\text{SO}_4)^{2-}$, $(\text{NO}_3)^-$, Cl^- , $(\text{HCO}_3)^-$, H_2O , SiO_2 . Также в систему были включены следующие ассоциаты для оценки форм нахождения химических элементов в растворе: $(\text{CO}_3)^{2-}$, $(\text{CO})^{2+}$, CO_2 , $(\text{NH}_4)^+$, $(\text{NO}_2)^-$, H_2SiO_3 , Fe^{2+} , H_2CO_3 , NH_3 , HNO_3 , HNO_2 , H_2O_2 , O_2 , NaHCO_3 , $(\text{NaCO}_3)^-$, Na_2CO_3 , NaNO_3 , $(\text{NaSO}_4)^-$, Na_2SO_4 , NaHSO_4 , NaCl , NaOH , NaHSiO_4 , NaHSiO_3 , $(\text{MgHCO}_3)^+$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, MgCO_3 , $(\text{MgNO}_3)^+$, MgSO_4 , $(\text{MgHSO}_4)^+$, $\text{Mg}(\text{HSO}_4)_2$, MgCl^+ , MgCl_2 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, MgOH^+ , $(\text{MgHSiO}_3)^+$, $\text{MgSiO}_2(\text{OH})_2$, $(\text{MgSiO}(\text{OH})_3)^+$, $(\text{Al}(\text{NO}_3)_2)^+$, $(\text{Al}(\text{SO}_4)_2)^-$, $(\text{AlSO}_4)^+$, $(\text{AlCl}_2)^+$, $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$, $(\text{Al}(\text{OH})_2)^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $(\text{AlO}_2)^-$, $(\text{AlO}(\text{OH})_2)^-$, $\text{Al}(\text{OH})_6\text{SiO}^-$, $(\text{H}_3\text{SiO}_3)^+$, H_4SiO_4 , $(\text{HSiO}_3)^-$, $(\text{HSi}_2\text{O}_5)^-$, $(\text{H}_3\text{SiO}_4)^-$, HS^- , H_2S , $(\text{HSO}_3)^-$, H_2SO_4 , $(\text{HSO}_4)^-$, SO_2 , HCl , ClO^- , KHCO_3 , K_2CO_3 , $(\text{KCO}_3)^-$, KNO_3 , K_2SO_4 , $(\text{KSO}_4)^-$, KHSO_4 , KCl , $(\text{CaHCO}_3)^+$, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$, CaS_2O_3 , $\text{Ca}(\text{HSO}_4)_2$, $(\text{CaHSO}_4)^+$, CaCl^+ , CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaOH^+ , $\text{CaSiO}_2(\text{OH})_2$, $(\text{CaSiO}(\text{OH})_3)^+$, $\text{Mn}(\text{HCO}_3)_2$, $(\text{MnHCO}_3)^+$, $\text{Mn}_2(\text{CO}_3)_3$, MnCO_3 , $(\text{Mn}(\text{NO}_3)_2)^+$, $(\text{Mn}(\text{SO}_4)_2)^-$, $(\text{MnSO}_4)^+$, $\text{Mn}_2(\text{SO}_4)_3$, MnSO_4 , MnCl^+ , $(\text{MnO}_4)^-$, $(\text{Mn}(\text{OH})_2)^+$, $\text{Mn}(\text{OH})_3$, MnOH^+ , $(\text{Mn}(\text{OH})_3)^+$, $\text{Mn}(\text{OH})_2$, $(\text{FeHCO}_3)^+$, $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)_3$, FeCO_3 , $(\text{FeSO}_4)^+$, $(\text{Fe}(\text{SO}_4)_2)^-$, FeSO_4 , $(\text{FeS}_2\text{O}_3)^+$, FeS_2O_3 , FeS , $(\text{Fe}(\text{OH})_4)^-$, $(\text{Fe}(\text{OH})_2)^+$, $(\text{Fe}(\text{OH})_3)$, FeOH^+ , $(\text{Fe}(\text{OH})_2)$, $(\text{Fe}(\text{OH})_3)^-$.

Твердая фаза представлена 66 минералами: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ – анортит, KAlSi_3O_8 – полевошпат (К), $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – альбит, $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ – пироксен(Са-Ал), CaMgSiO_4 – оливин(монтмориленит), $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – диопсид, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – пренит, $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ – кордиерит, CaCO_3 к – кальцит, CaCO_3 а – арагонит, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ – доломит, MgCO_3 – магнезит, $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4$ – гидромагнезит, $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{H}_2\text{O})_{10}$ – натрон(сода), SiO_2 кв – кварц, SiO_2 х – халцедон, $\text{Al}(\text{OH})_3$ – гиббсит, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ – брусит, $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ м – монтмориллонит, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ к – каолинит, $\text{MgAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(Мг), $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ – алунит, $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – мусковит, $(\text{Fe}^{2+})(\text{OH})_2$ – амакинит, $(\text{Mn}^{2+})(\text{OH})_2$ п – пирохрит, $(\text{Fe}^{2+})_5\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ – амфибол, $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ф – флогопит, $(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3$ – сидерит, $(\text{Mn}^{2+})\text{CO}_3$ – родохрозит, $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ – хлорит(Ал), $\text{Ca}_{0.15}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(Са), $(\text{Fe}^{2+})_{0.2924}\text{Mg}_{2.9}\text{Al}_{1.6984}\text{Si}_{3.935}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(Fe²⁺–Мг), $\text{K}_{0.3}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(К), $\text{K}(\text{Fe}^{2+})\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ м – мусковит(Fe²⁺), $(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$ – гематит, $(\text{Fe}^{3+})\text{OOH}$ – гётит, $(\text{Fe}^{2+})\text{S}_2$ – пирит, $\text{K}_{0.5}\text{Al}_{2.5}\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит(К), $\text{Na}_{0.3}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(На), $\text{K}_{0.67}\text{Al}_{2.67}\text{Si}_{3.33}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит(К_{0.67}), $\text{K}_{0.6}\text{Mg}_{2.5}\text{Al}_{2.3}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит(К–Мг), $\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ м – мусковит(Мг), $\text{K}(\text{Fe}^{2+})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ б – биотит(К–Fe²⁺), $\text{K}_{0.5}(\text{Fe}^{3+})\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит(К–Fe³⁺), $\text{K}(\text{Fe}^{3+})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – мусковит(Fe³⁺), $\text{K}(\text{Fe}^{3+})_3\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – биотит(К–Fe³⁺), $\text{K}_{0.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – бейделлит(К), $\text{K}_{0.8}\text{Al}_{2.56}\text{Si}_{3.38}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит(К_{0.8}), $\text{Na}_{0.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – бейделлит(На),

$\text{Na}_{0,27}\text{Ca}_{0,1}\text{K}_{0,02}(\text{Fe}^{3+})_{0,19}\text{Mg}_{0,22}\text{Al}_{1,58}\text{Si}_{3,94}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(Na-Ca), $\text{Na}(\text{Fe}^{2+})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – биотит(Na-Fe²⁺), $\text{NaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ п – парагонит(метам.), $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ х – хлорит(Mg), $\text{Mg}_5\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ – амфибол, $\text{Mg}_{2,75}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит(Mg), $\text{Mg}_{2,25}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{1,25}\text{O}_5(\text{OH})_4$ – хлорит(Mg), $\text{Mg}_{4,5}\text{Al}_3\text{Si}_{2,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ – хлорит(Mg), $\text{Mg}_{0,67}(\text{Fe}^{3+})_{0,14}\text{Al}_{1,84}\text{Si}_{3,68}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(Mg-Fe³⁺), $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ х – хлорит(Mg), $\text{Ca}_{0,187}\text{Na}_{0,0205}\text{K}_{0,0205}\text{Fe}^{3+}_{0,141}\text{Mg}_{0,336}\text{Al}_{1,59}\text{Si}_{3,93}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит, $(\text{Fe}^{3+})_{0,335}\text{Mg}_{0,4456}\text{Al}_{1,6084}\text{Si}_{3,82}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит(Fe³⁺-Mg), $(\text{Fe}^{3+})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – глини. минер., CaSO_4 – ангидрит, $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ – гипс, NaCl – галит, $\text{NaCl}(\text{H}_2\text{O})_2$ – гидрогалит.

Особенности геохимии системы «вода–порода» в пределах глубоких водоносных горизонтов Сибирской платформы

Для оценки вектора протекания процессов взаимодействия в системе «вода (раствор) – горные породы» в условиях нагнетания углекислоты в водоносные горизонты при различных параметрах, характеризующих данный процесс, был выбран ряд эталонных объектов, соответствующих типичным минера-

логическим разновидностям карбонатных коллекторов на территории Сибирской платформы.

Всего в работе использовано 28 эталонов. Рассмотрим минералогический состав коллекторов (таблица), а также состав содержащегося в них раствора (заголовок содержит в себе имя коллектора с соответствующим ему порядковым номером его сочетания с раствором; проанализированы все сочетания коллектор/раствор).

Изменения минералогического состава в карбонатных коллекторах разного возраста в основном обусловлены вторичными процессами (рис. 1). Нижнекембрийский осинский продуктивный горизонт представлен как известняками, так и доломитами. Известняки микробиально-водорослевые, археоциатовые и органогенно-обломочные часто в разной степени доломитизированные, вплоть до полного замещения кальцита доломитом (рис. 1, Г). В отличие от более древних коллекторов в осинском резервуаре процесс доломитизации происходил на разных стадиях диа- и катагенеза [28]. Для горизонта характерна интенсивная вторичная минерализация ангидритом и каменной солью пустотного пространства карбонатных пород.

Таблица. Особенности минералогического состава и пластовых условий эталонных объектов

Table. Features of the mineralogical composition and reservoir conditions of reference objects

Параметр/содержание минерала, % об. Parameter/mineral content, % vol.	Кальцит Calcite	Доломит Dolomite	Ангидрит Anhydrite	Иллит/Ilit	Монтмориллонит Montmorillonite	Каолинит Kaolinite	Кварц/Quartz	Полевой шпат Feldspar	Пирит/Pyrite	Серпентин/Serpentine	Хлорит/Chlorite	Галит/Halite	Магнезит Magnesite	Тпл/Tm, °C	Рпл, МПа Pm, MPa	Пористость, % об. Porosity, % vol.
Эталон Standard	NK1	59,0	34,5	1,5	0,2	–	–	0,3	–	–	–	–	–	9,9	12,22	4,5
	NK2	35,8	53,4	0,6	–	–	–	0,5	–	–	–	3,5	–	14,9	17,85	6,2
	NK3	58,6	32,3	3,4	–	–	–	0,8	–	–	–	2,9	–	38,1	25,22	2,0
	NK4	63,2	11,0	22,6	0,1	–	–	0,9	–	–	–	1,0	–	35,1	23,9	1,2
	NK5	59,9	33,9	2,7	–	–	–	0,2	–	–	–	1,6	–	37,9	27,1	1,7
	NK6	54,9	34,3	1,3	–	–	–	–	–	–	–	6,5	–	12,4	15,9	3,0
	NK7	3,7	75,5	15,5	0,1	–	–	–	–	–	–	2,1	–	17,8	12,8	3,1
	NK8	–	73,1	14,7	–	–	–	1,5	–	–	–	9,2	–	41,6	29,2	1,5
	NK9	–	92,0	3,5	–	–	–	0,4	–	–	–	0,3	–	37,3	28,9	3,8
	VNK1	–	84,6	5,8	–	–	–	–	–	–	0,1	5,4	–	12,2	14,54	4,0
	VNK2	–	88,3	5,5	0,15	–	–	0,1	–	–	0,15	3,3	–	11,5	13,77	2,5
	VNK3	–	78,0	10,3	0,1	–	–	–	–	–	0,1	6,8	–	54,2	45,85	2,8
	V1	–	40,0	44,0	–	–	–	0,3	–	–	13,4	2,0	–	5,6	14,8	0,3
	V2	–	90,6	2,0	0,2	–	–	1,8	–	–	–	–	–	5,3	14,76	5,4
	V3	–	94,0	0,5	0,1	–	–	1,3	–	–	–	0,1	–	9,4	16,08	4,0
	V4	–	28,5	33,5	0,1	–	–	0,5	–	–	–	–	37,1	9,41	16,07	0,3
	V5	–	64,0	25	0,9	–	–	3,3	–	–	–	–	4	12,1	20,6	2,8
	V6	–	81,0	14,1	0,05	–	–	0,1	–	–	–	0,05	–	5,3	17,0	4,7
	V7	–	85,85	6,5	0,03	–	–	0,08	–	–	–	0,04	0,3	9,4	15,98	7,2
	V8	–	93,3	1,7	0,05	–	–	0,3	–	–	–	0,05	0,2	9,3	15,14	4,4
	V9	–	86,0	0,2	0,75	–	–	4,3	–	–	–	0,75	–	11,9	20,41	8,0
	V10	–	80,1	10,0	0,65	–	–	1,3	–	–	–	0,65	0,3	8,9	16,19	7,0
	V11	–	79,6	9,5	1,7	–	–	2,4	–	0,1	–	1,7	–	8,2	14,92	5,0
	V12	–	87,2	2,4	0,05	–	–	–	–	–	–	0,05	6,0	12,3	14,83	4,3
	V13	–	89,0	1,0	–	–	–	–	–	–	–	2,0	–	12,2	14,62	8,0
	V14	–	91,9	3,2	–	–	–	0,1	–	–	–	0,2	–	15,8	18,85	4,6
	R1	–	93,7	0,2	–	–	–	3,8	0,3	–	–	–	–	41,8	35,7	1,96
	R2	–	77,2	0,9	–	0,4	0,2	17,4	1,6	–	–	0,2	–	37,9	32,3	19,6

Примечание: эталоны: NK1–9 – нижнекембрийские; VNK1–3 венд-нижнекембрийские; V1–14 – вендские; R1–2 – рипейские; «–» – нет устойчивых фаз в заданных параметрах.

Note: standards: NK1–9 – Lower Cambrian; VNK1–3 – Vendian – Lower Cambrian; V1–14 – Vendian; R1–2 – Riphean; «–» – no stable phases in given parameters.

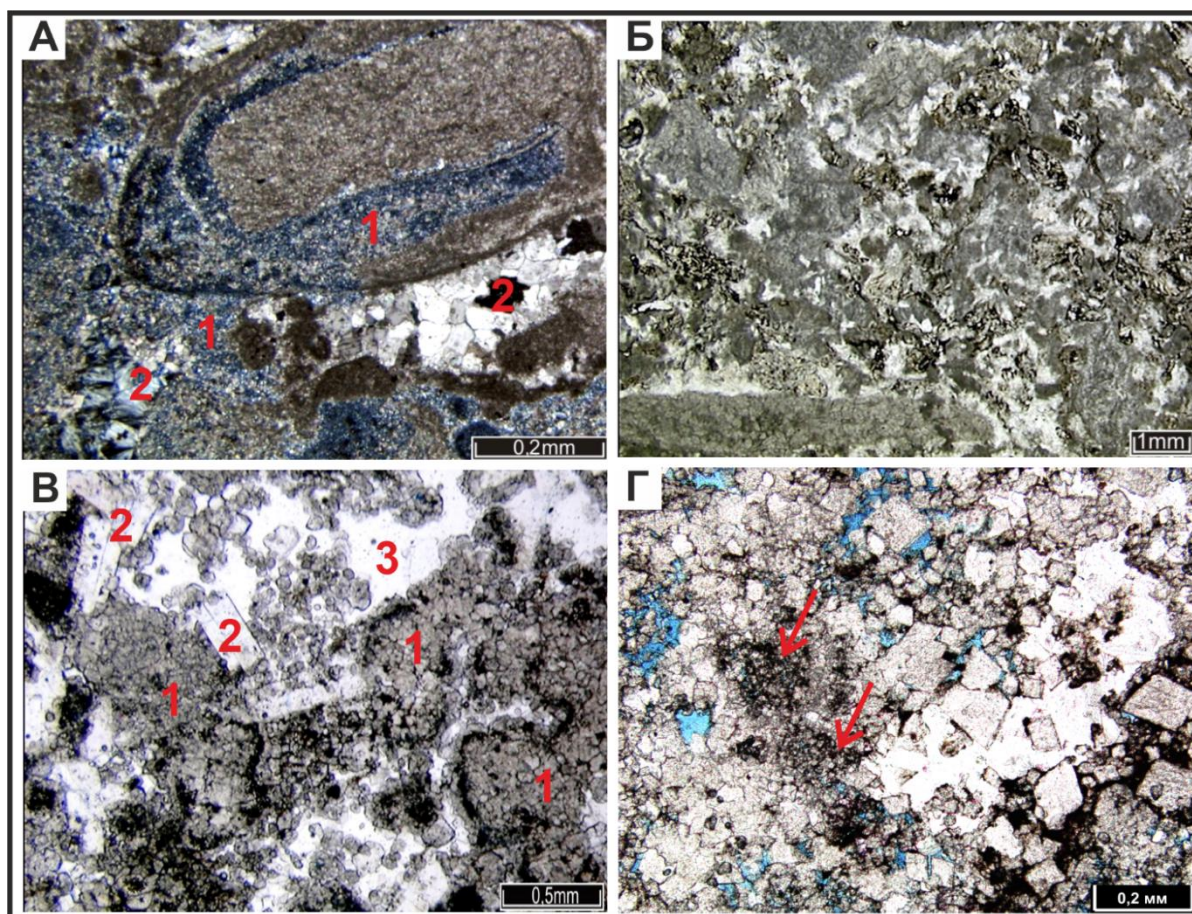


Рис. 1. Особенности минералогического состава карбонатных коллекторов в древних отложениях Сибирской платформы: А) две генерации кремнезёма в зернистом доломите: 1 – синседиментационные микрокристаллические агрегаты кварца развиваются по интракластам и межзерновому пространству; 2 – более поздний яснокристаллический кварц выполняет пустоты выщелачивания (фото с анализатором). Верхний рифей, вингольдская толща, Байkitская антеклизa; Б) доломито-магнезитовая сульфатизированная порода. Магнезит (светло-серый) выполняет микробийные обазования, доломит (темно-серый) цементирует микробийалиты и слагает интракласты, ангидрит (белый) выполняет пустоты выщелачивания. Остаточные поры заполнены битумом (чёрное). Верхний венд, тирская свита, ербогаченский горизонт, центральная часть Непско-Ботубинской антеклизы (НБА); В) доломит слагает перекристаллизованные микробийно-водорослевые образования типа Renalcis (1). Многочисленные пустоты выщелачивания в краевых частях выполнены шестоватыми кристаллами ангидрита (2), а в центральных заполнены галитом (3). Верхний венд-нижний кембрий, тэтэрская свита, усть-кутский горизонт, центральная часть НБА; Г) реликты известковых микробийалитов (стрелки) во вторичном доломите. Кристаллы доломита преимущественно ромбоэдрической формы. Наиболее крупные пустоты выщелачивания выполнены галитом (белое), более мелкие заполнены битумом (чёрное) или свободные (синее). Нижний кембрий, усольская свита, осинский горизонт, южная часть НБА

Fig. 1. Features of the mineralogical composition of carbonate reservoirs in ancient deposits of the Siberian Platform: A) two generations of silica in granular dolomite: 1 – synsedimentary microcrystalline aggregates of quartz develop along intraclasts and intergranular space; 2 – later clear-crystal quartz fills leaching voids (photo with analyzer). Upper Riphean, Vingolda sequence, Baikit anteklise; Б) dolomite-magnesite sulfated rock. Magnesite (light gray) fills microbial bases, dolomite (dark gray) cements microbialites and composes intraclasts, anhydrite (white) fills leach voids. Residual pores filled with bitumen (black). Upper Vendian, Tir Formation, Erbogachen horizon, central part of the Nepa-Botuoba anteklise (NBA); В) dolomite composes recrystallized microbial-algal formations of the type Renalcis (1). Numerous leaching voids in the marginal parts are filled with columnar anhydrite crystals (2), and in the central ones they are filled with halite (3). Upper Vendian-Lower Cambrian, Teter Formation, Ust-Kut horizon, central part of NBA; Г) relics of calcareous microbialites (arrows) in secondary dolomite. Dolomite crystals are predominantly rhombohedral in shape. The largest leaching voids are filled with halite (white), smaller ones are filled with bitumen (black) or free (blue). Lower Cambrian, Usolskaya Formation, Osinsky horizon, southern part of the NBA

В усть-кутском продуктивном горизонте венд-кембрийского возраста преобладают доломиты микробийно-водорослевого генезиса (рис. 1, В). Среди вторичного минералообразования доминируют про-

цессы сульфатизации. Галитизация проявлена в разрезе очень неравномерно, но в целом содержание галита выше, чем в нижележащих отложениях [29]. Кроме того, отмечается очень слабое окремнение (рис. 1, А).

Основным породообразующим минералом продуктивных горизонтов венда (ербогаченского и преобразованного) также является доломит, образованный в результате деятельности микробиальных сообществ. В ербогаченском горизонте наряду с доломитом присутствует раннедиагенетический магнезит (рис. 1, Б). Среди постседиментационных минералов в вендских коллекторах наибольшее распространение имеет ангидрит, в значительно меньшей степени развит галит [29].

Рифейский резервуар представлен раннедиагенетическими доломитами, преимущественно строматолитовыми и зернистыми, в которых широко проявлено окремнение (рис. 1, А). Исследования показали, что накопление кремнезема началось в седиментогенезе, а в эпигенезе произошло его многократное перераспределение [30].

Каждому эталонному объекту была подобрана соответствующая проба пластовых рассолов в стратиграфическом диапазоне от нижнего кембрия до рифея. В целом все воды характеризуются Cl Ca, Cl Na, Cl Ca-Na и Cl Na-Ca составом (рис. 2) с величиной общей минерализации, варьирующей в широком диапазоне от крепких до предельно насыщенных рассолов (233,0–555,1 г/дм³), pH также изменяется в широком диапазоне от сильно кислых до слабощелочных (2,6–7,8). Результаты исследований химического и изотопного состава эталонных вод приведены в серии работ [31–33].

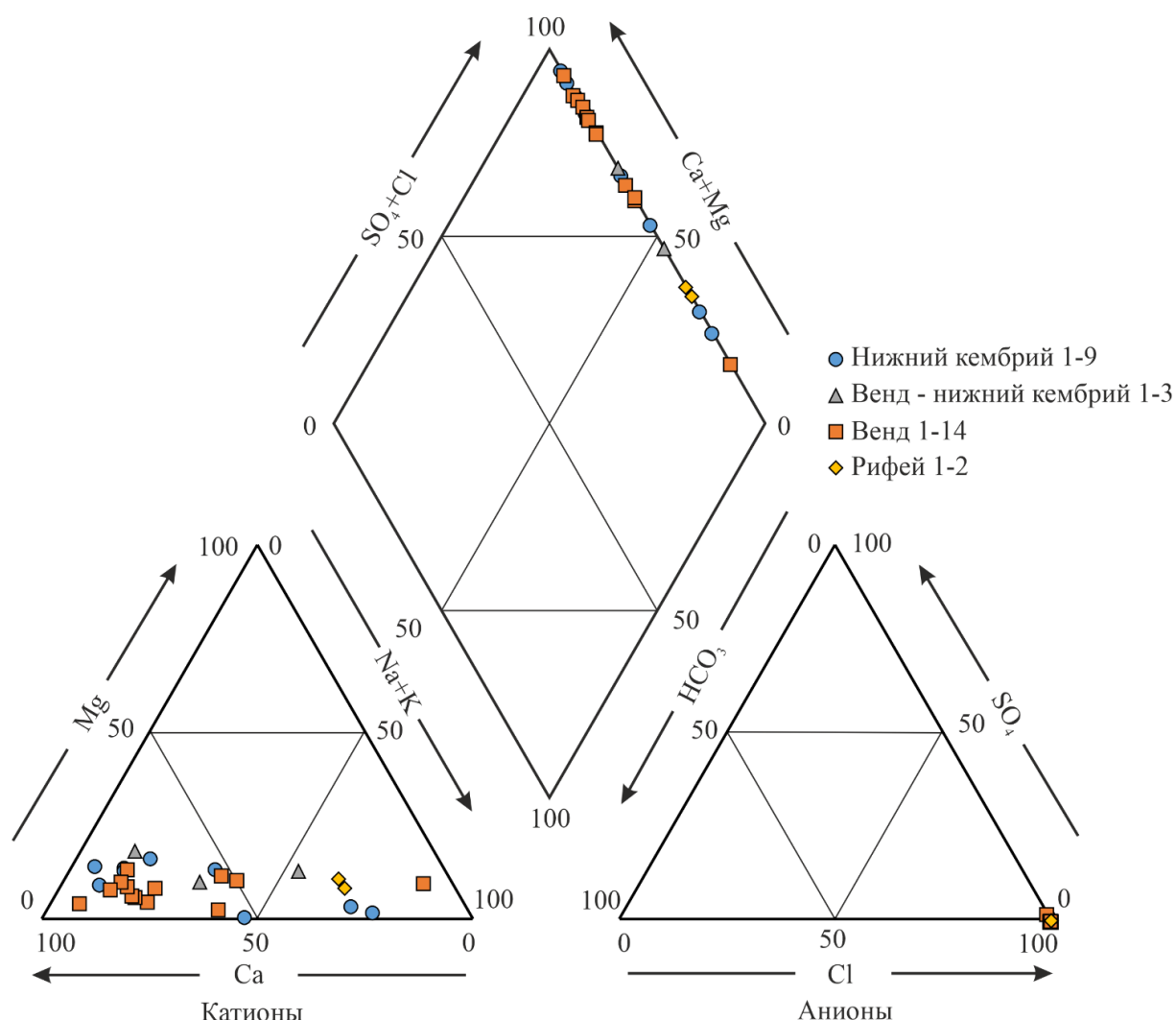


Рис. 2. Диаграмма Пайпера состава эталонных рассолов Сибирской платформы

Fig. 2. Peiper diagram of the composition of reference brines of the Siberian Platform

Обсуждение основных результатов

Формы нахождения химических элементов

Виды соединений, в форме которых представлены химические элементы в природных водах, определяются рядом факторов, среди которых основными являются термобарические условия системы (температура и давление) и базовые химические характеристики, а именно pH и Eh раствора. Проанализируем

изменения, обусловленные поступлением в раствор углекислого газа и результирующее перераспределение форм миграции присутствующих в системе компонентов.

По мере насыщения коллектора CO₂ кальций мигрирует изначально в формах как собственного иона, так и соединений с хлором. На начальных этапах насыщения углекислотой растет доля карбонатных

ассоциатов Са. Процесс дальнейшего насыщения раствора CO_2 сопровождается небольшим снижением величины pH и доли карбонатных соединений. При более значимой коррекции pH доля ассоциатов Са с Cl падает. Для вендских и рифейских рассолов характерна миграция кальция преимущественно в форме собственного иона (более 95 % на всех этапах насыщения углекислотой). Аналогичная ситуация с калием: на собственную форму приходится более 50 % для всех рассмотренных эталонов. По мере насыщения углекислотой в целом наблюдается тренд к появлению и росту относительного содержания гидрокарбонатного ассоциата KHCO_3 . Для Na картина в целом схожая с особенностями миграции Са. Перераспределение конкретных форм миграции определяется балансом соответствующих элементов между раствором и вторичной минеральной фазой. При этом в наиболее древних водоносных горизонтах натрий мигрирует преимущественно в форме собственного иона и по мере насыщения раствора CO_2 происходит снижение его доли на 5–10 %. Второй по распространенности формой миграции натрия является комплексный ион NaCl , увеличивающий свою долю с 15–17 до 17–25 %. Магний мигрирует преимущественно в форме соединения MgCl_2 (60–85 %) и MgCl^+ , на которые суммарно приходится 65–99 % Mg, по мере насыщения в ряде случаев растут доли соединений, связывающие Mg с гидрокарбонат-ионом различной степени валентности. В случае с марганцем происходит переход от миграции в форме собственного иона к гидрокарбонатным ассоциатам (за исключением рифея, где собственная форма продолжает оставаться преобладающей за счет близкого к равновесному состояния вод). Железо во всех рассматриваемых эталонах мигрирует преимущественно в форме восстановленного до Fe^{2+} собственного иона. В случае с алюминием баланс зависит от локального состояния равновесия, определяющегося перераспределением между содержащими Al и Cl минералами и раствором.

Оценка изменения pH при насыщении рассолов CO_2

При насыщении воды углекислотой происходит общее подкисление раствора за счёт диссоциации углекислоты, ведущей к образованию ионов H^+ , вследствие чего происходит снижение величины pH раствора. От данной величины зависит возможность формирования вторичных карбонатных минералов. Состав рассматриваемых коллекторов не предполагает компенсации кислотности за счёт подкисления при их растворении, в результате чего основные взаимодействия в системе происходят с алюмосиликатными минералами, скорость которых, как правило, относительно невелика. Данный эффект подтверждается в работе [34].

Установлено, что после насыщения рассолов CO_2 , которое в ряде случаев происходит за счёт вывода из раствора карбонатных минералов при достижении системой равновесного состояния, наблюдается общий тренд на снижение величины pH, зависящий от значений изначального насыщения эталонных рассолов углекислотой.

Изменение минералогического состава карбонатных коллекторов

Непосредственно после изменения физико-химических параметров и насыщения вод углекислотой активизируется процесс взаимодействия в системе «вода–порода». Моделирование сводится к пошаговому расчёту процесса растворения-осаждения, в ходе которого по мере насыщения раствора одними химическими элементами и вывода из него других происходит закономерное растворение пород-коллектора, а также его замещение продуктами взаимодействия содержащихся в растворе ионов, привносимых из растворяемой породы и внешних источников в условиях непрерывно меняющихся в ходе данного процесса физико-химических условий. В ряде работ наблюдается эффект растворения карбонатных минералов в призабойной зоне пласта в процессе закачки в неё CO_2 [35, 36]. Аналогичный результат получен и в наших исследованиях, при этом общий порядок изменения содержания карбонатных минералов относительно невелик и в абсолютных величинах не превышает 1 %.

Характеризуя общие закономерности по минералообразованию для группы вендских эталонов, следует отметить неравномерность результатов как по растворению, так и по осаждению минеральной фазы, обусловленную нелинейностью процесса эволюции системы «вода–порода», за счёт чего мы получаем достаточно большой разброс в количественных характеристиках. Из общих закономерностей следует выделить растворение ангидрита (от десятков до сотен мг/дм^3), а в ряде случаев при насыщении углекислотой осаждение гипса, доломита и кальцита (типично до десятков мг/дм^3), и, в отдельных случаях, небольших количеств магнезита, кварца и халцедона (как правило, десятки мг/дм^3). При наличии в коллекторе галита он также растворяется, мало коррелируя с концентрацией углекислоты. При степенях насыщения от 0,4 и выше в отдельных эталонах возможно образование сильвина в незначительных количествах.

Для нижнекембрийских водоносных горизонтов характерно: растворение ангидрита, образование доломита, кальцита. Венд-нижнекембрийские горизонты характеризуются растворением ангидрита, галита в схожих объёмах, образованием доломита и в меньших объёмах арагонита и кальцита. Для рифейских эталонов отмечается растворение ангидрита, доломита, полевого шпата и образование небольших объёмов кварца.

В целом при анализе результатов взаимодействия в системе «вода–порода» при ее насыщении углекислотой наблюдается, как правило, интенсификация процессов, начинающихся уже при небольших коэффициентах насыщения: происходит растворение ангидрита и галита (при их наличии), в ряде случаев раствор по насыщению углекислотой становится равновесным к пириту и сильвину. Поведение карбонатных минералов может носить разнонаправленный характер: как растворения, так и осаждения в виде вторичных минеральных фаз. В ряде случаев раствор насыщается к кварцу и алюмосиликатам, в незначительных количествах вывода их из раствора.

Изменение открытой пористости карбонатных коллекторов

Одним из непосредственных результатов взаимодействий в системе «вода–порода» является изменение порового скелета породы, содержащей раствор. Современные методы моделирования позволяют оценить лишь абсолютные величины изменений в объёме порового пространства, а также охарактеризовать его преобразование (растворения первичных и образования вторичных минералов) непосредственно в зоне активных взаимодействий (затронутых объёмом открытой пористости). В частности, при осаждении вторичных минералов поровое пространство может уменьшаться, а при растворении породы – напротив, увеличиваться. Оба процесса идут с соответствующим изменением фильтрационно-емкостных свойств водоносного горизонта. Направленность изменений, а также вида и структуры порового пространства целиком и полностью определяется локальными параметрами закачки и пласта и может быть полноценно определена лишь аналитическими методами при лабораторных исследованиях керна [37]. Тем не менее оценка направленности процесса преобразования порового пространства является одним из важных этапов данной работы, результаты которого представлены ниже.

На рис. 3 представлена характеристика изменчивости пористого пространства в результате взаимодействий в системе «вода–порода» при различных

концентрациях углекислоты. Для вендских эталонов характерны сравнительно небольшие изменения общей пористости (составляющие до 0,7 % в рамках одного образца) с общим трендом на увеличение. Для оставшихся эталонных объектов закономерности в целом всё те же: колебания абсолютной величины в пределах ~1 %, как с трендом на относительно небольшой рост (нижний кембрий), так и с незначительными колебаниями относительно исходных значений (венд, венд – нижний кембрий, рифей).

Общая пористость всех рассматриваемых эталонов меняется незначительно, однако наблюдаются значимые структурные изменения пористой части скелета породы, в пределах которой могут протекать достаточно интенсивные взаимодействия в системе «вода–порода», теоретически преобразующие до нескольких сотен граммов на литр вещества первичной породы, с выводом высвобождаемых элементов как в раствор, так и во вторичную минеральную фазу.

В целом для всех рассмотренных в работе эталонных объектов характерен сравнительно небольшой рост величины открытой пористости на значения, в среднем не превышающие 1–2 % на всём изученном интервале изменения концентраций углекислоты. Однако при анализе в относительных величинах мы можем получать более заметные изменения, до десятков процентов относительно начальной величины.

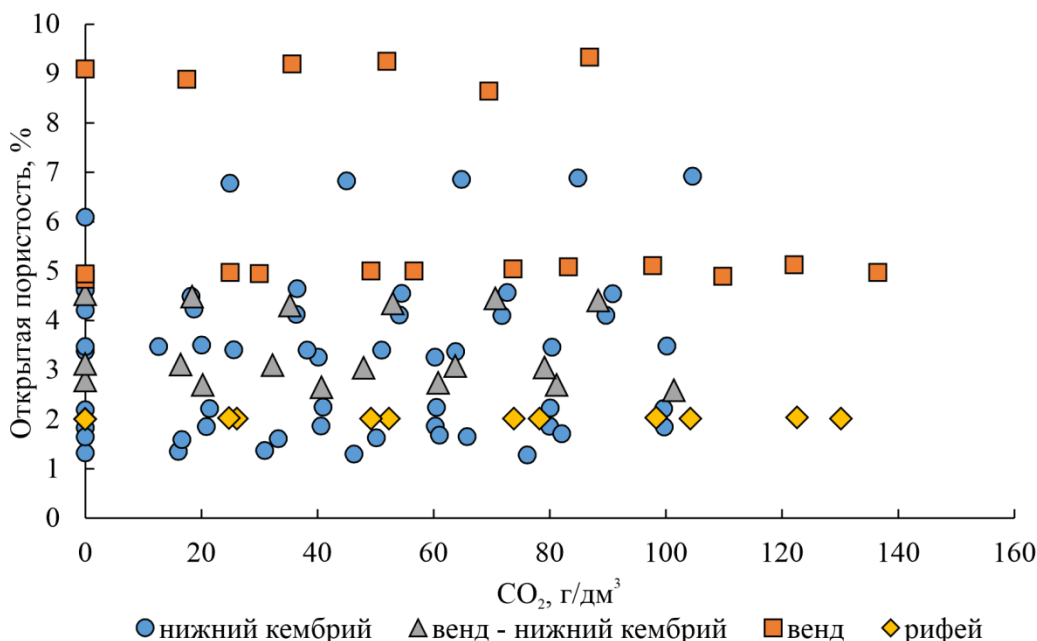


Рис. 3. Изменение открытой пористости набора эталонов коллекторов Сибирской платформы при их взаимодействии с карбонизированными водами

Fig. 3. Changes in the open porosity of a set of standards of Siberian platform reservoirs during their interaction with carbonized waters

Заключение

В ходе работ по оценке равновесий в системе «вода – порода – углекислый газ» проведено моделирование взаимодействий на примере 28 эталонных объектов (коллектор, пластовый флюид, CO_2) на территории Сибирской платформы. Установлены формы

миграции химических элементов при насыщении вод углекислотой. Так, при насыщении раствора CO_2 выявлено закономерное его подкисление с переходом элементов к преимущественно формам комплексных ионов, связанных с гидрокарбонат-ионом и ионами хлора (Mn, Na, K). В то же время на формы миграции

Са и Fe насыщение углекислотой такого сильного влияния не оказывает. Отдельно обращает на себя внимание Al, который при появлении углекислоты из комплексных форм практически полностью переходит в Al^{3+} .

Исходя из полученных результатов следуют четыре основных вывода по изменениям порового пространства карбонатных коллекторов:

1. В изученных эталонах наблюдается достаточно интенсивное преобразование пород коллектора с перераспределением элементов между первичной и вторичной минеральными фазами (как растворение, так и осаждение породы до нескольких сотен г/дм³) при сравнительно небольших абсолютных изменениях величины открытой пористости. В частности, за счет снижения pH в ряде рассмотренных коллекторов происходит в том числе и закономерное растворение кальцита и доломита, наблюдаемое вместе с общими геохимическими закономерностями процесса, перечисленными выше, а также и в ряде работ других исследователей [24, 35, 38].
2. Направленность преобразований, а также тренд изменения фильтрационно-емкостных свойств определяются конкретным минералогическим сочетанием пород коллектора и содержащегося в них рассола, а также стадией эволюции рассматриваемой системы (первая часть рассмотренных сочетаний изначально далека от равновесного состояния и продолжает взаимодействовать, вторая – близка к равновесию – переходит в неравновесное состояние за счёт их насыщения углекислотой). Поэтому необходимость применения методов физико-химического моделирования как одного из необходимых этапов при реализации процессов закачки углекислого газа не вызывает сомнений для обоснования граничных условий при реализации проектов размещения CO₂ (для

выбора оптимальных сочетаний коллекторов, растворов и режимов закачки углекислого газа).

3. Требуются дополнительные экспериментальные (лабораторные) исследования для более точных оценок кинетики и масштабов перераспределения химических элементов в первичной и вторичной минеральных фазах, а также изучения изменчивости фильтрационно-емкостных свойств достаточно интенсивно преобразуемого коллектора и кинетики данного процесса.
4. При выборе в качестве резервуара конкретного горизонта помимо рассмотренных в статье факторов также необходимо учитывать следующие параметры: физико-географическое месторасположение с поправкой на литолого-геологические условия, определяющие перераспределение углекислоты в пласте после закачки; полноту данных по граничным условиям (в частности, по целостности кровли горизонта и по прогнозу ее устойчивости при сейсмических событиях); технологию закачки углекислого газа (физическая форма закачиваемой углекислоты, производительность установок), а также ряд других факторов преимущественно экономического плана, не являющихся предметом рассмотрения данной статьи (в частности, наличие и доступность инфраструктуры в предполагаемом районе размещения; а также предполагаемые объемы размещения). С позиций гидрогеохимических взаимодействий, а также эффективной ёмкости горизонтов наибольший интерес из рассмотренных представляют вендские отложения и отдельные горизонты нижнего кембрия, характеризующиеся наибольшими величинами открытой пористости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014, Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Углекислый газ в атмосфере / К.Х. Валлен, Ч. Бас, А. Бьеркстрем, Г. Кольмайер и др. / пер. с англ. / под ред. В. Баха, А. Крейна, А. Берже, А. Лонгетто. – М.: Мир, 1987. – 534 с.
2. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик, Я.В. Садыкова, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Максимова, С.В. Головин, Н.Г. Главнов, Е.А. Жуковская // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 3 – С. 36–42.
3. Impact of Brine/CO₂ exposure on the transport and mechanical properties of the Mt Simon sandstone / Z. Shi, L. Sun, I. Haljasmaa, W. Harbert, S. Sanguinito, M. Tkach, A. Goodman, T.T. Tsotsis, K. Jessen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 177. – P. 295–305.
4. Ochu E.R., Friedmann S.J. CCUS in a net-zero U.S. power sector: policy design, rates, and project finance // The Electricity Journal. – 2021. – V. 34. – Iss. 7. – 107000.
5. Cavanagh A., Ringrose P. Improving oil recovery and enabling CCS: a comparison of offshore gas-recycling in Europe to CCUS in North America // Energy Procedia. – 2014. – V. 63. – P. 7677–7684.
6. Overview of world bank CCUS program activities in Mexico / F. Mourits, N. Kulichenko-Lotz, G.H. González, J.M. Nieta // Energy Procedia. – 2017. – V. 114. – P. 5916–5932.
7. Rodrigues H.W.L., Mackay E.J., Arnold D.P. Multi-objective optimization of CO₂ recycling operations for CCUS in pre-salt carbonate reservoirs // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2022. – V. 119. – 103719.
8. Optimization of CCUS supply chains in the UK: a strategic role for emissions reduction / G. Leonzio, D. Bogle, P.U. Foscolo, E. Zondervan // Chemical Engineering Research and Design. – 2020. – V. 155. – P. 211–228.
9. Suicmez V.S. Feasibility study for carbon capture utilization and storage (CCUS) in the Danish North Sea // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – V. 68. – 102924.
10. Leonzio G., Foscolo P.U., Zondervan E. An outlook towards 2030: optimization and design of a CCUS supply chain in Germany // Computers & Chemical Engineering. – 2019. – V. 125. – P. 499–513.
11. Development of CCUS clusters in Croatia / D. Vulin, I.K. Močilac, L. Jukić, M. Arnaut, F. Vodopić, B. Saftić, D.K. Sedlar, M. Cvetković // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2023. – V. 124. – 103857.
12. Li J. Accelerate the offshore CCUS to carbon-neutral China // Fundamental Research. – 2022.
13. Research on CCUS business model and policy incentives for coal-fired power plants in China / X. Wang, R. Tang, M. Meng, T. Su // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2023. – V. 125. – 103871.
14. China's multi-sector-shared CCUS networks in a carbon-neutral vision / H. Tang, W. Chen, S. Zhang, Q. Zhang // iScience. – 2023. – V. 26. – Iss. 4. – 106347.
15. Coal-fired power plant CCUS project comprehensive benefit evaluation and forecasting model study / J. Han, J. Li, X. Tang, L.

- Wang, X. Yang, Z. Ge, F. Yuan // Journal of Cleaner Production. – 2023. – V. 385. – 135657.
16. The potential for CCUS in selected industrial sectors – summary of concept evaluations in Finland / S. Kouri, E. Tsupari, J. Kärki, S. Teir, R. Sormunen, T. Arponen, M. Tuomaala // Energy Procedia. – 2017. – V. 114. – P. 6418–6431.
17. Kawai E., Ozawa A., Leibowicz B.D. Role of carbon capture and utilization (CCU) for decarbonization of industrial sector: a case study of Japan // Applied Energy. – 2022. – V. 328. – Article 120183. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120183> (дата обращения: 15.03.2023).
18. Application of CCUS in India: designing a CO₂ EOR and storage pilot in a mature field / P. Chen, S. Bose, A. Selveindran, G. Thakur // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2023. – V. 124. – 103858.
19. Understanding initial opportunities and key challenges for CCUS deployment in India at scale / V. Vishal, D. Chandra, U. Singh, Y. Verma // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – V. 175. – 105829.
20. Improvement of borehole and casing assessment of CO₂-EOR/CCUS injection and production well candidates in Sukowati Field, Indonesia in a well-based scale / B.T.H. Marbun, D. Santoso, W.G.A. Kadir, A. Wibowo, P. Suardana, H. Prabowo, D. Susilo, D. Sasongko, S.Z. Sinaga, B.A. Purbantunu, J.M. Palilu, R. Sule // Energy Reports. – 2021. – V. 7. – P. 1598–1615.
21. Rakhiemah A.N., Xu Y. Economic viability of full-chain CCUS-EOR in Indonesia // Resources, Conservation and Recycling. – 2022. – V. 179. – 106069.
22. Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia / S. Bazhenov, V. Chuboksarov, A. Maximov, O. Zhdanov // Sustainable Materials and Technologies. – 2022. – V. 33. – e00452.
23. Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. The HydroGeo software package and its usage // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – 04005, 6 p.
24. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2002. – Т. 305. – Вып. 6. – С. 348–365.
25. Питцер К.С. Термодинамическая модель плотных водных растворов // Термодинамическое моделирование в геологии (минералы, флюиды, расплавы). – М.: Мир, 1992. – С. 110–153.
26. Пригожин И., Дефэй Р. Химическая термодинамика. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1966. – 509 с.
27. Геологическая эволюция и самоорганизация системы водопорода. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / под ред. С.Л. Шварцева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
28. Вараксина И.В., Иванова Н.А. Литолого-фациальная характеристика и коллекторский потенциал осинского продуктивного горизонта Большетирского месторождения (Восточная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 54–63.
29. Вараксина И.В., Хабаров Е.М. Литология карбонатных продуктивных горизонтов венда центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2015. – № 3 (23). – С. 54–62.
30. Вараксина И.В., Хабаров Е.М. Обстановки седиментации и постседиментационные изменения рифейских карбонатных отложений Куюмбинского месторождения // Геология нефти и газа. – 2000. – № 1. – С. 28–36.
31. Гидрогеохимия венда Сибирской платформы / Д.А. Новиков, А.В. Черных, Л.Н. Константинова, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 8. – С. 1081–1101.
32. Геохимия рассолов и нефтепроявлений кимберлитовой трубки Удачная (Сибирская платформа) / Д.А. Новиков, А.В. Ильин, В.А. Каширцев, А.В. Черных, А.Н. Пыряев, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 2. – С. 197–218.
33. Новые данные по изотопному составу (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, $^{87}Rb/^{86}Sr$ и $^{87}Sr/^{86}Sr$) рассолов Сибирской платформы / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Ильин, Е.О. Чертовских // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 20–33.
34. CO₂ sequestration in feldspar-rich sandstone: coupled evolution of fluid chemistry, mineral reaction rates, and hydrogeochemical properties / B.M. Tutolo, A.J. Luhmann, X.Z. Kong, M.O. Saar, W.E. Jr. Seyfried // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2015. – V. 160. – P. 132–154.
35. André L., Audigane P., Azaroual M. Numerical modeling of fluid-rock chemical interactions at the supercritical CO₂-liquid interface during CO₂ injection into a carbonate reservoir, the Dogger aquifer (Paris Basin, France) // Energy conversion and management. – 2007. – V. 48. – № 6. – P. 1782–1797.
36. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts / B.P. McGrail, H.T. Schaef, A.M. Ho, Y.-J. Chein, J.J. Dooley, C.L. Davidson // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2006. – T. 111. – № B12.
37. Espinoza D.N., Santamarina J.C. Water-CO₂-mineral systems: interfacial tension, contact angle, and diffusion – implications to CO₂ geological storage // Water resources research. – 2010. – V. 46. – № 7. – 10 p.
38. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity / R. Shukla, P. Ranjith, A. Haque, X. Choi // Fuel. – 2010. – V. 89. – Iss. 10. – P. 2651–2664.

Поступила: 03.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 11.04.2023 г.

Информация об авторах

Никитенков А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; старший научный сотрудник геолого-геофизического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Максимова А.А., инженер лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Пенигин А.В., руководитель по разработке продуктов газовых МУН и декарбонизации, ООО «Газпромнефть НТЦ».

Вараксина И.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Жуковская Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий эксперт по седиментологии терригенных коллекторов, ООО «Газпромнефть НТЦ».

UDC 651.263:622.691.24

ON THE POSSIBILITY OF IMPLEMENTING CCS PROJECTS IN THE CARBONATE RESERVOIRS OF THE SIBERIAN PLATFORM

Alexey N. Nikitenkov^{1,2},
sputnik70@yandex.ru

Dmitry A. Novikov^{3,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Anastasia A. Maksimova^{2,3},
rock.nastaya64@gmail.com

Artem V. Penigin⁴,
Penigin.AV@gazpromneft-ntc.ru

Irina V. Varaksina³,
VaraksinalV@ipgg.sbras.ru

Elena A. Zhukovskaya⁴,
Zhukovskaya.EA@gazpromneft-ntc.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

⁴ OOO Gazpromneft NTC,
75–79, letter D, river Moika embankment, St. Petersburg, 190000, Russia.

The relevance. Carbon capture utilization and storage technology involving geological storage of carbon dioxide in deep aquifers is widely used in the world as this technology is aimed at decreasing the emission of greenhouse gases into the Earth's atmosphere and minimizing the influence of these gases on the global climate change.

Objective: to carry out preliminary investigation of the features of water – rock – carbon dioxide interactions in application to carbonate collectors, which are widespread in hydrogeological basins over the territory of the Russian Federation and are potentially suitable as carbon dioxide storage facilities. These processes are considered by the example of the ancient Siberian Platform, where industrial production of hydrocarbons is currently increasing, and a series of large-scale projects in the area of petroleum and gas chemistry are under implementation.

Methods. Mathematical physical and chemical modeling was applied to solve the problem. The calculations were implemented by the HydroGeo software package, in which the achievement of chemical equilibria for the «water–rock» system is implemented on the basis of the method of equilibrium constants.

Results. The obtained results allow us to evaluate the directions of geochemical processes in the collectors under consideration and to provide qualitative estimation of changes in the pore space under the conditions of its saturation with carbon dioxide, with respect to different saturation degrees. It is established that solution acidification is observed as a result of its saturation with CO₂, with the transition of chemical elements to the prevailing forms of complex ions bound with hydrocarbonate and chloride ions (Mn, Na, K). At the same time, saturation with carbon dioxide does not have so substantial effect on the forms of Ca and Fe migration. Special attention is attracted to Al, which is transformed almost completely from complex forms into Al³⁺ in the presence of carbon dioxide. In the studied reference samples, rather intense transformation of collector rocks with redistribution of elements between the primary and secondary mineral phases is observed (both rock dissolution and precipitation up to several hundred g/dm³) with comparatively small absolute changes in open porosity. In a series of the considered objects, the dissolution of calcite and dolomite proceeds due to a decrease in pH. The directions of transformations, as well as the trend of changes in filtration-capacity properties, are determined by the specific mineralogical combination of collector rocks and the brine present in them, as well as by the stage of evolution of the system under consideration (the first part of the considered combinations is initially far from the equilibrium and continues interacting, while the second part is close to the equilibrium and is transformed into non-equilibrium state due to saturation with carbon dioxide).

Key words:

CCUS technology, physical and chemical modeling, water–rock–gas interaction, saturation coefficient, migration patterns of chemical elements, carbonate collector, Siberian Platform.

Field work was carried out with the financial support of projects of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. FWZZ-2022-0014, Novosibirsk State University under the program Priority-2030.

REFERENCES

- Wallen K.H., Bas Ch., Bjerkstrom A. *Uglekislý gaz v atmosfere* [Carbon dioxide in the atmosphere]. Translated from English. Eds. V. Bakh, A. Kreyon, A. Berge, A. Longetto. Moscow, Nauka Publ., 1987. 534 p.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Yurchik I.I., Sadykova Ya.V., Derkach A.S., Chernykh A.V., Maksimova A.A., Golovin S.V., Glavnov N.G., Zhukovskaya E.A. Regional forecast of the outlooks for underground disposal of carbon dioxide at the territory of the Russian Federation. *Oil-industry*, 2022, no. 3, pp. 36–42. In Rus.
- Shi Z., Sun L., Haljasmaa I., Harbert W., Sanguinito S., Tkach M., Goodman A., Tsotsis T.T., Jessen K. Impact of Brine/CO₂ exposure on the transport and mechanical properties of the Mt Simon sandstone. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 177, pp. 295–305.
- Ochu E.R., Friedmann S.J. CCUS in a net-zero U.S. power sector: policy design, rates, and project finance. *The Electricity Journal*, 2021, vol. 34, Iss. 7, 107000.
- Cavanagh A., Ringrose P. Improving oil recovery and enabling CCS: a comparison of offshore gas-recycling in Europe to CCUS in North America. *Energy Procedia*, 2014, vol. 63, pp. 7677–7684.

6. Mourits F., Kulichenko-Lotz N., González G.H., Nieta J.M. Overview of world bank CCUS program activities in Mexico. *Energy Procedia*, 2017, vol. 114, pp. 5916–5932.
7. Rodrigues H.W.L., Mackay E.J., Arnold D.P. Multi-objective optimization of CO₂ recycling operations for CCUS in pre-salt carbonate reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, vol. 119, 103719.
8. Leonzio G., Bogle D., Foscolo P.U., Zondervan E. Optimization of CCUS supply chains in the UK: a strategic role for emissions reduction. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, vol. 155, pp. 211–228.
9. Suicmez V.S. Feasibility study for carbon capture utilization and storage (CCUS) in the Danish North Sea. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, vol. 68, 102924.
10. Leonzio G., Foscolo P.U., Zondervan E. An outlook towards 2030: optimization and design of a CCUS supply chain in Germany. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, vol. 125, pp. 499–513.
11. Vulin D., Močilac I.K., Jukić L., Amaut M., Vodopić F., Saftić B., Sedlar D.K., Cvetković M. Development of CCUS clusters in Croatia. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, vol. 124, 103857.
12. Li J. Accelerate the offshore CCUS to carbon-neutral China. *Fundamental Research*, 2022.
13. Wang X., Tang R., Meng M., Su T. Research on CCUS business model and policy incentives for coal-fired power plants in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, vol. 125, 103871.
14. Tang H., Chen W., Zhang S., Zhang Q. China's multi-sector-shared CCUS networks in a carbon-neutral vision. *iScience*, 2023, vol. 26, Iss. 4, 106347.
15. Han J., Li J., Tang X., Wang L., Yang X., Ge Z., Yuan F. Coal-fired power plant CCUS project comprehensive benefit evaluation and forecasting model study. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 385, 135657.
16. Kouri S., Tsupari E., Kärki J., Teir S., Sormunen R., Arponen T., Tuomaala M. The potential for CCUS in selected industrial sectors – summary of concept evaluations in Finland. *Energy Procedia*, 2017, vol. 114, pp. 6418–6431.
17. Kawai E., Ozawa A., Leibowicz B.D. Role of carbon capture and utilization (CCU) for decarbonization of industrial sector: a case study of Japan. *Applied Energy*, 2022, vol. 328, article 120183.
18. Chen P., Bose S., Selveindran A., Thakur G. Application of CCUS in India: Designing a CO₂ EOR and storage pilot in a mature field. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, vol. 124, 103858.
19. Vishal V., Chandra D., Singh U., Verma Y. Understanding initial opportunities and key challenges for CCUS deployment in India at scale. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 175, 105829.
20. Marbun B.T.H., Santoso D., Kadir W.G.A., Wibowo A., Suardana P., Prabowo H., Susilo D., Sasongko D., Sinaga S.Z., Purbantunu B.A., Palilu J.M., Sule R. Improvement of borehole and casing assessment of CO₂-EOR/CCUS injection and production well candidates in Sukowati Field, Indonesia in a well-based scale. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 1598–1615.
21. Rakhiemah A.N., Xu Y. Economic viability of full-chain CCUS-EOR in Indonesia. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 179, 106069.
22. Bazhenov S., Chuboksarov V., Maximov A., Zhdanov O. Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia. *Sustainable Materials and Technologies*, 2022, vol. 33, e00452.
23. Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. The HydroGeo software package and its usage. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, 04005, 6 p.
24. Bukaty M.B. Development of software for solving hydrogeological problems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2002, vol. 305, no. 6, pp. 348–365. In Rus.
25. Pitzer K.S. Termodinamicheskaya model plotnykh vodnykh rastvorov [Thermodynamic model of dense aqueous solutions]. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geologii (mineraly, flyuidy, rasplavy)* [Thermodynamic modeling in geology (minerals, fluids, melts)]. Moscow, Mir Publ., 1992. pp. 110–153.
26. Prigozhin I., Defay R. *Khimicheskaya termodinamika* [Chemical thermodynamics]. Novosibirsk, Naura Publ., SB RAS, 1966. 509 p.
27. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda. T. 1. Sistema voda-poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [Geological evolution and self-organization of the water-rock system. Vo. 1. Water-rock system in the Earth's crust: interaction, kinetics, equilibrium, modeling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2005. 244 p.
28. Varaksina I.V., Ivanova N.A. Lithofacial characteristic and petroleum potential of the Osinsky productive horizon of the Bolshetirsk deposit (Eastern Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 54–63. In Rus.
29. Varaksina I.V., Khabarov E. M. Lithology of vendian carbonaceous producing horizons in the central part of the Nepa-Botuba anticline. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2015, no. 3 (23), pp. 54–62. In Rus.
30. Varaksina I.V., Khabarov E. M. Sedimentation environments and post-sedimentary changes in Riphean carbonate deposits of the Kuyumba field. *Russian Oil and Gas Geology*, 2000, no. 1, pp. 28–36. In Rus.
31. Novikov D.A., Chemykh A.V., Konstantinova L.N., Dultsev F.F., Yurchik I.I. Vendian hydrogeochemistry of the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 8, pp. 1081–1101. In Rus.
32. Novikov D.A., Ilin A.V., Kashitsev V.A., Chemykh A.V., Pyrayev A.N., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Zueva I.N., Chalya O.N. Geochemistry of brines and oil occurrences in the Udachnaya Kimberlite Pipe (Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 2, pp. 197–218. In Rus.
33. Novikov D.A., Pyrayev A.N., Chemykh A.V., Dultsev F.F., Ilyin A.V., Chertovskikh E.O. New data on the isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of the Siberian platform brines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 20–33. In Rus.
34. Tutolo B.M., Luhmann A.J., Kong X.Z., Saar M.O., Seyfried Jr. W.E. CO₂ sequestration in feldspar-rich sandstone: coupled evolution of fluid chemistry, mineral reaction rates, and hydrogeochemical properties. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2015, vol. 160, pp. 132–154.
35. André L., Audigane P., Azaroual M. Numerical modeling of fluid-rock chemical interactions at the supercritical CO₂-liquid interface during CO₂ injection into a carbonate reservoir, the Dogger aquifer (Paris Basin, France). *Energy conversion and management*, 2007, vol. 48, no. 6, pp. 1782–1797.
36. McGrail B.P., Schaeff H.T., Ho A.M., Chein Y.-J., Dooley J.J., Davidson C.L. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, vol. 111, no. B12.
37. Espinoza D. N., Santamarina J. C. Water-CO₂-mineral systems: Interfacial tension, contact angle, and diffusion – Implications to CO₂ geological storage. *Water resources research*, 2010, vol. 46, no. 7, 10 p.
38. Shukla R., Ranjith P., Haque A., Choi X. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity. *Fuel*, 2010, vol. 89, Iss. 10, pp. 2651–2664.

Received: 3 April 2023.

Reviewed: 11 April 2023.

Information about the authors

Alexey N. Nikitenkov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University; senior researcher, Novosibirsk State University.

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Anastasia A. Maksimova, assistant, Novosibirsk State University; engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Artem V. Penigin, head of development of Gas EOR and Decarbonization Products, ООО «Gazpromneft NTC».

Irina V. Varaksina, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Elena A. Zhukovskaya, Cand. Sc., leading expert on Sedimentology of Terrigenous Reservoirs, ООО «Gazpromneft NTC».

УДК 66.04:677.678

ПЕРЕРАБОТКА ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПИРОЛИЗА АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Бухаркина Татьяна Владимировна¹,
tvb_53@mail.ru

Вержичинская Светлана Владимировна¹,
verzhichinskaia.s.v@muctr.ru

Тарханова Ирина Геннадиевна²,
itar_msu@mail.ru

Коновалов Алексей Владимирович³,
alkon@catalisator.com

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., 9.

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1-3.

³ Компания «Gercelia Limited»,
Кипр, 1086, Никосия, Agioi Omologites, Rodou, 6.

Актуальность. Переработка шин способствует поддержанию экологической обстановки за счет экономически выгодной утилизации больших объемов покрышек, вышедших из эксплуатации, кроме того, это возможность получать ценные химические продукты без использования природных ресурсов как основных источников исходных реагентов.

Цель: определить и предложить направления переработки автомобильных шин и твердого остатка их пиролиза в зависимости от их вида и качества.

Объекты: автомобильные шины отечественного и зарубежного производства; продукты пиролиза и их последующего облагораживания различных автомобильных шин.

Методы: технический анализ твердых углеродсодержащих материалов – метод Эшка, йодометрия для определения йодного числа, определение влажности и pH водной суспензии, определение зольности, выхода летучих веществ и коэффициента светопропускания толуольного экстракта.

Результаты. Выявлено, что исследуемый твердый остаток пиролиза с полученными показателями его качества можно использовать как наполнитель резиновой смеси или адсорбент тяжелых нефтепродуктов, а также разработана схема, в которой отражены пути переработки твердого остатка пиролиза, получаемого в результате утилизации легковых и грузовых шин различных отечественных и зарубежных производителей. Полученный результат работы, в частности, зависимость направления переработки твердого остатка пиролиза автомобильных шин различных производителей от его качественных показателей, может служить теоретической основой для разработки единой программы утилизации автомобильных покрышек с целью сохранения и улучшения экологической обстановки в различных регионах.

Ключевые слова:

пиролиз, технический углерод, утилизация, изношенные шины, низкачественный углерод.

Введение

На протяжении последних десятилетий постоянно возрастает производство автомобильных шин. Общемировые запасы изношенных шин составляют примерно 25 млн т и с каждым годом непрерывно увеличиваются [1, 2].

Из этого количества только 23 % находят свое применение в качестве ценного вторичного исходного сырья для производства материальных и энергетических ресурсов, пользующихся спросом на рынке. Остальные 77 % автомобильных шин никак не утилизируются и вывозятся на полигоны. Складирование и хранение на открытых мусорных полигонах недопустимо [3, 4], так как органические полимерные отходы, к которым относятся автомобильные покрышки, могут выделять с течением времени токсичные вещества, которые будут нарушать экологическую обстановку. Однако сам полимерный материал, из которого они сделаны, не претерпевает каких-либо значи-

тельных структурных и химических изменений. Данный факт обуславливает возможность их вторичной переработки с получением промышленно важных сырьевых материалов [5–7]. Поэтому перед обществом в целях сохранения экологического равновесия стоит задача эффективной утилизации резинотехнических изделий с получением ценного вторичного сырья, и наибольший интерес в этом плане представляет твердый остаток пиролиза (ТОП).

Обзорная часть

Качество получаемого углеродистого остатка может определяться условиями переработки или химического состава перерабатываемой автомобильной покрышки. Автомобильная шина – это сложное многослойное изделие, состоящее из нескольких частей [8–10]: каркас, выполненный из прорезиненного текстильного корда; брекер – специальный пояс из прорезиненного корда или металлокорда (латуняруемый

провод); протектор – толстая резина, обеспечивающая износостойкость шины и защищающая каркас; боковина покрышки – небольшой резиновый слой, дополнительно защищающий каркас покрышки от влаги и механических повреждений; борта – часть, которая состоит из бортового стального кольца и усилительных лент.

Такое сложное строение шины обеспечивает плавность и безопасность движения, проходимость в определенных дорожных условиях, сцепление с дорожным покрытием, поэтому в ее производстве может применяться до 200 различных ценных сырьевых веществ и материалов [11–17]:

- сера, полисульфидные соединения, нитросоединения – вулканизирующие вещества, необходимые для превращения резиновой смеси в высокоэластичную резину;
- сульфенамид, каптакс, тиазол – ускорители/активаторы вулканизации или ее замедлители (фталевый ангидрид, бензойная кислота);
- технический углерод марок N-339, N-330, N-220 и окись цинка, относящиеся к активным наполнителям, повышают прочность и истираемость шин, а тальк и мел – неактивные наполнители, вводятся для уменьшения количества каучука. Что касается активных наполнителей, то согласно ГОСТ 7885-86 применяется технический углерод только специальных марок [18], свойства которого будут обеспечивать заданные эксплуатационные свойства получаемой резины;
- нефтяные масла, канифоль, углеводородные смолы, вазелин технический – пластификаторы – способствуют равномерному распределению ингредиентов;
- ингибиторы окисления химически (альдол, диафен) или физически (парафин, защитный воск) замедляют процесс старения резин;
- соли кобальта, полиэтилен, белая сажа – модификаторы – улучшают качество вулканизата;
- неозон Д, охра, ультрамарин – красители – задерживают озоновое и световое старение;
- прочие – корд, который в зависимости от материала может быть вискозным, полиамидным, стекло- или металлокордом.

В общем случае смесь синтетических и натуральных каучуков составляет 40–50 масс. %, ингредиенты вулканизата – 15–45 масс. %, корд – 15–35 масс. % [19, 20]. Несмотря на то, что процентное соотношение по массе между основными компонентами автомобильной шины может разниться и зависеть от условий её использования, очевидно, что элементный состав шины будет включать все основные элементы – С 80 %, Н 7 %, N 0,4 %, S 1,5 %, О 3 % и 8 % золы [21]. Преобладание в элементном составе шины углеродсодержащих компонентов предполагает химические пути ее утилизации, связанные с повышением доли углерода в продуктах переработки.

Существующие химические методы переработки автомобильных шин [22–24] являются наиболее эффективными, поскольку в процессе происходит необ-

ратимая деструкция полимерного органического материала резины и входящих в неё ингредиентов. Самым перспективным, экологическим и экономически выгодным способом из химических методов переработки автомобильных шин является метод пиролиза. Его можно проводить используя разные технологические приемы, такие как температурный режим [25], аппаратное оформление [26, 27], методы подвода тепла в систему [19, 28], использование водяного пара [29], озона [30] или СВЧ-излучения [31]. Кроме того, данный процесс даёт возможность использовать полученные продукты для выделения индивидуальных веществ [32] или в качестве вторичного сырья [33, 34], в частности твердого углеродистого остатка [35, 36].

ТОП, полученный методом пиролиза, представляет собой черный с сероватым оттенком жирный на ощупь порошок. Получается он в количестве 40–50 % от массы перерабатываемой покрышки. Исследование элементного состава ТОП [37] показало, что в составе твердого остатка содержится более 83 % углерода, более 8 % кислорода и около 9 % других элементов (S, Si, Zn, Al, Ca, Mo), что не позволяет без дополнительной обработки возвращать его в качестве вторичного исходного сырья – наполнителя – в шину или использовать как высокоактивный сорбент.

В настоящее время существует множество способов вторичной переработки твердого углеродистого остатка пиролиза. Наличие этих методов переработки дает возможность не только сохранить экологическую обстановку регионов, но и эффективно использовать полученный углеродистый остаток для различных нужд промышленности в целом.

В результате масляной агломерации в несколько раз уменьшается зольность и сернистость масляных агрегатов с ТОП [38], однако повышается влажность, что не является существенным недостатком метода, так как гранулированные агрегаты можно использовать в качестве водоуглеродного или композитного топлива [39].

При прокаливании ТОП выше 550 °C наблюдается интенсификация реакций ароматизации и полициклизации с выделением парогазовых продуктов, содержащих в своем составе гетероатомы. Термическая деструкция различных соединений твердого углеродистого остатка пиролиза протекает аналогично термической деструкции высокомолекулярных соединений. Отличие заключается в анизотропной структуре перерабатываемого твердого продукта. При достижении температуры происходит уплотнение и упорядочение кристаллических слоев углеродистого остатка, также наблюдается усадка и интенсивное газообразование [40]. В результате метода высокотемпературной обработки исчезает неприятный запах, очищаются поры и цилиндрические отверстия на поверхности углеродистого остатка. Недостатком данной технологии является высокий показатель зольности обогащенного твердого остатка пиролиза, сопоставимый с исходным образцом.

Обработка перегретым водяным паром ТОП до 40 % от исходной массы снижает количество загряз-

няющих веществ [41]. Получаемый обогащенный остаток имеет хрупкую структуру и абсолютно не имеет неприятного запаха за счет очистки пор от различных химических соединений. Кроме того, введение водяного пара на этапе пиролиза автомобильных шин улучшит разложение сырья и поддержит температурный режим этого процесса в целом.

Для придания адсорбционных свойств твердому остатку пиролиза проводят модификацию его поверхности анионными неионогенными поверхностно-активными веществами, повышая ее гидрофильность [42, 43].

Твердый углеродистый остаток после пиролиза или гигротермии можно использовать так же, как и технический углерод [18]: в качестве сорбирующих материалов, армирующих компонентов резин или добавок к порошковым краскам. Возможно и собственное применение обогащенного ТОП как сорбента для очистки сточных вод и газовых потоков от нефтепродуктов и органических веществ, как сырья

для производства активных углей. В любом случае изменение адсорбционных свойств ТОП является перспективным и экономически выгодным.

Следующим шагом в оценке пригодности твердого остатка пиролиза является выявление зависимости качества ТОП от химического состава перерабатываемой автомобильной покрышки.

Для получения автомобильных шин, способных функционировать в заданных условиях их использования, разрабатываются специальные рецептуры резиновых смесей для каждого структурного элемента (брекер, протектор, боковина и др.) будущего резинотехнического изделия. Технологические свойства получаемых резин зависят от используемого типа полимера [44], активного наполнителя, а также других используемых компонентов резиновой смеси [45, 46]. Принципиальный состав и свойства протекторных резин легковых шин основных отечественных и зарубежных фирм представлены в табл. 1, 2 [47–49].

Таблица 1. Принципиальный состав и свойства протекторных резин легковых шин основных зарубежных фирм [47–49]

Table 1. Principal composition and properties of tread rubbers of passenger tires of major foreign companies [47–49]

Размер шины Tire size	175/70 R13	175/65 R14	195/65 R15	195/65 R15	205/65 R15	195/65 R15	185/60 R14	195/65 R15	195/65 R15
Фирма Firm	Пирелли Pirelli	Континенталь Continental	Йокогама Yokohama	Гудйер Goodyear	Мишлен Michlin	Фулда Fulda	Бриджстоун Bridgestone	Пирелли Pirelli	Данлоп Danlop
Категория скорости* Speed category*	T	T	T	H	H	T	H	H	H
Краткий состав резин, масс. %/Brief composition of rubber, wt. %									
Полимер: БСК** Polymer: SBR**	100					80	90	80	90
ПБ/PBR	–					20	–	–	–
ПИ/SNR	–					–	10	20	10
ТУ/CB	87	94,5	58,1	67,7	27,9	81,1	81,5	10,3	69,1
SiO ₂	–	–	18,3	14,4	60,4	–	29,6	66,2	12
Ацетоновый экстракт Acetone extract	51	51,2	29,6	36	14,7	51,3	56,6	36,8	41,4
Физико-механические свойства резин/Physical and mechanical properties of rubbers									
Твердость, усл. ед. Hardness, conventional units	74	73	69	66	70	65	63	65	64
Эластичность, % Elasticity, %	19	21	30	19	24	27	19	24	18
Истираемость, см ³ /м10 ^{–3} Abrasion, cm ³ /m10 ^{–3}	2,27	2,17	1,80	1,75	1,89	1,35	1,99	1,91	2,28

*Категория скорости: стандартные – T (190 км/ч) и H (210 км/ч); **БСК – бутадиенстирольный каучук; ПБ – полибутадиен; ПИ – полиизопрен; ТУ – технический углерод.

*Speed category: standard – T (190 km/h) and H (210 km/h); **SBR – styrene-butadiene rubber; PBR – polybutadiene; SNR – polyisoprene; CB – carbon black.

Анализируя данные табл. 1, 2, можно заметить, что полимерная основа при изготовлении покрышек за рубежом и в нашей стране несколько отличается друг от друга, в свою очередь шины с различными категориями скорости также различаются между собой. Различная природа модифицирующих добавок и их соотношение непосредственно влияют на основные продукты, получаемые в ходе утилизации резинотехнического изделия. Так, твердый остаток пиролиза автомобильной шины, содержащей в качестве активного наполнителя диоксид кремния, будет обладать повышенной

зольностью (Бриджстоун, Пирелли, Мишлен, шины отечественного производства ОАО «МШЗ», «КШЗ», «Волтайр»). Для дальнейшего использования ТОП, получаемого из покрышек этих производителей, в качестве вторичного исходного сырья необходимо будет вовлекать его в процесс масляной агломерации для удаления зольных примесей.

Процентный состав вулканизирующих добавок в составе резиновой смеси для изготовления протектора шины также напрямую влияет на качество получаемого твердого остатка и, соответственно, его переработку.

Таблица 2. Принципиальный состав и свойства протекторных резин легковых шин основных отечественных фирм [47–49]

Table 2. Principal composition and properties of tread rubbers of passenger tires of major domestic companies [47–49]

Размер шины Tire size	185/65 R14	185/60 R14	195/65 R15	195/65 R15	205/70 R15
Фирма Firm	ОАО «ЯШЗ» Yaroslavl Tire Plant	ОАО «НкШЗ» Nizhnekamsk Tire Plant	ОАО «МШЗ» Moscow Tire Plant	ОАО «КШЗ» Kirov Tire Plant	ОАО «ВолгаТир» Volzhsky Tire Plant
Категория скорости* Speed category*	T	H	T	T	T
Краткий состав резин, мас. %/Brief composition of rubber, wt. %					
Каучуки**: БСК (СКС) Rubbers**: SBR (SBS)	83	100	85	80	83
ПБ (СКД) PBR (BR)	17	–	15	12	17
ПИ (СКИ) SNR (IPR)	–	–	–	8	–
ТУ (N-220) CB (N-220)	82	64	50	64	45
SiO ₂	–	–	30	22	15
Содержание серы Sulfur content	2,2	2,4	1,9	1,7	1,7
Ацетоновый экстракт Acetone extract	19,4	16,2	25,4	14,56	23,2

*Категория скорости: стандартные – T (190 км/ч) и H (210 км/ч); **СКС – синтетический каучук стирольный; СКД – бутадиеновый каучук; СКИ – изопреновый каучук; ТУ – технический углерод.

*Speed category: standard – T (190 km/h) and H (210 km/h); **SBS – synthetic styrene-butadiene rubber; BR – butadiene rubber; IPR – isoprene rubber; CB – carbon black.

Таблица 3. Состав и свойства резин грузовых и легковых шин радиальной конструкции по данным лаборатории «Смизерс» [50, 51]

Table 3. Composition and properties of rubbers of truck and passenger tires of radial design according to Smithers laboratory [50, 51]

Показатели/Indicators	Грузовые/Truck				Легковые/Passenger			
НК*, мас. % Natural rubber, wt. %	55	50	50	40	70	45	40	50
БСК* без масла, мас. % Styrene-butadiene rubber oil free, wt. %	–	–	10	20	–	–	–	15
1-4 полибутадиен, мас. % 1-4 polybutadiene, wt. %	45	50	40	40	30	55	60	35
Вещества, экстрагир. ацетоном, масс. % Acetone extract, wt. %	9,7	13	11	8	16	23	13	17
Сер, мас. % Sulfur content, wt. %	2,0	2,1	2,0	1,6	2,5	2,3	2,4	2,8
Оксид цинка, мас. % Zinc oxide, wt. %	3,0	3,4	4,5	2,7	2,8	3,1	2,5	3,3
ТУ***, мас. % Carbon Black, wt. %	48	48	44	45	52	45	50	45
Твердость, усл. ед. Hardness, conventional units.	63	60	63	62	60	58	64	58
Условное напрж. при удлин. 300 %, МПа Modulus at 300 %, MPa	10,5	7,4	8,5	5,8	6,7	5,7	9,4	6,3
Условная прочность при растяжении, МПа Conditional tensile strength, MPa	23	21	19,7	20,7	17,6	16,9	17,9	19
Относительное удлинение, % Relative extension, %	552	600	536	500	584	600	460	610
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,10	1,10	1,10	1,11	1,10	1,09	1,11	1,10

*НК – натуральный каучук; **БСК – бутадиенстирольный каучук; ***ТУ – технический углерод.

Высокоскоростные шины ОАО «НкШЗ», ОАО «ЯШЗ» и зарубежные покрышки производителей Фулда, Йокогама и Континенталь содержат в своем составе большее количество серосодержащих ингредиентов, обуславливающее высокую сернистость получаемого твердого продукта в процессе пиролиза этих типов шин, что после соответствующей обработки (водяным паром или термическим прокаливанием) позволяет использовать этот остаток, например, в качестве наполнителя резиновой смеси.

Грузовые и легковые шины отличаются друг от друга областью применения и поверхностью, на которой сосредоточен основной их функционал. Таким образом, химический состав грузовых и легковых шин независимо от производителя будет отличаться друг от друга (табл. 3) [50, 51].

Из данных табл. 3 видно, что для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик грузовой шины необходимо использовать в качестве полимерной основы преимущественно бутилкаучук или БСК, обладающие повышенной теплостойкостью и износостойкостью. В свою очередь резина легковых автомобильных шин должна обладать высоким коэффициентом трения, повышенным сцеплением с мокрой дорогой. Вышеупомянутые характеристики достигаются с использованием в качестве полимерной основы СКИ и СКД каучуков, обладающих низкими значениями теплостойкости, но повышенной стойкости к истиранию, динамической выносливости и когезионной прочности [52, 53].

Анализируя состав каучуков, можно отметить, что СКД и СКИ имеют низкое значение теплостойкости, в сравнении с БСК, поэтому при переработке легковых шин методом пиролиза будут разлагаться СКД и СКИ с образованием линейных алифатических фрагментов макромолекул каучука с образованием легких парогазовых продуктов, а при утилизации грузовых шин при более высоких температурах пиролиза будет происходить термодеструкция БСК в виде более тяжелых парогазовых продуктов, содержащих ароматическое кольцо [25].

В состав грузовых шин также входит большее количество минеральной примеси диоксида кремния, используемого в качестве активного наполнителя, что обуславливает образование твердого остатка с высокой зольностью. В составе легковых шин используется большее количество серосодержащих компонентов (бензотиазольные ускорители, модификаторы и т. д.), что приводит к загрязнению углеродного продукта пиролиза циклическими гетеромолекулами с высокой молекулярной массой. Получаемая структура, дисперсность, а следовательно, и удельная поверхность ТОП зависят от протекания процесса пиролиза и его технологических параметров, а также от используемой марки технического углерода. Если использовать в качестве наполнителя канальную сажу, то ТОП будет обладать высокой дисперсностью и структурностью, а если применять в составе резиновых смесей технический углерод, получаемый термическим раз-

ложением природного газа, ТОП будет получаться с низким показателем дисперсности и структурности [54–56] соответственно. Кроме того, при утилизации грузовых покрышек и среднескоростных шин отечественных производителей и зарубежных фирм (Мишлен, Бриджстоун, Пирелли) методом пиролиза остаток будет получаться с высоким содержанием золы, что позволит после соответствующей переработки (масляная агломерация) использовать его в качестве сорбента или же наполнителя резиновой смеси.

Так, на основании анализа информации, представленной в работе, и данных о химическом составе автомобильных покрышек различных производителей можно предложить примерную схему переработки шин, в которой отражены пути переработки ТОП в различные химические продукты, получаемые при утилизации легковых или грузовых шин каждого из отечественных и зарубежных производителей (рисунок).

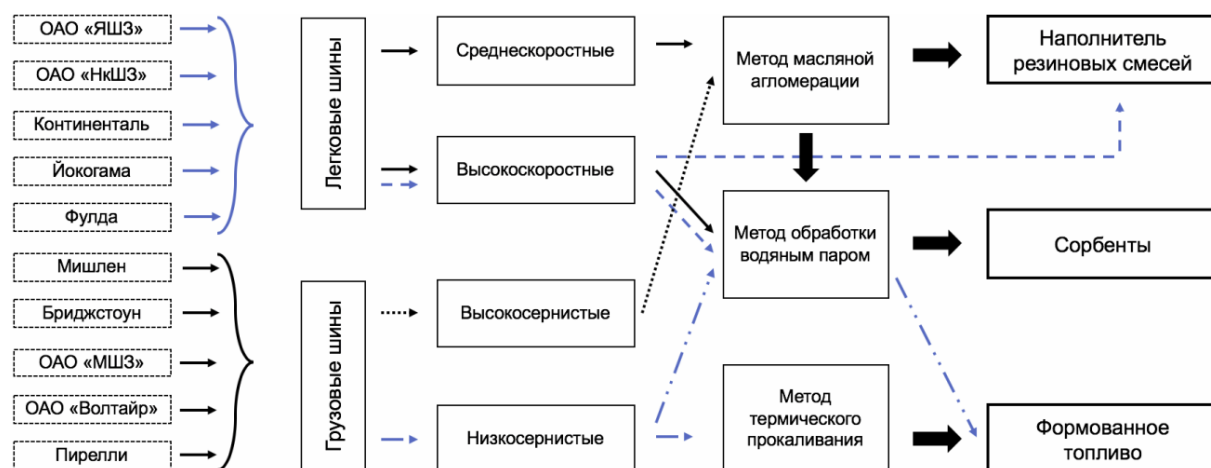


Рисунок. Направления переработки твердого остатка пиролиза легковых и грузовых шин различных производителей
Figure. Directions for processing solid residues from the pyrolysis of passenger and truck tires from various manufacturers

Для изготовления различных видов автомобильных покрышек, работающих в разнообразных условиях эксплуатации, применяются материалы разной природы в соответствующем соотношении друг с другом. Состав резиновой смеси и получаемая структура автомобильной покрышки влияют на качество получаемых продуктов в ходе ее утилизации, в частности, при переработке автомобильной шины методом пиролиза. Зная, какие материалы и в каком соотношении были использованы при производстве автомобильной шины, можно ожидать определенные значения показателей качества твердого углеродного остатка пиролиза, а следовательно, выявлять направление его переработки.

Методическая часть

Для материалов с повышенным содержанием углерода качество оценивается по сумме характеристик твердого углеродистого остатка. Показатели качества целесообразно разделить на три группы, характеризующие:

1) минеральные составляющие и примеси – содержание общей серы, зольность, pH, коэффициент светопропускания толуольного экстракта;

2) поверхность и дисперсность материала – йодное число, влажность;
3) термическую устойчивость и кристаллическую структуру – выход летучих веществ.

Как правило, твердый остаток пиролиза получается низкокачественным, о чем свидетельствуют, например, высокие показатели содержания серы и зольности и низкие показатели, характеризующие удельную поверхность получаемого продукта.

В работе определялись следующие показатели качества твердых углеродных материалов:

- йодная адсорбция (йодное число IAN по ГОСТ ISO 1304-2013), характеризующая поверхность углеродного материала, которая обычно соответствует поверхности, определяемой по адсорбции азота с учетом шероховатости вследствие наложения слоев друг на друга [57];
- коэффициент светопропускания толуольного экстракта по ГОСТ ISO 1125-2018, показывающий химическую активность материала. Чем ниже коэффициент светопропускания, тем больше в материале веществ, экстрагируемых толуолом. Общепринятым техническим требованием является показатель 85 [58];

- влажность материала по ГОСТ ISO 1126-2018 [59];
- pH водной суспензии по ГОСТ 25699.6-90, определяющий меру кислотности образующейся водной суспензии исследуемого образца углерода. Общепринятым техническим требованием является pH водной суспензии в пределах от 6 до 9 [60];
- зольность по ГОСТ ISO 1125-2018, характеризующая количество минеральных компонентов (зола) в исследуемом образце углерода [61];
- выход летучих веществ по ГОСТ Р 55660-2013, соответствующий термической устойчивости образца углерода [62];
- содержание серы по ГОСТ ISO 1138-2013. Общепринятым техническим требованием является содержание общей серы на уровне 1,5 % [63].

Экспериментальная часть

Для определения влияния способа переработки на качество ТОП были взяты: твердый остаток пиролиза – образец № 1 – ТОП и остаток, прошедший обработку водяным паром – образец № 2 – ТОПпар. Для получения образца № 1 была взята случайная выборка изношенных шин, предназначенных для утилизации. Физико-химические характеристики такой смеси резин можно считать усредненными и приближенными к параметрам резин фирм Continental, Goodyear, Yokohama и Bridgestone, представленных в табл. 1. Как образец для сравнения был взят технический углерод марки Т-900 с известной кристаллической структурой и характеристиками качества, представленными в ГОСТ 7885-86, используемый как наполнитель при изготовлении резиновой смеси [18] – образец № 3. Технический углерод марки Т-900 используется в качестве активного наполнителя резиновых смесей реже, чем другие виды сажи, поэтому углеродный материал похожей структуры, но с лучшими характеристиками, позволит использовать его в компонентной рецептуре сырья для производства резины.

В табл. 4 представлены результаты анализа образцов на влажность и величину удельной поверхности образца. Данные табл. 4 показывают, что остаток, полученный в ходе переработки шины, имеет большую удельную поверхность, чем наполнитель Т-900, входящий в состав резиновой смеси, что связано с протеканием химических превращений в процессе пиролиза, которые сначала приводят к увеличению функциональных групп, а затем – к их удалению, что способствует увеличению поверхности данного углеродного материала. Высокое йодное число остатка пиролиза, прошедшего обработку водяным паром, говорит о достаточно развитой внутренней и внешней удельной поверхности образца за счет освобождения микро- и мезопор от различных соединений.

На основании йодного числа также можно охарактеризовать размеры частиц твердого остатка пиролиза. Высокое йодное число ТОП и ТОПпар по сравнению с образцом технического углерода марки Т-900 свидетельствует об их высокой дисперсности. Однако сопоставление с ГОСТ № 7885-86 позволяет утверждать, что размер частиц у ТОПпар меньше, чем у

высокодисперсной канальной сажи (≈ 30 нм), так как ее йодное число в 2,5 раза меньше этого же показателя исследуемого материала. Следовательно, можно предположить, что средний диаметр частиц ТОП после обработки водяным паром составляет около 10–15 нм.

Таблица 4. Показатели качества твердых остатков пиролиза автомобильных шин: поверхность и дисперсность анализируемых образцов

Table 4. Quality indicators of solid residues of car tire pyrolysis: surface and dispersion of analyzed samples

Образец Simple	Йодное число (IAN), мг I ₂ /100 г Iodine number (IAN), mgI ₂ /100 g	Влажность (W ^a), % Moisture (W ^a), %
ТОП Solid residue of pyrolysis (SRP)	103	1,21
ТОПпар SRP steam treatment	344	1,18
Т-900* Carbon Black Т-900*	17	0,07

* – Полученные результаты в ходе различных экспериментов по определению основных качественных характеристик технического углерода марки Т-900 соответствуют справочным данным других источников, а также ГОСТ «Технические требования к ТУ при производстве резины» № 7885-86. Таким образом, все полученные величины показателей качества твердого остатка пиролиза отвечают требованиям прецизионности.

* – The results obtained in the course of various experiments to determine the main qualitative characteristics of carbon black grade Т-900 correspond to reference data from other sources, as well as to SS «Technical requirements for specifications in the production of rubber» no. 7885-86. Thus, all the obtained values of the quality indicators of the solid residue of pyrolysis meet the requirements of precision.

В процессе пиролиза автомобильной шины термические процессы вызывают появление пор на поверхности углеродистого остатка, а также функциональных групп, которые образуются за счет взаимодействия ТОП с компонентами резины. Данный факт объясняет высокий показатель влажности, по сравнению с исходным наполнителем. Некоторое снижение влажности образца после его обработки водяным паром связано с уменьшением функциональных групп на поверхности остатка.

В табл. 5 представлены результаты анализа образцов на различные примеси. Щелочная среда водной суспензии исследуемых образцов объясняется минеральными компонентами, входящими в состав ТОП. Увеличение pH в процессе обработки водяным паром связано с частичным удалением зольных примесей, а также веществ с поверхности остатка, имеющих кислую реакцию.

Согласно источнику [18] технический углерод марки Т-900 не загрязнен никакими ароматическими гетероатомными соединениями, имеет более низкую удельную поверхность, что влечет за собой высокий

показатель коэффициента светопропускания – показателя химической инертности твердого вещества – 99. Коэффициенты светопропускания толуольного экстракта близки для ТОП и ТОПпар и в 5 раз меньше, чем для Т-900. Их низкая химическая активность обусловлена присутствием соединений серы на поверхности углеродного остатка, а также образованием в ходе термического процесса утилизации автомобильных шин ароматических соединений, адсорбирующихся на поверхности получаемого твердого продукта пиролиза.

Таблица 5. Показатели качества твердых остатков пиролиза автомобильных шин: минеральные составляющие, примеси, термическая устойчивость и структура анализируемых образцов

Table 5. Quality indicators of solid residues of car tire pyrolysis: mineral constituents, impurities, thermal stability and structure of analyzed samples

Образец Simple	pH водной суспензии aqueous suspension pH	Коэффициент светопропускания толуольного экстракта (Т) Toluene extract	Зольность (А ^б) Ash content	Содержание общей серы (S _{общ}) Sulfur content	Выход летучих веществ (V ^{лет}) Volatile matter yield
ТОП Solid residue of pyrolysis (SRP)	7,3	25	19,9	3,1	4,66
ТОПпар SRP steam treatment	7,8	20	17,6	2,9	3,75
Т-900* Carbon Black Т-900*	7,9	99	0,08	0,14	1,2

* – Полученные результаты в ходе различных экспериментов по определению основных качественных характеристик технического углерода марки Т-900 соответствуют справочным данным других источников, а также ГОСТ «Технические требования к ТУ при производстве резины» № 7885-86. Таким образом, все полученные величины показателей качества твердого остатка пиролиза отвечают требованиям прецизионности.

* – The results obtained in the course of various experiments to determine the main qualitative characteristics of carbon black grade Т-900 correspond to reference data from other sources, as well as to SS «Technical requirements for specifications in the production of rubber» no. 7885-86. Thus, all the obtained values of the quality indicators of the solid residue of pyrolysis meet the requirements of precision.

Что касается результатов определения зольности и выхода летучих веществ исследуемых образцов, они также связаны с химическими и физическими преобразованиями в ходе пиролиза и методом переработки полученного продукта, что согласуется с данными работ [64–68]. В ходе процесса пиролиза в остатке происходит концентрирование минеральных компонентов, что связано с использованием в качестве вулканизирующих веществ и альтернативных наполни-

телей в рецептуре резиновой смеси оксидов ZnO и CaCO₃.

Значительное количество термически неустойчивых веществ, таких как каучуки, ингибиторы и активаторы, подвергающихся в ходе высокотемпературной обработки термической деструкции, объясняет повышенное выделение летучих веществ из остатков пиролиза по сравнению с сажей. Анализируя показатель выхода летучих веществ каучуков (~10–12 % [69]) и полученного твердого остатка (3–4 %), можно подтвердить тот факт, что в процессе пиролиза автомобильной покрышки происходит переход гибридации атомов углерода из sp³ в sp², что влечет за собой изменение структуры материала.

Результаты определения одного из важнейших показателей, характеризующих качество углеродного материала, – содержание общей серы – для остатков пиролиза не соответствуют нормам. Технический углерод марки Т-900 содержит ~0,14 % серы, что согласуется с методикой его получения и используемыми реагентами в ходе производства. Содержание серы в ТОП (~3,1 %) обусловлено высоким содержанием серы в автомобильной шине и ее превращением в ходе термической обработки. Сернистые мостиковые связи, являющиеся пространственными межмолекулярными связями единой макромолекулярной полимерной структуры материала, в ходе процесса подвергаются деструкции и переходят в гетероатомные соединения и низкомолекулярные продукты, наличие которых в составе материала объясняет высокий показатель содержания серы. Уменьшение исследуемой качественной характеристики (~2,9 %) связано с химическим взаимодействием водяного пара и соединений, содержащих в своем составе атомы S, что в свою очередь при высокой температуре вызывает их удаление с поверхности ТОП.

Заключение

Обобщая полученные результаты, можно сказать, что ТОП до и после обработки водяным паром содержит много серы и минеральных компонентов, поскольку сырье и условия его получения и обработки не позволяют удалять все примеси. Обработка паром способствует увеличению IAN и уменьшению влажности, что связано с химическим взаимодействием материала с горячим водяным паром, вызывающее уменьшение размера частиц и удаление функциональных групп, приводящее к уменьшению влажности. Высокодисперсный остаток обладает развитой поверхностью и соответственно малым диаметром частиц, что влечет за собой образование первичных агрегатов и вторичных ассоциативных монодисперсных структур, что увеличивает удельную поверхность материала. При этом выход низкий летучих веществ получаемых остатков после пиролиза автомобильных шин говорит о том, что материал, состоящий на 83 мас. % из углерода, обладает кристаллической структурой и достаточно устойчив к термическому воздействию.

Используя метод пиролиза как способ утилизации автомобильных шин, можно получить материал с вы-

соким содержанием углерода, развитой кристаллической структурой, с размером частиц даже меньшим, чем у канальной сажи. Однако худшие показатели по сравнению с образцом Т-900 не позволяют использовать его в компонентной рецептуре сырья для производства резины для автомобильных шин. С другой стороны, этот материал можно использовать в качестве наполнителя неответственных резиновых смесей или же в качестве сорбента тяжелых нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова А.В. Рынок утилизации отходов. Национальный исследовательский университет. Высшая школа экономики // Dcenter. – 2018. URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/07/11/1151608260/%D0%A0%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%202018.pdf> (дата обращения 25.01.2022).
2. Weber B. Gefährden Altreifen die Gesundheit? // EU-Recycling – Das Fachmagazin für den europäischen Recyclingmarkt. – 2018. – V. 35. – № 12. – S. 20.
3. Иванков С.И., Шубов Л.Я., Скобелев К.Д. Проблемы переработки некоторых видов крупнотоннажных отходов производства и пути их решения // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. Обзорная информация. – 2020. – № 6. – С. 94–121.
4. Leung D.Y.C., Wang C.L. Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 1998. – V. 45. – P. 153–169.
5. Станок для резки шин на ленту: пат. Рос. Федерация, № 2710680, заявл. 10.06.2019; опубл. 10.01.2020. Бюл. № 1. – 6 с.
6. Нересян М.А. Перспективы использования резиновой крошки в строительстве лесных дорог // Журнал передовых исследований в области естественных наук. – 2020. – № 9. – С. 54–56.
7. Иванов С.А., Шабая С.Н., Тюрюханов К.Ю. Утилизация резиновой крошки путем производства модифицированного битума // Инженерный вестник Дона. – 2022. – Т. 93. – № 9. – С. 143–160.
8. Острцов А.В., Красавин П.А., Воронин В.В. Шины и колеса для автомобилей и тракторов. – М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2011. – 85 с.
9. Дьяченко В.Н. Автомобильные шины. – Луганск: Изд-во ГБОУ СПО ЛНР «Луганский колледж автосервиса», 2016. – 20 с.
10. Автолукс // Avtoluxx. 2021. URL: https://avtoluxx.ru/info-roshinam/structure_tires.html (дата обращения 25.01.2022)
11. Кельмялене А.А., Марченко Н.И., Дутчак Н.Н. Специальность «Резино-техническое производство», квалификация «Техник-технолог». – Нур-Султан: Некоммерческое акционерное общество «Talar», 2020. – 304 с.
12. Спиридонова М.П. Эластомерные материалы, содержащие молекулярные комплексы и комплексные соединения с ϵ -капролактамом: дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 2019. – 352 с.
13. Нагорная М.Н. Окислительная модификация технического углерода и его влияние на свойства резины на основе бутылкаучука: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2019. – 113 с.
14. Наполнитель для шин на основе резиновых акриловых гидрогелей: пат. Рос. Федерация, № 2712594, заявл. 13.09.2019; опубл. 29.01.2020. Бюл. № 4. – 17 с.
15. Williams P.T. Pyrolysis of waste tyres: a review // Waste Management. – 2013. – V. 33. – № 8. – P. 1714–1728.
16. Williams P.T., Besler S. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components // Fuel. – 1995. – V. 74. – № 9. – P. 1277–1283.
17. Kyari M., Cunliffe A., Williams P.T. Characterization of oils, gases, and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tyres // Energy Fuel. – 2005. – V. 9. – № 3. – P. 1165–1173.
18. ГОСТ 7885-86. Углерод технический для производства резины. Технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 27 с.
19. Новичков Ю.А. Повышение экологической безопасности рециклинга автотракторных шин: дис. ... канд. тех. наук. – Макеевка, 2018. – 171 с.
20. Покрышка пневматической шины 12.00 P20 нормой слоистости 18: пат. Рос. Федерация, № 195305, заявл. 08.08.2019; опубл. 22.01.2020. Бюл. № 3. – 9 с.
21. Попов А.Ю. Пиролиз – альтернативный метод утилизации шин // Инноватика в современном мире: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. – Уфа: ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2019. – С. 73–77.
22. Моисеев Р.Е. Анализ отечественных методов переработки резинотехнических отходов // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. – 2010. – № 5-2. – С. 196–200.
23. Distillation of granulated scrap tires in a pilot plant / F.A. López, T.A. Centeno, F.J. Alguacil, B. Lobato // J. Hazard Mater. – 2011. – V. 190. – № 1. – P. 285–292.
24. Waste tyre pyrolysis – a review / J.D. Martínez, N. Puy, R. Murillo, T. García, M.V. Navarro, A.M. Mastral // Renew. Sust. Energ. Rev. – 2013. – V. 23. – P. 179–213.
25. Адсорбент из твердого остатка пиролиза изношенных шин / А.А. Мухутдинов, Г.В. Минхайдарова, Э.А. Мухутдинов, А.А. Акаева // Экология и промышленность России. – 2005. – № 2. – С. 37–39.
26. Чудинов С.Ю., Красновских М.П., Кетов А.А. Переработка отходов в жидкие топлива медленным пиролизом под давлением // Химия. Экология. Урбанистика. – 2022. – № 1. – С. 131–136.
27. Disposal of toxic materials: European Patent Office, EP1013992A3, Fil. 13.12.1999, Publ. A3: 28.03.2001.
28. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г. Энергосберегающая технология пирогенетической переработки изношенных автошин на светлые продукты // Теория и практика модернизации научной деятельности в условиях цифровизации: Международная научно-практическая конференция. – Стерлитамак: Международный центр инновационных исследований, 2020. – С. 50–52.
29. Булавин А.В., Пашкевич В.П. Переработка отработанных автомобильных шин методом низкотемпературного пиролиза // Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів: Матеріали конференції. – Донецьк: ДНТУ, 2004. – С. 91–94.
30. Bozhenko A., Repin M. The efficient methods of used tires recycling // Iscience.in.ua «Actual scientific research in the modern world». – Kyiv, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2020. – P. 41–44.
31. Yatsun A.V., Kononov P.N. Microwave pyrolysis of Scrap tires in the presence of Potassium Hydroxide // Technical Sciences. – 2016. – № 6. – С. 83–91.
32. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis / M.F. Laresgoiti, B.M. Caballero, I. de Marco, A. Torres, M.A. Cabrero, M.J. Chomón // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2004. – V. 71. – P. 917–934.
33. Characterization of pyrolytic oil obtained from pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel) / M. Banar, V. Akyildiz, A. Ozkan, Z. Cokaygil, O. Onay // Energy Conversion and Management. – 2012. – V. 62. – P. 22–30.
34. Cunliffe A.M., Williams P.T. Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 1998. – V. 44. – P. 131–152.
35. Tire pyrolysis char: processes, properties, upgrading and applications / N. Gao, F. Wang, Cui Quan, L. Santamaria, G. Lopez, P.T. Williams // Progress in Energy and Combustion Science. – 2022. – V. 93. – P. 1–37.
36. Production mechanism of high-quality carbon black from high-temperature pyrolysis of waste tire / Hao Jiang, Jing'ai Shao, Youjian Zhu, Jie Yu, Wei Cheng, Haiping Yang, Xiong Zhang, Hanping Chen // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – V. 443. – P. 1–13.
37. Дудникова Ю.Н., Касьянова О.В. Исследования элементного состава и морфологии поверхности углеродистого твердого остатка пиролиза вышедших из употребления резинотехниче-

- ских изделий // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: IV Всероссийская конференция. – Кемерово: КузГТУ, 2018. – С. 305.1–305.5.
38. Технология переработки твердого остатка пиролиза автошин в формованное топливо / А.В. Папин, А.Ю. Игнатова, А.В. Неверов, К.А. Шканова // Ползуновский вестник. – 2015. – № 2. – С. 106–110.
39. Получение композиционного топлива на основе технического углерода пиролиза автошин / А.В. Папин, А.Ю. Игнатова, Е.А. Макаревич, А.В. Неведров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 3 (109). – С. 107–114.
40. Способ обогащения твердого остатка пиролиза автошин: пат. Рос. Федерация, № 2679263, заявл. 28.05.2018; опубл. 06.02.2019. Бюл. № 4. – 1 с.
41. Семендяев В.В. Очистка твердого остатка пиролиза автомобильных шин при помощи перегретого пара // Международный научный журнал: Молодой ученый. – 2018. – № 23 (209). – С. 226–227. URL: <https://moluch.ru/archive/209/51324/> (дата обращения: 22.01.2022).
42. Спивакова Л.Г., Касьянова О.В. Модификация твердого остатка пиролиза растворами ПАВ // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: IV Всероссийская конференция. – Кемерово: КузГТУ, 2018. – С. 311.1–311.5.
43. Мухутдинов А.А., Акмаева А.А. Применение ТОП для сорбции нефти с поверхности воды // Экология и промышленность России. – 2007. – № 12. – С. 40–41.
44. Shulman V.L. Tyre recycling, Rapra review reports // Rapra Review Reports. – 2004. – V. 15. – № 7. – P. 144.
45. Application of coal conversion technology to tire processing / A.M. Mastral, R. Murillo, M.S. Callén, T. Garcia // Fuel Processing Technology. – 1999. – V. 60. – P. 231–242.
46. Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydropyrolysis in a swept fixed bed reactor / A.M. Mastral, R. Murillo, M.S. Callén, T. Garcia, C.E. Snape // Energy Fuel. – 2000. – V. 14. – P. 739–744.
47. Сравнительный анализ состава и свойств резин и армирующих материалов для легковых шин различных фирм-производителей / Г.А. Низашвили, Т.В. Титова, Т.И. Андрианова, И.Л. Шмурак, А.М. Пичугин // Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии: XIV Международная практическая конференция. – М.: ООО «НИЦ «НИИШП», 2008. – С. 42.
48. Гришина Б.С., Власова Г.Я. Тематический обзор: основные направления рецептуростроения резин для легковых шин. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1996. – 173 с.
49. Priss L.S., Shumskaya A.G. Mechanical losses in rubbers under loading conditions typical of tires in service // Tire Science and Technology. – 1988. – V. 16 (3). – P. 171–186.
50. Влияние режима нагружения на зависимость сопротивления качению легковых шин от гистерезисных потерь протекторных резин / А.М. Пичугин, С.А. Трофимов, А.Г. Шварц, С.А. Щередин // Каучук и резина. – 1985. – № 9. – С. 24–27.
51. Третьяков О.Б., Арутюнян Г.В. Тематический обзор: Механизм взаимодействия шины с дорогой и пути повышения износостойкости шин. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1979. – 58 с.
52. Schuring D.J., Futamura Sh. Rolling loss of pneumatik highway tires in the eighties // Rubber Chemistry and Technology. – 1990. – V. 63. – № 3. – P. 315–367.
53. Свойства шинных резин с цинкосодержащими технологическими добавками / С.Н. Каюшников, Н.Р. Прокопчук, Е.П. Усс, О.В. Карманова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – Т. 79. – № 3 (73). – С. 126–135.
54. Жарова Т.Э. Потребление материалов и энергоресурсов в шинной промышленности Японии // Каучук и резина. – 1981. – № 5. – С. 41–43.
55. Kholghy M.R., Veshkini A., Thomson M.J. The core-shell internal nanostructure of soot – a criterion to model soot maturity // Carbon. – 2016. – V. 100. – P. 508–536.
56. Effects of several types of biomass fuels on the yield, nanostructure and reactivity of soot from fast pyrolysis at high temperatures / A. Trubetskaya, P.A. Jensen, A.D. Jensen, A.D.G. Llamas, K. Umeki, D. Gardini, J. Kling, R.B. Bates, P. Glarborg // Appl. Energ. – 2016. – V. 171. – P. 468–482.
57. ГОСТ ISO 1304-2013. Ингредиенты резиновой смеси. Углерод технический. Определение числа адсорбции йода. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
58. ГОСТ ISO 1125-2018. Ингредиенты резиновой смеси. Технический углерод. Определение коэффициента светопропускания толуольного экстракта. – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.
59. ГОСТ ISO 1126-2018. Ингредиенты резиновой смеси. Технический углерод. Метод определения потерь при нагревании. – М.: Стандартинформ, 2018. – 7 с.
60. ГОСТ 25699.6-90. Углерод технический для производства резины. Метод определения pH водной суспензии. – М.: Государственный стандарт союза ССР, 1990. – 4 с.
61. ГОСТ ISO 1125-2018. Ингредиенты резиновой смеси. Технический углерод. Определение золы. – М.: Стандартинформ, 2018. – 7 с.
62. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение содержания летучих веществ. – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
63. ГОСТ ISO 1138-2013. Ингредиенты резиновой смеси. Углерод технический. Определение содержания общей серы. – М.: Стандартинформ, 2014. – 11 с.
64. Physical and chemical characteristics of the carbon material obtained by the pyrolysis of rubber-technical products / Sh.T. Juraev, B.F. Mukhiddinov, A.S. Ibadullayev, O.I. Isroilov // International scientific review of the technical sciences, mathematics and computer science. Collection of scientific articles XIV International correspondence scientific specialized conference. – Boston, USA, 2020. – P. 36–40.
65. Grytsenko A., Vnukova N., Pozdniakova Ye. Estimation of possibility of tyre utilization products usage as alternative fuel // Automobile transport. – 2015. – V. 36. – P. 42–47.
66. Fernández A.M., Barriocanal C., Alvarez R. Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres // J. Hazard Mater. – 2012. – V. 203–204. – P. 236–243.
67. A potential utilization of end-of-life tyres as recycled carbon black in EPDM rubber / M. Sagar, K. Nibedita, N. Manohar, K.R. Kumar, S. Suchismita, A. Pradnyesh, A.B. Reddy, E.R. Sadiku, U.N. Gupta, P. Lachit, J. Jayaramudu // Waste Manag. – 2018. – V. 74. – P. 110–122.
68. Removal of impurities from waste tire pyrolysis char using the molten salt thermal treatment / H. Tang, H. Hu, A. Li, B. Yi, X. Li, D. Yao, H. Yao, H. Yuan // Fuel. – 2021. – V. 301. – article 121019.
69. ГОСТ ISO 248-96. Каучук. Определение содержания летучих веществ. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 8 с.

Поступила: 10.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 27.02.2023 г.

Информация об авторах

Бухаркина Т.В., доктор химических наук, профессор кафедры химической технологии природных энергоносителей и углеродных материалов Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева.

Вержичинская С.В., кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии природных энергоносителей и углеродных материалов Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева.

Тарханова И.Г., доктор химических наук, ведущий научный сотрудник кафедры химической кинетики химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Коновалов А.В., кандидат физико-математических наук, директор, компания «Gercelia Limited».

UDC 553.98:551.763:550.836

RECYCLING OF SOLID RESIDUE OF PYROLYSIS OF CAR TIRES

Tatiana V. Bukharkina¹,
tvb_53@mail.ru

Svetlana V. Verzhichinskaya¹,
verzhichinskaia.s.v@muctr.ru

Irina G. Tarkhanova²,
itar_msu@mail.ru

Alexey V. Konovalov³,
alkon@catalisator.com

¹ Mendeleev University of Chemical Technology,
9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russia.

² Lomonosov State University,
1, GSP-1, 1-3, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.

³ «Gercelia Limited» company,
6, Rodou, Agioi Omologites, Nicosia, 1086, Cyprus.

The relevance. Tire recycling contributes to the environmental situation due to the cost-effective disposal of large volumes of tires out of service, in addition, it is an opportunity to obtain valuable chemical products without using natural resources as the main sources of initial reagents.

The main aim of the research is to identify and propose directions for processing car tires and the solid residue of their pyrolysis, depending on their type and quality.

Objects: automobile tires of domestic and foreign production; pyrolysis products and their subsequent refinement of various car tires.

Methods: technical analysis of solid carbon-containing materials – Eschka method, iodometry for determining the iodine number, determination of moisture and pH of an aqueous suspension, ash content, volatile matter, light transmission coefficient of a toluene extract.

Results. It was revealed that the solid pyrolysis residue studied in the work with the obtained indicators of its quality can be used as a filler in the rubber mixture or as a sorbent for heavy oil products, and a scheme was developed that reflects the ways of processing the solid pyrolysis residue obtained as a result of the disposal of passenger cars and truck tires of various domestic and foreign manufacturers. The result of the work, in particular, the dependence of the direction of processing the solid residue of the pyrolysis of car tires from various manufacturers on its quality indicators, can serve as a theoretical basis for developing a unified program for recycling car tires in order to preserve and improve the environmental situation in various regions.

Key words:

pyrolysis, carbon black, recycling, worn tires, low-quality carbon.

REFERENCES

- Volkova A.V. Waste disposal market. National Research University. High School of Economics. Dcenter, 2018. Available at: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/07/11/1151608260/%D0%A0%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%202018.pdf> (accessed 25 January 2022).
- Weber B. Do scrap tires endanger health? *EU-Recycling – The trade magazine for the European recycling market*, 2018, vol. 35, no. 12, pp. 20. In Germ.
- Ivanov S.I., Shubov L.Ya., Skobelev K.D. Problemy pererabotki nekotorykh vidov krupnotonnazhnykh otkhodov proizvodstva i puti ikh resheniya [Problems of processing some types of large-tonnage production waste and ways to solve them]. *Scientific and technical aspects of environmental protection. Overview information*, 2020, no. 2, pp. 94–121.
- Leung D.Y.C., Wang C.L. Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1998, vol. 45, pp. 153–169.
- Blagodarov Y.P. Stanok dlya rezki shin na lentu [Machine for cutting tires into tape]. Patent RF, no. 2710680, 2020.
- Nersesyan M.A. Prospects for the use of rubber crumb in the construction of forest roads. *Journal of Advanced Research in Natural Science*, 2020, no. 9, pp. 54–56. In Rus.
- Ivanov S.A., Shabaev S.N., Tyuryukhanov K.Yu. Utilizatsiya rezinovoy kroshki putem proizvodstva modifitsirovannogo bituma [Utilization of rubber crumb by the production of modified bitumen]. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022, vol. 93, no. 9, pp. 143–160.
- Ostretsov A.V., Krasavin P.A. Shiny i kolesa dlya avtomobiley i traktorov [Tires and wheels for cars and tractors]. Moscow, MG TU «MAMI» Publ., 2011. 85 p.
- Dyachenko V.N. *Avtomobilnye shiny* [Car tires]. Lugansk, GBOU SPO LNR «Lugansk car service college» Publ., 2016. 20 p.
- Avtoluxx. 2021. Available at: https://avtoluxx.ru/info-poshinam/structure_tires.html (accessed 25 January 2022).
- Kelmyalene A.A., Marchenko N.I., Dutchak N.N. *Spetsialnost «Rezino-tehnicheskoe proizvodstvo», kvalifikatsiya «Tekhnicheskolog»* [Specialty «Rubber-technical production», qualification «Technologist-technologist»]. Nur-Sultan, Talap Publ., 2020. 304 p.
- Spiridonova M.P. *Elastomernye materialy, sodержashchie molekulyarnye komplekсы i kompleksnye soedineniya s ε-kaprolaktamom*. Diss. Dokt. nauk [Elastomeric materials containing molecular complexes and complex compounds with ε-caprolactam. Dr. Diss.]. Volgograd, 2019. 352 p.
- Nagornaya M.N. *Okislitel'naya modifikatsiya tekhnicheskogo ugleroda i ego vliyanie na svoystva reziny na osnove butilkauchuka*. Diss. Kand. nauk [Oxidative modification of carbon black and its effect on the properties of rubber based on butyl rubber. Cand. Diss.]. Omsk, 2019. 113 p.

14. Vilfrid K., Khaufe M. *Napolnitel dlya shin na osnove akrilovykh gidrogeley* [Vehicle filler for tires based on acrylic hydrogels]. Patent RF, no. 2712594, 2020.
15. Williams P.T. Pyrolysis of waste tyres: a review. *Waste Management*, 2013, vol. 33, no. 8, pp. 1714–1728.
16. Williams P.T., Besler S. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components. *Fuel*, 1995, vol. 74, no. 9, pp. 1277–1283.
17. Kyari M., Cunliffe A., Williams P.T. Characterization of oils, gases, and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires. *Energy Fuel*, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 1165–1173.
18. GOST 7885-86. *Uglerod tekhnicheskii dlya proizvodstva reziny. Tekhnicheskie usloviya*. [SS 7885-86. Carbon black for rubber industry. Specifications]. Moscow, StandardInform Publ., 2002. 27 p.
19. Novichkov Yu.A. *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti retsiklinga avtotraktorov shin*. Diss. Kand. nauk [Improving the environmental safety of automotive tire recycling. Cand. Diss.]. Makeevka, 2018. 171 p.
20. Sudyakov V.O. *Pokryshka pnevmaticheskoy shiny 12.00 P20 normoy sloynosti 18* [Pneumatic tire cover 12.00 Z20, ply rating 18]. Patent RF, no. 195305, 2020.
21. Popov A.Yu. *Piroliz – alternativniy metod utilizatsii shin* [Pyrolysis is an alternative method of tire recycling]. *Innovatika v sovremennom mire. Sbornik statey po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovation in the modern world. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference]. Ufa, Limited Liability Company «Scientific and Publishing Center "Herald of Science"», 2019. pp. 73–77.
22. Moiseev R.E. *Analiz otechestvennykh metodov pererabotki rezinotekhnicheskikh otkhodov* [Analysis of domestic methods of processing rubber waste]. *Sovremennye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyy vzglyad*, 2010, no. 5-2, pp. 196–200.
23. López F.A., Centeno T.A., Alguacil F.J., Lobato B. Distillation of granulated scrap tires in a pilot plant. *J. Hazard Mater.*, 2011, vol. 190, no. 1, pp. 285–292.
24. Martínez J.D., Puy N., Murillo R., García T., Navarro M.V., Mastral A.M. Waste tyre pyrolysis – a review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2013, vol. 23, pp. 179–213.
25. Mukhutdinov A.A., Minkhaidarova G.V., Mukhutdinov E.A., Akaeva A.A. Adsorbent iz tverdogo ostatka piroliza iznoshennykh shin [Adsorbent from the solid residue of the pyrolysis of used tires]. *Ekologiya i promishlennost*, 2005, no. 2, pp. 37–39.
26. Chudinov S.Yu., Krasnovskikh M.P., Ketov A.A. *Pererabotka otkhodov v zhidkie topliva medlennym pirolizom pod davleniem* [Waste processing into liquid fuels by slow pyrolysis under pressure]. *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2022, no. 1, pp. 131–136.
27. *Disposal of toxic materials*: European Patent Office, EP1013992A3, Fil. 13.12.1999, Publ. A3: 28.03.2001.
28. Taimarov M.A., Chiklyayev E.G. *Energoberegayushchaya tekhnologiya pirogenicheskoy pererabotki iznoshennykh avtoshin na svetlye produkty* [Energy-saving technology of pyrogenetic recycling of used tires for light products]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Teoriya i praktika modernizatsii nauchnoy deyatel'nosti v usloviyakh tsifrovizatsii* [International scientific and practical conference. Theory and practice of modernizing scientific activity in the context of digitalization]. Sterlitamak, International Center for Innovative Research Publ., 2020. pp. 50–52.
29. Bulavin A.V., Pashkevich V.P. *Pererabotka otrabotannykh avtomobilnykh shin metodom nizkotemperaturnogo piroliza* [Recycling of used car tires by low-temperature pyrolysis]. *Materialy konferentsii. Okhrana okruzhayushchey sredy i ratsionalnoe ispolzovanie prirodnnykh resursov* [Proceedings of the conference. Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources]. Donetsk, DNTU Publ., 2004. pp. 91–94.
30. Bozhenko A., Repin M. The efficient methods of used tires recycling. *Iscience.in.ua «Actual scientific research in the modern world»*. Kyiv, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2020. pp. 41–44.
31. Yatsun A.V., Konovalev P.N. Microwave pyrolysis of Scrap tires in the presence of Potassium Hydroxide. *Technical Sciences*, 2016, vol. 6, pp. 83–91.
32. Laresgoiti M.F., Caballero B.M., De Marco I., Torres A., Cabrero M.A., Chomón M.J. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, vol. 71, pp. 917–934.
33. Banar M., Akyıldız V., Ozkan A., Cokaygil Z., Onay O. Characterization of pyrolytic oil obtained from pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel). *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 62, pp. 22–30.
34. Cunliffe A.M., Williams P.T. Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres'. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1998, vol. 44, pp. 131–152.
35. Gao N., Wang F., Cui Quan, Santamaria L., Lopez G., Williams P.T. Tire pyrolysis char: processes, properties, upgrading and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2022, vol. 93, pp. 1–37.
36. Hao Jiang, Jing'ai Shao, Youjian Zhu, Jie Yu, Wei Cheng, Haiping Yang, Xiong Zhang, Hanping Chen Production mechanism of high-quality carbon black from high-temperature pyrolysis of waste tire. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 443, pp. 1–13.
37. Dudnikova Yu.N., Kasyanova O.V. *Issledovaniya elementnogo sostava i morfologii poverkhnosti uglerodistogo ostatka piroliza vyshedshykh iz upotrebleniya rezinotekhnicheskikh izdeliy* [Investigations of the elemental composition and surface morphology of the carbonaceous solid residue of pyrolysis of obsolete rubber products]. *IV Vserossiiskaya konferentsiya. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy* [IV All-Russian Conference. Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2018. pp. 305.1–305.5.
38. Papin A.V., Ignatova A.Yu., Neverov A.V., Shkanova K.A. *Tekhnologiya pererabotki tverdogo ostatka piroliza avtoshin v formovannoe toplivo* [Technology for processing solid residue of tire pyrolysis into molded fuel]. *Polzunovskii vestnik*, 2015, no. 2, pp. 106–110.
39. Papin A.V., Ignatova A.Yu., Makarevich E.A., Nevedrov A.E. *Poluchenie kompozitsionnogo topliva na osnove tekhnicheskogo ugleroda piroliza avtoshin* [Preparation of composite fuel-based carbon black pyrolysis of tires]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 107–114.
40. Papin A.V., Ignatova A.Yu., Cherkasova T.G., Makarevich E.A. *Sposob oblagorazhivania tverdogo ostatka piroliza avtoshin* [Method for refining the solid residue of car tire pyrolysis]. Patent RF, no. 2679263, 2019.
41. Semendyaev V.V. *Ochistka tverdogo ostatka piroliza avtomobilnykh shin pri pomoshchi peregretoyo para* [Purification of the solid residue of car tire pyrolysis using superheated steam]. *Mezhdunarodnii nauchnyi zhurnal: Molodoy ucheniy*, 2018, no. 23 (209), pp. 226–227. Available at: <https://moluch.ru/archive/209/51324/> (accessed: 22 January 2022).
42. Spivakova L.G., Kasyanova O.V. *Modifikatsiya tverdogo ostatka piroliza rastvorami PAV* [Modification of the solid residue of pyrolysis with surfactant solutions]. *IV Vserossiiskaya konferentsiya. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy* [IV All-Russian Conference. Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2018. pp. 311.1–311.5.
43. Mukhutdinov A.A., Akmaeva A.A. *Primenenie TOP dlya sorbtzii nef'ti s poverkhnosti vody* [The use of HOP for the sorption of oil from the surface of the water]. *Ekologiya i promishlennost Rossii*, 2007, no. 12, pp. 40–41.
44. Shulman V.L. Tyre recycling, Rapra review reports. *Rapra Review Reports*, 2004, vol. 15, no. 7, pp. 144.
45. Mastral A.M., Murillo R., Callén M.S., García T. Application of coal conversion technology to tire processing. *Fuel Processing Technology*, 1999, vol. 60, pp. 231–242.
46. Mastral A.M., Murillo R., Callén M.S., García T., Snape C.E. Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydropyrolysis in a swept fixed bed reactor. *Energy Fuel*, 2000, vol. 14, pp. 739–744.
47. Niazashvili G.A., Titova T.V., Andrianova T.I., Shmurak I.L., Pichugin A.M. *Sravnitelnyy analiz sostava i svoystva rezin i armiruyushchikh materialov dlya legkovykh shin razlichnykh firm-proizvoditeley* [Comparative analysis of the composition and properties of rubbers and reinforcing materials for passenger tires of various manufacturers]. *XIV Mezhdunarodnaya prakticheskaya konferentsiya. Rezinovaya promishlennost. Syrye. Materialy. Tekhnologii* [XIV international practical conference. Rubber

- industry. Raw material. Materials. Technologies]. Moscow, OOO «NITS «NIISHP» Publ., 2008. pp. 42.
48. Grishina B.S., Vlasova G.Ya. *Tematicheskiy obzor: osnovnyye napravleniya retsepturostroeniya rezin dlya legkovykh shin* [Thematic review: the main directions of rubber compounding for passenger tires]. Moscow, TSNITENeftekhim Publ., 1996. 173 p.
 49. Priss L.S., Shumskaya A.G. Mechanical losses in rubbers under loading conditions typical of tires in service. *Tire Science and Technology*, 1988, vol. 16 (3), pp. 171–186.
 50. Pichugin A.M., Trofimov S.A., Shvarts A.G., Shchedrin S.A. Vliyaniye rezhima nagruzheniya na zavisimost soprotivleniya kacheniyu kegovykh shin ot gisterezisnykh poter protekornykh rezin [Influence of the loading mode on the dependence of the rolling resistance of passenger tires on the hysteresis loss of tread rubber]. *Kauchuk i rezina*, 1985, no. 9, pp. 24–27.
 51. Tretyakov O.B., Arutunyan G.V. *Tematicheskiy obzor: mekhanizm vzaimodeystviya shiny s dorogoy i puti povysheniya iznosostoikosti shin* [Mechanism of tire-road interaction and ways to improve tire wear resistance]. Moscow, TSNITENeftekhim Publ., 1979. 58 p.
 52. Schuring D.J., Futamura Sh. Rolling loss of pneumatik highway tires in the eighties. *Rubber Chemistry and Technology*, 1990, vol. 63 (3), pp. 315–367.
 53. Kayushnikov S.N., Prokopchuk N.P., Uss S.N., Karmanova O.V. Properties of tire rubber with zinc-containing technological additives. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2017, vol. 79, no. 3 (73), pp. 126–135.
 54. Zharova T.E. Potrebleniye materialov i energoresursov v shinnoy promishlennosti Yaponii [Consumption of materials and energy in the tire industry in Japan]. *Kauchuk i rezina*, 1981, no. 5, pp. 41–43.
 55. Kholghy M.R., Veshkini A., Thomson M.J. The core-shell internal nanostructure of soot – a criterion to model soot maturity. *Carbon*, 2016, vol. 100, pp. 508–536.
 56. Trubetskaya A., Jensen P.A., Jensen A.D., Llamas A.D.G., Umeki K., Gardini D., Kling J., Bates R.B., Glarborg P. Effects of several types of biomass fuels on the yield, nanostructure and reactivity of soot from fast pyrolysis at high temperatures. *Appl. Energ.*, 2016, vol. 171, pp. 468–482.
 57. GOST 1304-2013. *Ingredienty rezinovoy smesi. Uglerod tekhnicheskoy. Opredeleniye chisla adsorbsii yoda* [SS 1304-2013. Rubber compounding ingredients. Carbon black. Determination of iodine adsorption number]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 16 p.
 58. GOST ISO 1125-2018. *Ingredienty rezinovoy smesi. Uglerod tekhnicheskoy. Opredeleniye koeffitsienta svetopropuskaniya toluolnogo ekstrakta* [SS 1125-2018. Rubber compounding ingredients. Carbon black. Determination of ash]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 8 p.
 59. GOST ISO 1126-2018. *Ingredienty rezinovoy smesi. Uglerod tekhnicheskoy. Metod opredeleniya poter pri nagrevanii* [SS 1126-2018. Rubber compounding ingredients. Carbon black. Determination of loss on heating]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 7 p.
 60. GOST 25699.6-90. *Uglerod tekhnicheskoy dlya proizvodstva reziny. Metod opredeleniya pH vodnoy suspenzii* [SS 25699.6-90. Carbon black for rubber industry. Methods for determination of pH value]. Moscow, StandardInform Publ., 1990. 4 p.
 61. GOST ISO 1125-2018. *Ingredienty rezinovoy smesi. Uglerod tekhnicheskoy. Opredeleniye zoly* [State Standart 1125-2018. Rubber compounding ingredients. Carbon black. Determination of ash]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 7 p.
 62. GOST P 55660-2013. *Toplivo tverdoe mineralnoe. Opredeleniye soderzhaniya letuchikh veshchestv* [SS 55660-2013. Solid mineral fuel. Determination of the content of volatile substances]. Moscow, StandardInform Publ., 2019. 12 p.
 63. GOST ISO 1138-2013. *Ingredienty rezinovoy smesi. Uglerod tekhnicheskoy. Opredeleniye soderzhaniya sery* [SS 1138-2013. Rubber compound ingredients. Technical carbon. Determination of total sulfur content]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 11 p.
 64. Juraev Sh.T., Mukhiddinov B.F., Ibadullayev A.S., Isroilov O.I. Physical and chemical characteristics of the carbon material obtained by the pyrolysis of rubber-technical products. *International scientific review of the technical sciences, mathematics and computer science. Collection of scientific articles XIV International correspondence scientific specialized conference*. Boston, USA, 2020. pp. 36–40.
 65. Grytsenko A., Vnukova N., Pozdniakova Ye. Estimation of possibility of tyre utilization products usage as alternative fuel. *Automobile transport*, 2015, vol. 36, pp. 42–47.
 66. Fernández A.M., Barriocanal C., Alvarez R. Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres. *J. Hazard Mater.*, 2012, vol. 203–204, pp. 236–243.
 67. Sagar M., Nibedita K., Manohar N., Kumar K.R., Suchismita S., Pradnyesh A., Reddy A.B., Sadiku E.R., Gupta U.N., Lachit P., Jayaramudu J. A potential utilization of end-of-life tyres as recycled carbon black in EPDM rubber. *Waste Manag.*, 2018, vol. 74, pp. 110–122.
 68. Tang H., Hu H., Li A., Yi B., Li X., Yao D., Yao H., Yuan H. Removal of impurities from waste tire pyrolysis char using the molten salt thermal treatment. *Fuel*, 2021, vol. 301, article 121019.
 69. GOST 248-96. *Kauchuk. Opredeleniye soderzhaniya letuchikh veshchestv* [SS 248-96. Rubber. Determination of volatile matter content]. Moscow, StandardInform Publ., 1998. 8 p.

Received: 10 January 2023.

Reviewed: 27 February 2023.

Information about the authors

Tatiana V. Bukharkina, Dr. Sc., professor, Mendeleev University of Chemical Technology.

Svetlana V. Verzhichinskaya, Cand. Sc., associate professor, Mendeleev University of Chemical Technology.

Irina G. Tarkhanova, Dr.Sc., professor, Lomonosov State University.

Alexey V. Kononov, Cand. Sc., director, «Gercelia Limited» company.

УДК 622.24

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСИЙ БИОПОЛИМЕРОВ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ В СОСТАВЕ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Ламбин Анатолий Иванович¹,
alambin@ex.istu.edu

Аверкина Елена Владимировна¹,
averkina.l@yandex.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность. Биополимерные буровые растворы на водной основе получили достаточно широкое распространение в технологии строительства скважин на нефть и газ. Методам регулирования физико-механических свойств биополимерных систем уделяется большое внимание. В частности, большой практический интерес вызывают реологические свойства растворов на основе ксантановой камеди. Эффективность применения полимеров определяется количеством основного реагента и модифицирующих добавок, необходимых для придания промывочной жидкости требуемых свойств. Биополимерные водные буровые растворы на основе ксантановой камеди показали свою эффективность во многих регионах Российской Федерации. Однако оценка эффективности растворов затруднена из-за различия товарной продукции выпускающих компаний по растворимости, набуханию и составу, что сказывается на оптимизируемых показателях бурового раствора.

Цель: рассмотрение различия водных растворов ряда образцов ксантановой камеди по показателям степенной зависимости: K -коэффициенту консистенции и n -степени отклонения от ньютоновского режима течения исследования.

Объект: реология водных растворов нескольких образцов ксантана как чисто водных, так и на основании водных рассолов хлорида калия (KCl) и натрия (NaCl).

Методы: инструментальные методы определения параметров буровых растворов по ГОСТ 33213-2014; определялось различие параметров степенной реологической зависимости путем сравнения ее показателей после замеров вязкости растворов на вискозиметре с прямыми показаниями.

Результаты. Показано влияние фиксированной концентрации солей NaCl и KCl по рассматриваемым показателям степенной модели. Предложен обобщенный показатель оптимизации для растворов, подчиняющихся степенному реологическому закону. Представлена расчетная зависимость точности аппроксимации экспериментальных данных степенной моделью, которая показала приемлемую точность.

Ключевые слова:

биополимерные буровые растворы, ксантановая камедь, коэффициент консистенции, вязкостные свойства, натрий хлор, калий хлор, степенной реологический закон.

Введение

Изменение рецептур бурового раствора определяется различием горно-технических условий при современном строительстве скважин. Применение растворов полимеров на водной основе способствует повышению соответствия свойств буровых растворов условиям проходки скважин [1–5]. Улучшение условий проходки скважин вызывает необходимость регулирования реологических характеристик бурового раствора, осуществляемого введением в буровой раствор различного рода полимеров путем подбора их видов и концентрации, а также, при необходимости, путем изменения структуры мицелл, введением различных солей. Буровой раствор выполняет такие функции, как поддержание гидростатического давления, транспортирование и взвешивание бурового шлама. При этом он должен отвечать требованиям и нормам, разработанным специалистами для конкретных условий [6]. Соблюдение этих норм непосредственно на буровой несколько затруднено из-за изменения термобарических условий в скважине, что приводит к применению прогностических моделей.

Информация по буровым растворам в последние два десятилетия изобилует реологическими моделями как эмпирического, так и теоретического плана. Эти

модели отражают зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига при сдвиговом течении жидкости [7, 8]. Для технологий бурения наиболее часто применяются следующие реологические модели:

1. Ньютоновская жидкость: $\tau = \eta \left(-\frac{dv}{dr} \right)$;
2. Бингамовский пластик: $\tau = \tau_y + \eta_{pl} \left(-\frac{dv}{dr} \right)$;
3. Модель Освальда де Вейля: $\tau = K \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n$;
4. Модель Кассона: $\frac{1}{\tau^2} = \frac{1}{\tau_y^2} + \eta_{cas}^2 \left(-\frac{dv}{dr} \right)$;
5. Модель Гершеля–Балкли: $\tau = \tau_y + K \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n$,

где τ – касательное напряжение сдвига, Па; η – динамический коэффициент вязкости, Па·с; $\frac{dv}{dr}$ – производная скорости в направлении, перпендикулярном направлению сдвига, s^{-1} ; η_{pl} – пластическая вязкость мПа·с; K – коэффициент консистенции; n – индекс течения раствора (нелинейности).

Бингамовский пластик – наиболее ранняя модель, проста для расчета гидравлических сопротивлений,

но при высоких скоростях сдвига и при наличии в растворах полимеров модель содержит погрешность в описании закона сдвига [9]. С развитием компьютерных технологий появились другие, более сложные модели, позволяющие более точно отображать характер течения жидкости. Анализ литературных источников выделяет предпочтение степенной модели Оствальда де Вайля при определении реологических параметров для полимер содержащих жидкостей. В настоящее время составы буровых растворов изобилуют добавками полимеров различного рода, в частности, используются биополимеры, которые на 70–90 % определяют структурно-реологические свойства полисахаридных систем [10, 11].

При скоростях сдвига до $50\text{--}100\text{ с}^{-1}$ водные растворы различных камедей имеют вязкости, численные значения которых различаются между собой. Вязкость раствора ксантановой камеди при скорости сдвига свыше 100 с^{-1} быстро падает по сравнению с другими камедями [12]. При использовании биополимерных буровых растворов, относящихся к псевдопластическим жидкостям, лучшим показателем нелинейности, соответствующим наиболее оптимальным показателям технологии бурения, является показатель $n \leq 0,3$ [13–15].

Многочисленные лабораторные исследования и производственный опыт показали лучшую корреляцию показаний вискозиметра OFITE при 3 и 6 об/мин с оценкой качества очистки ствола скважины и способности бурового раствора удерживать его твердую фазу. Высокая вязкость водных растворов ксантановой камеди при низких скоростях сдвига предопределяет повышение стабильности коллоидной фракции буровых растворов на водной основе. При регулировании составов биополимерных буровых растворов на водной основе оптимизируемыми показателями являются: эффективная вязкость, вязкость при низких скоростях сдвига (ВНСС), показатель нелинейности [10, 11]. В [16] оптимизируемыми показателями биополимерного бурового раствора являются вязкость, показатель консистенции K и степень нелинейности n .

Целью данного исследования является оценка различия реологических показателей водных растворов ряда образцов биополимера, степени соответствия измеренных показателей степенному реологическому закону, влияния катионов солей калия и натрия на изменение их вязкостных свойств. При этом предполагается, что сдвиговые характеристикиготавливаемых дисперсий подчиняются степенному закону. Параметры степенного закона K и n сами послужили показателями изменчивости как непосредственно водных растворов, так и их модификаций.

Методика исследования

В лаборатории буровых растворов и крепления скважин Иркутского национального исследовательского технического университета проводились опыты на соответствие водных растворов ряда биополимеров требованиям ГОСТ Р 56946-2016 «Материалы буровых растворов. Технические условия и испытания». В исследованиях были использованы ксантановые смолы различных производителей.

Согласно требованиям ГОСТ Р 56946-2016,готавливались три типа раствора путем добавления 1,5 г ксантановой смолы в дистиллированную воду, в 30%-й раствор NaCl и в 25 %-й минерализованный раствор KCl в объеме 300 мл каждый. Измерения вязкости проводились на ротационном вискозиметре OFITE при скорости 600, 300, 6 и 3 об/мин. Показания прибора снимались после стабилизации каждой из скоростей вращения [17]. По окончании замеров показания шкалы прибора при скоростях вращения ротора 600 и 300 об/мин были переведены в значения пластической вязкости (PV – plastic viscosity) и динамического напряжения сдвига (τ_0). Результаты лабораторных испытаний биополимеров представлены в табл. 1.

В табл. 1 выделены реологические параметры водных растворов ксантановых смол и их модификаций хлоридами калия и натрия, вычисленных по методике [18, 19].

На рис. 1 представлены коэффициенты нелинейности водных растворов изучаемых образцов ксантана, вычисленные по методике [18, 19] на основании измерений напряжения сдвига на ротационном вискозиметре. График распределения коэффициента нелинейности водных растворов показывает, что ни один из растворов не отвечает требованиям ($n < 0,3$): а) улучшение реологии течения циркулирующей жидкости; б) увеличение скорости выноса шлама из скважины; в) взвешивание твердой фазы раствора по необходимости. Кроме того, статистический анализ рассматриваемого ряда показал его неоднородность (коэффициент вариации равен 11 %). Однако повышение ионной силы раствора приводит к однородности рассматриваемого ряда по показателю n (коэффициент вариации растворов с NaCl равен 4 %, растворов с KCl – 8,7 %).

На рис. 2 показано распределение водных растворов по показателю консистенции, которое является явно неоднородным. Опубликованные источники информации указывают, что параметр K численно равен напряжению сдвига при градиенте скорости, равном 1 с^{-1} [20].

Анализ рисунков показывает, что лучшим из образцов ксантана является Petro L, так как течение его водного раствора обладает наибольшим отклонением от ньютоновского режима и наибольшей вязкостью при малых скоростях сдвига, подтверждающейся максимальным показателем УР. Здесь следует отметить, что по величине коэффициента консистенции можно оценить характерный размер структурной единицы вязкого течения. Характер течения растворов Petro L при вычисленных значениях K и n показан на рис. 3, где раствор с NaCl проявил ньютоновский характер течения.

На рис. 4 показана зависимость напряжения сдвига раствора Petro L при малых частотах вращения шпинделя вискозиметра, в частности, выделено экстраполяционное значение при градиенте сдвига в 1 с^{-1} .

Измеренные данные опыта позволили провести исследование по влиянию солей на реологические показатели водных растворов нескольких образцов биополимеров ксантанового ряда.

Таблица 1. Параметры растворов, определенные по методике [18]

Table 1. Parameters of solutions determined by the method [18]

Название биополимера Name of the biopolymer	раствор solution	Замеряемые параметры/Measured parameters					
		n	K	τ_0	YP	AV, $\times 10^3$	PV
				Па/Па		Па·с/Па·с	
Марка-Т/Brand-T	водный/water	0,6546	0,5090	9,15	0,261	23,75	0,0165
	P+NaCl	1,0204	0,0466	7,74		27,4	0,0145
	P+KCl	0,7867	0,2034	8,22		23,7	0,0110
МНО-80/MNO-80	водный/water	0,5609	0,7917	7,98	0,560	19,3	0,0060
	P+NaCl	0,9108	0,1196	7,74		24,8	0,0119
	P+KCl	0,6729	0,3570	7,35		19,35	0,0071
Фуфент API/Fufent API	водный/water	0,5585	0,8220	8,16	0,568	19,7	0,0061
	P+NaCl	0,9434	0,0955	9,99		32,95	0,0163
	P+KCl	0,8024	0,2044	9,09		26,55	0,0114
Гаммаксан/Gammaksan	водный/water	0,6527	0,4743	8,43	0,587	21,85	0,0078
	P+NaCl	0,9236	0,0930	8,64		28,0	0,0136
	P+KCl	0,8653	0,1150	7,50		23,1	0,0106
GUM	водный/water	0,6834	0,3773	8,25	0,574	21,75	0,0080
	P+NaCl	0,9551	0,0801	3,06		30,4	0,0154
	P+KCl	0,8066	0,1906	9,06		25,6	0,0105
Petro-L	водный/water	0,5475	0,9478	8,79	0,612	21,05	0,0064
	P+NaCl	0,9471	0,0779	8,34		27,6	0,0137
	P+KCl	0,6918	0,3478	7,86		21,3	0,0082
U-xan	водный/water	0,7191	0,3132	7,42	0,517	22,85	0,0105
	P+NaCl	1,0016	0,0580	8,61		30,0	0,0156
	P+KCl	0,7699	0,2212	8,07		22,85	0,0095

Примечание: P – водный раствор; n – индекс течения раствора; K – коэффициент консистенции; τ_0 – динамическое напряжение сдвига, Па; YP – предельное напряжение сдвига, Па; AV – кажущаяся вязкость, Па·с; PV – пластическая вязкость, Па·с.

Note: P is the aqueous solution; n is the index of the solution flow; K is the consistency coefficient; τ_0 is the dynamic shear stress, Pa; YP is the ultimate shear stress, Pa; AV is the apparent viscosity, Pa·s; PV is the plastic viscosity, Pa·s.

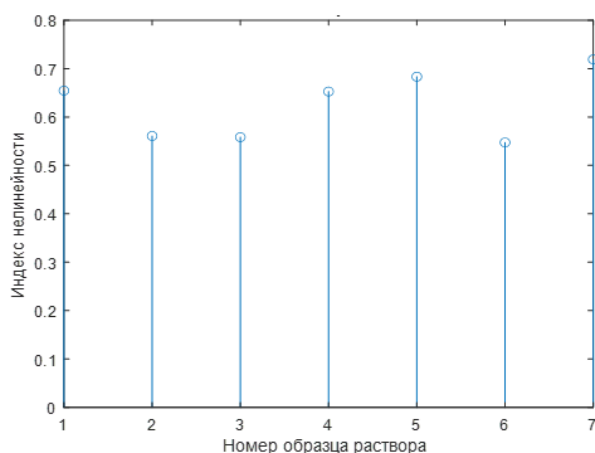


Рис. 1. Распределение водных растворов ксантановых реагентов по степени отклонения от реологии по Ньютону

Fig. 1. Distribution of aqueous solutions of xanthene reagents by degree of deviation from Newton rheology

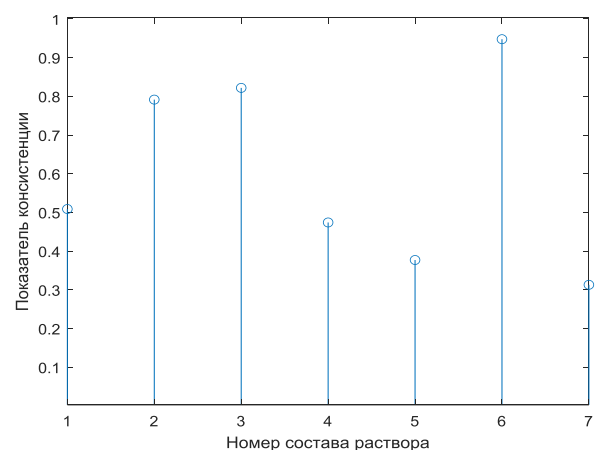


Рис. 2. Распределение показателя консистенции в водных растворах ксантановых камедий

Fig. 2. Distribution of the consistency index in aqueous solutions of xanthene comedies

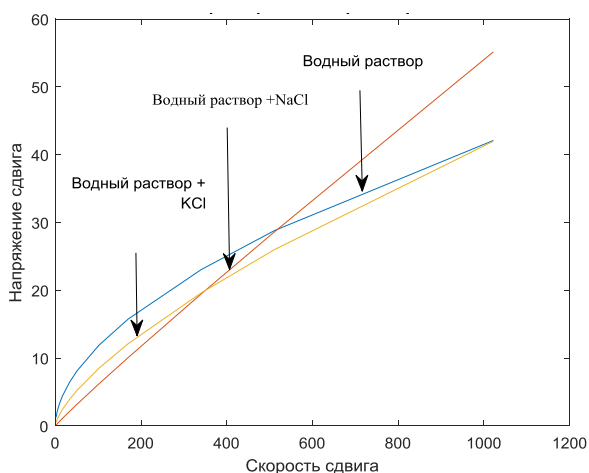


Рис. 3. Характер течения водного раствора биополимера и его модификации хлоридами

Fig. 3. Nature of the flow of the aqueous solution of the biopolymer and its modifications with chlorides

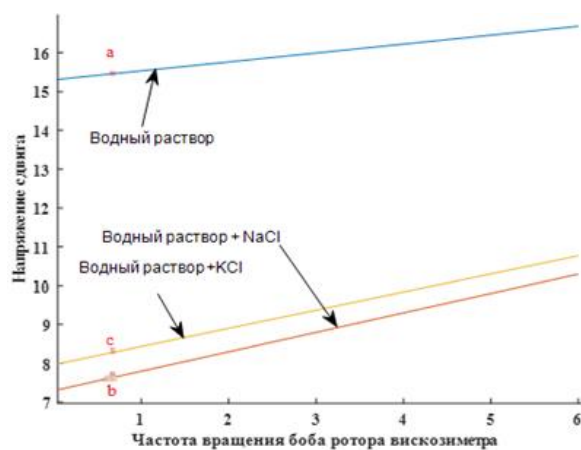


Рис. 4. Зависимости напряжения сдвига от низких частот вращения ротора вискозиметра: а, б, с) экстраполяция напряжения при градиенте скорости сдвига 1 c^{-1}

Fig. 4. Stress at low shear rates: а, б, с) extrapolation of stress at a shear rate gradient 1 s^{-1}

Образцы ксантана различаются по растворимости, набуханию и составу, что сказывается на параметрах степенной модели. Существует необходимость разработки количественного показателя, позволяющего оценивать различие приготовленных безглинистых биополимерных буровых растворов и оптимизировать составы приготавливаемых растворов. Для буровых растворов, подчиняющихся степенному реологическому закону, в качестве параметра оптимизации предлагается использовать отношение показателя консистенции K и показателя степени отклонения от ньютоновского режима течения n при устремлении

его к максимуму. Для водного раствора Petro L этот показатель равен:

$$\lambda = \frac{K}{n} = \frac{0,9478}{0,5475} = 1,162.$$

Для сравнения точности вычисления напряжения сдвига по формуле [18] проведено вычисление по измеренным значениям коэффициента консистенции K и степени отклонения режима течения от ньютоновского n . Измеренные значения представлены в виде ряда значений, соответствующих скоростям $\dot{\gamma}$ и напряжениям сдвига τ ротационного вискозиметра (табл. 2).

График измеренных значений представлен на рис. 5. Вычисление показателя степени отклонения n производится по формуле:

$$n = 3,32 \lg(\theta_{600}/\theta_{300}) = 3,32 \lg \frac{48,83}{39,4} = 0,3094,$$

где θ_{300} и θ_{600} – измеренные значения напряжения сдвига при частоте вращения шпинделя вискозиметра 300 и 600 об/мин (табл. 2).

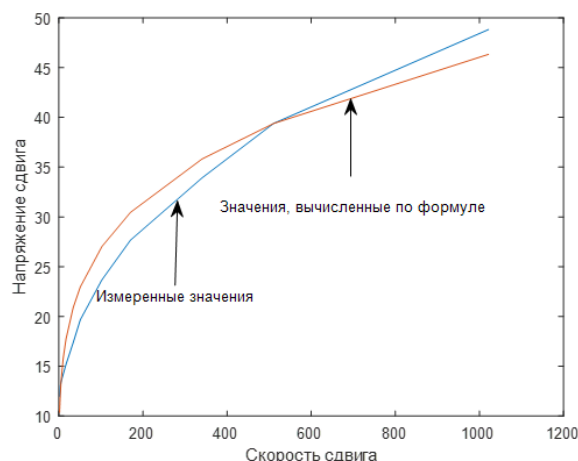


Рис. 5. Сравнения измеренных и вычисленных значений и их аппроксимация по степенному закону

Fig. 5. Comparison of measured and calculated values, and their power law approximations

Показатель консистенции вычисляется по формуле:

$$K = \frac{\theta_{600}}{1022^n} = \frac{4883}{1022^{0,3094}} = 5,7222.$$

По формуле степенного закона $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ проведено построение графика $\tau = f(\dot{\gamma})$, где $\dot{\gamma}$ представляет собой ряд значений скоростей сдвига вискозиметра.

Статистическое среднее ряда измеренных значений равно 23,19, а ряда значений, вычисленных по формуле, – 24,36. Ошибка сравнения значений составляет $\delta = \frac{(24,36-23,19)}{24,36} \times 100\% \approx 5\%$, что весьма приемлемо для технических вычислений. Визуализация ошибки представлена рис. 5.

Таблица 2. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига

Table 2. Dependence of the shear stress on the shear rate

$\dot{\gamma}$	1,703	3,406	5,109	10,218	17,03	34,06	51,09	102,18	170,30	340,6	510,9	1021,8
τ	1,97	13	13,4	14,17	15,2	17,37	19,67	23,67	27,67	33,93	39,4	48,83

Примечание: $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} ; τ – напряжение сдвига, Па.

Note: $\dot{\gamma}$ is the shear rate, s^{-1} ; τ is the shear stress, Pa.

В результате полученных кривых (рис. 5), было показано насколько точно аппроксимация по степенному закону отражает изменения между измеренными и вычисленными значениями напряжения сдвига.

Выводы

Эффективность применения полимеров определяется количеством основного реагента и модифицирующих добавок, необходимых для придания промывочной жидкости требуемых свойств. Биополимерные водные буровые растворы на основе ксантановой камеди показали свою эффективность во многих регионах Российской Федерации. Однако оценка эффективности растворов затруднена из-за различия товарной продукции выпускающих компаний по растворимости, набуханию и составу, что сказывается на оптимизируемых показателях бурового раствора [21, 22].

Для упрощения регулирования требуемых свойств раствора предложен единый показатель $\lambda = \frac{\kappa}{n}$. Этот показатель позволяет:

- регулировать режим течения в элементах циркуляционной системы;
- стабилизировать состояние твердой фазы раствора;
- регулировать показатель фильтрации раствора. Также в результате проведения опытных работ выявлено:
- снижение вязкости чисто 0,5%-х водных растворов образцов ксантана в сравнении с минерализованными хлоридом натрия (концентрация 0,5 молей) и калия (концентрация 0,34 молей);
- приемлемая точность аппроксимации степенной моделью измеренных значений напряжения сдвига рассмотренного ряда растворов ксантановых камедей, приготовленных по [6].

Для упрощения регулирования требуемых свойств раствора предложен единый показатель, максимально обобщающий оптимизируемые показатели, который позволяет регулировать режим течения раствора во всех элементах циркуляционной системы, стабилизировать состояние твердой фазы раствора и регулировать показатель фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A critical review of drilling mud rheological models, Netherlands / O.E. Agwu, J.U. Akpabio, M.E. Ekpenyong, U.G. Inyang, D.E. Asuquo, I.J. Eyoh, O.S. Adeo // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 203. – P. 1–21.
2. Буровой раствор, содержащий полимер, и применение полимера в буровом растворе: пат. Рос. Федерация № 2388782C2, заявл. 15.06.2006; опубл. 05.10.2010. Бюл. № 13. – 13 с.
3. Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А. Исследование физико-химических и физико-механических свойств дисперсной полимерно-гелевой системы «Темпоскрин-Люкс» на основе агентов закачки, применяемых на месторождениях нефти Оренбургской, Самарской и Ульяновской областей // *Актуальные проблемы нефти и газа*. – 2019. – № 4 (27). – С. 1–13.
4. Исследование эффектов синергетического взаимодействия ксантановой и гуаровой смол в водных растворах / О.И. Валиева, О.Ю. Шарова, В.Ю. Клеттер, Р.А. Мулюков, И.М. Борисов // *Вестник Башкирского университета*. – 2013. – Т. 18. – № 1. – С. 52–55.
5. Шарипов А.У., Антонов К.В., Лукманов Р.Р. Разработка и применение полимерных растворов при бурении и заканчивании глубоких скважин. – Уфа: Изд-во «Тай», 2003. – 163 с.
6. ГОСТ Р 56946-2016. Материалы буровых растворов. Технические условия и испытания. – М.: Стандартинформ, 2016. – 105 с.
7. Wisniowski R., Skrzypaszek K., Malachowski T. Selection of a suitable rheological model for drilling fluid using applied numerical methods // *Energies*. – 2020. – V. 13 (12). – P. 1–17.
8. Akpan E. U., Godpower C.E., Ghasem G.N. Enhancing the performance of xanthan gum in waterbased mud systems using an environmentally friendly biopolymer // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – V. 10 (04). – P. 1933–1948.
9. API RP 13D. Rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids; Norm of American Petroleum Institute. – Washington, DC, USA, 2017. – 98 p.
10. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // *Journal SPE Drill Eng.* – 1986. – V. 1 (04). – P. 297–308.
11. Блинов П.А., Шаньширов А.В. Буровые растворы: исследование простых солей на реологические, фильтрационные и ингибирующие свойства жидкостей // *Деловой журнал Neftegaz. RU*. – 2021. – № 7 (115). – С. 50–53.
12. Phillips G.O., Williams P.A. Handbook of hydrocolloids. 2nd ed. – Great Britain: Taylor&Francis Publ., 2009. – 924 p.
13. Hemphill T., Campos W., Pilehvari A. Yield-power law model more accurately predicts mud rheology // *Journal Oil and Gas*. – 1993. – V. 91 (34). – P. 45–50.
14. Шарафутдинов З.З., Шарафутдинова Р.З. Буровые растворы на водной основе и управление их реологическими параметрами // *Нефтегазовое дело*. – 2004. – № 1. – С. 1–21.
15. Буровой раствор: пат. Рос. Федерация №2681614C2; заявл. 17.07.2017; опубл. 11.03.2019, Бюл. №2. – 7 с.
16. Оценка вязкости водных растворов ксантановых смол / А.И. Ламбин, Е.В. Аверкина, А.Н. Ерыгина, А.С. Красинская // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 96–103.
17. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 509 с.
18. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil / S.M. Kumara, B.A. Khan, K.C. Rohit, B. Purushotham // *Journal Arch Appl Sci Res*. – 2012. – V. 4 (6). – P. 2507–2512.
19. Химическая гидродинамика: справочное пособие / А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запryanov, Д.А. Казенин. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.
20. Пен Р.З., Чендылова Л.В., Шапиро И.Л. Реологические свойства меловальных суспензий // *Химия растительного сырья*. – 2004. – № 1. – С. 11–15.
21. Исследование биополимерных буровых растворов на основе высокоминерализованных пластовых вод Восточной Сибири / Н.А. Буглов, Е.В. Аверкина, А.О. Устюжанин, А.С. Красинская // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 210–218.
22. ГОСТ 33213-2014 (ISO 10414-1:2008). Контроль параметров буровых растворов в промышленных условиях. Растворы на водной основе. – М.: Стандартинформ, 2015. – 75 с.

Поступила: 24.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 13.04.2023 г.

Информация об авторах

Ламбин А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

Аверкина Е.В., старший преподаватель кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 622.24

STUDY OF THE VARIABILITY OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF WATER-BASED BIOPOLYMER DISPERSIONS IN DRILLING FLUIDS

Anatoly I. Lambin¹,
alambin@ex.istu.edu

Elena V. Averkina¹,
averkina.l@yandex.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance. Water-based biopolymer drilling fluids have become quite widespread in the technology of oil and gas well construction. Much attention is paid to the methods of regulating the physical and mechanical properties of biopolymer systems. In particular, rheological properties of solutions based on xanthan gum are of great practical interest. The effectiveness of the use of polymers is determined by the amount of the main reagent and modifying additives necessary to impart the required properties to the washing liquid. Biopolymer water drilling fluids based on xanthan gum have shown their effectiveness in many regions of the Russian Federation. However, the evaluation of the effectiveness of the solutions is difficult due to the differences in the saleable products of the producing companies in solubility, swelling and composition, which affects the optimized performance of the drilling mud.

The main aim: consideration of the differences in aqueous solutions of a number of samples of xanthan gum in terms of power dependence: K -coefficient of consistency and n -degree of deviation from the Newtonian flow regime of the study.

Objects: rheology of aqueous solutions of several xanthan samples, both purely aqueous and based on aqueous brines of potassium chloride (KCl) and sodium (NaCl).

Methods: instrumental methods for determining the parameters of drilling fluids according to SS 33213-2014; the difference in the parameters of the power rheological dependence was determined by comparing its indicators after measuring the viscosity of solutions on a viscometer with direct indications.

Results. The influence of a fixed concentration of NaCl and KCl salts on the considered indicators of the power model is shown. A generalized optimization indicator is proposed for solutions obeying a power-law rheological law. The calculated dependence of the accuracy of approximation of experimental data by a power model, which showed acceptable accuracy, is presented.

Key words:

biopolymer drilling fluids, xanthan gum, consistency coefficient, viscosity properties, sodium chloride, potassium chloride, power rheological law.

REFERENCES

- Agwu O.E., Akpabio J.U., Ekpenyong M.E., Inyang U.G., Asuquo D.E., Eyoh I.J., Adeo O.S. A critical review of drilling mud rheological models, Netherlands. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 203, pp. 1–21.
- Karazhian K., Labo M.-P., Deblock E. *Burovoy rastvor, soderzhashchiy polimer, i primeneniye polimera v burovom rastvore* [Drilling mud containing polymer and the use of polymer in drilling mud]. Patent. RF, no. 2388782C2, 2010.
- Demianovskiy V.B., Kaushanskiy D.A. Investigation of physico-chemical and physico-mechanical properties of a dispersed polymer-gel system «Temposkrin-Lux» based on injection agents used in oil fields of the Orenburg, Samara and Ulyanovsk regions. *Actual problems of oil and gas*, 2019, no. 4 (27), pp. 1–13. In Rus.
- Valieva O.I., Sharova O.Y., Kletter V.Y., Mulyukov R.A., Borisov I.M. Investigation of the effects of synergetic interaction of xanthan and guar resins in aqueous solutions. *Bulletin of Bashkir University*, 2013, vol. 18, no. 1, pp. 52–55. In Rus.
- Sharipov A.U., Antonov K.V., Lukmanov R.R. *Razrabotka i primeneniye polimernykh rastvorov pri burenii i zakanchivani glubokikh skvazhin* [Development and application of polymer solutions for drilling and completion of deep wells]. Ufa, Tau Publ., 2003. 163 p.
- GOST R 56946. *Materialy burovnykh rastvorov. Tekhnicheskiye usloviya i ispytaniya* [Materials of drilling fluids. Technical conditions and tests]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 105 p.
- Wisniewski R., Skrzypaszek K., Malachowski T. Selection of a suitable rheological model for drilling fluid using applied numerical methods. *Energies*, 2020, vol. 13 (12), pp. 1–17.
- Akpan E. U., Godpower C.E., Ghasem G.N. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10 (04), pp. 1933–1948.
- API RP 13D. *Rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids; Norm of American Petroleum Institute*. Washington, DC, USA Publ., 2017. 98 p.
- Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drill Eng*, 1986, no. 1 (04), pp. 297–308.
- Blinov P.A., Shansherov A.V. *Burovye rastvory: issledovanie prostykh soley na reologicheskie, filtratsionnye i ingibiruyushchie svoystva zhidkostey* [Drilling fluids: investigation of simple salts on rheological, filtration and inhibitory properties of liquids]. *Dolovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 2021, no. 7 (115), pp. 50–53.
- Phillips G.O., Williams P.A. *Handbook of hydrocolloids*. 2nd ed. Great Britain, Taylor&Francis Publ., 2009. 924 p.
- Hemphill T., Campos W., Pilehvari A. Yield-power law model more accurately predicts mud rheology. *Oil and Gas*, 1993, vol. 91 (34), pp. 45–50.
- Sharafutdinov Z.Z., Sharafutdinova R.Z. *Burovye rastvory na vodnoy osnove i upravleniye ikh reologicheskimi parametrami* [Water-based drilling fluids and management of their rheological parameters]. *Neftegazovoye delo*, 2004, no. 1, pp. 1–21.
- Lyshko O.G., Lyshko G.N., Lyshko A.G. *Burovoj rastvor* [Drilling mud]. Patent RF, no. 2681614C2, 2019.
- Lambin A.I., Averkina E.V., Yarygina A.N., Krasinskaya A.S. Evaluation of the viscosity of aqueous solutions of xanthene resins. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 96–103. In Rus.
- Gray J.R., Darley G.S.G. *Sostav i svoystva burovnykh agentov (promyvochnykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling agents (flushing fluids)]. Translated from English. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
- Kumara S.M., Khan B.A., Rohit K.C., Purushotham B. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil. *Journal Arch Appl Sci Res*, 2012, vol. 4 (6), pp. 2507–2512.

19. Kutepov A.M., Polyanin A.D., Zapryanov Z.D., Kazenin D.A. *Khimicheskaya gidrodinamika: spravochnoe posobie* [Chemical hydrodynamics: a reference manual]. Moscow, Kvantum Publ., 1996. 336 p.
20. Pen R.Z., Chendylova L.V., Shapiro I.L. Reologicheskie svoystva melovalnykh suspenziy [Rheological properties of chalky suspensions]. *Khimiya rastitelnogo syria*, 2004, no. 1, pp. 11–15.
21. Buglov N.A., Averkina E.V., Ustyuzhanin A.O., Krasinskaya A.S. Investigation of biopolymer drilling fluids based on highly mineralized reservoir waters of Eastern Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 210–218. In Rus.
22. GOST 33213-2014 (ISO 10414-1:2008). *Kontrol parametrov burovyykh rastvorov v promyslovyykh usloviyakh. Rastvory na vodnoy osnove* [State Standard 33213-2014 (ISO 10414-1:2008). Field testing of drilling fluids. Water-based fluid]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 75 p.

Received: 24 January 2023.

Reviewed: 13 April 2023.

Information about the authors

Anatoly I. Lambin, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Elena V. Averkina, senior lecturer, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 550.46(282.257.21)

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ ПАРАТУНСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО РАЙОНА (КАМЧАТКА)

Потурай Валерий Алексеевич¹,
poturay85@yandex.ru

¹ Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
Россия, 679000, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, 4.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения фактических данных по составу органических соединений в термоминеральных водах. Гидротермальные системы содержат разные классы органического вещества, состав которого в дальневосточных термальных водах слабо исследован. Его изучение, прежде всего, направлено на выяснение механизмов преобразования органических компонентов под действием высоких температур и давления, что способствует более глубокому пониманию процессов, происходящих в системе «вода–порода–органическое вещество».

Цель: определить состав и генезис органических соединений в термальных водах Паратунского геотермального района (Северный и Карымшинский участок), оценить молекулярно-массовое распределение углеводородов и сравнить полученные данные с результатами исследования органического вещества в других гидротермальных системах Камчатки.

Объекты: Паратунская гидротермальная система (термальная вода из глубоких скважин Северного и Карымшинского участков), а также Мутновская и Узонская гидротермальные системы (пароводяная смесь из глубоких скважин Дачного и Северо-Мутновского термальных полей и термальная вода из неглубокой скважины Восточного термального поля).

Методы: полевые маршруты, твердофазная экстракция, капиллярная газовая хроматомакс-спектрометрия, расчет геохимических индексов распределения углеводородов.

Результаты. В термальных водах Паратунского геотермального района установлено 40 органических соединений, которые относятся к 11 гомологическим рядам. Максимального распространения достигают ароматические и алифатические углеводороды, имеющие термогенное (сформированные в результате термокаталитического преобразования органических остатков) и бактериальное происхождение. Карымшинские термальные воды характеризуются специфическим молекулярно-массовым распределением нормальных алканов, выражающимся в присутствии только четных низкомолекулярных гомологов. Сравнение полученных данных с результатами проведенных ранее исследований органического вещества на Камчатке показывает наличие большого сходства в составе главных органических компонентов в Паратунском, Мутновском и Узонском геотермальных районах, заключающегося в резком преобладании алифатических и ароматических углеводородов.

Ключевые слова:

Полуостров Камчатка, гидротермальная система, органическое вещество, углеводороды, молекулярно-массовое распределение, генезис.

Введение

Органическое вещество (ОВ) в термоминеральных водах является предметом исследования многих российских и зарубежных ученых [1–13 и др.]. Прежде всего, эти исследования направлены на изучение процессов, протекающих в системе «вода–порода–газ–органическое вещество» и определение механизмов преобразования ОВ в подземных, в том числе термоминеральных, водах. Формирование ОВ в термальных водах обязано многим процессам, среди которых выделяются три основных: биогенные (связанные с метаболической и биосинтетической активностью термофилов и их деструкцией); абиогенные (химические реакции синтеза ОВ из неорганических молекул) и термогенные (перестройка компонентов под воздействием высоких температур и давления и распад высокомолекулярного органического вещества на простые соединения) [14–18].

Одним из наиболее интересных объектов для изучения ОВ, в частности предельных и ароматических углеводородов (УВ) в наземных термальных водах, является полуостров Камчатка – вулканически активный участок Земной коры. Здесь широко распространены гидротермальные системы, формирование которых происходит в условиях магматогенного геотермического режима. Различные аспекты изучения ОВ

и его происхождения в Камчатских термальных водах рассмотрены во многих работах [1–6, 8; 19–25]. В них приводятся результаты исследования растворенных органических соединений в горячих источниках и высокотемпературном флюиде из скважин, а также в нефтепроявлениях.

В ходе наших предыдущих исследований (автора вместе с В.Н. Компаниченко) было изучено ОВ средней летучести в Мутновской и Узонской гидротермальных системах [26–29]. Это большая группа УВ и их производных, молекулярная масса которых находится в пределах 90–550 а.е.м., и точка кипения (летучесть) 70–550 °С, которая широко представлена в природе. В частности, в нее входят нормальные алканы, с количеством атомов углерода в молекуле от C₆ до C₄₀. Еще одно крупное месторождение термальных вод на Камчатке – Паратунское, в пределах которого ОВ практически не изучалось. Частично нами были опубликованы общие данные по гомологическим рядам в источниках Северного участка Паратунского геотермального района [30]. Кроме этого, в работе [6] приводится содержание общего органического углерода в Паратунских термальных водах (около 10 мг/дм³) и отмечается отсутствие жирных кислот. ОВ в Карымшинских термальных водах, которые также входят в Паратунский геотермальный район,

изучено не было. Цель работы – определить состав и генезис органических соединений в термальных водах Паратунского района (Северный и Карымшинский участки), оценить молекулярно-массовое распределение УВ и сравнить с полученными ранее данными в других гидротермальных системах Камчатки (Мутновская и Узонская).

Объекты и методы исследования

Паратунский геотермальный район. Паратунская гидротермальная система находится севернее одноименного поселка, в 25 км западнее г. Петропавловск-Камчатский (рис. 1). К ней относятся Нижнепаратунские, Среднепаратунские, Верхнепаратунские источники, термальные источники Северного и Микижинского участков и Карымшинские [31, 32].

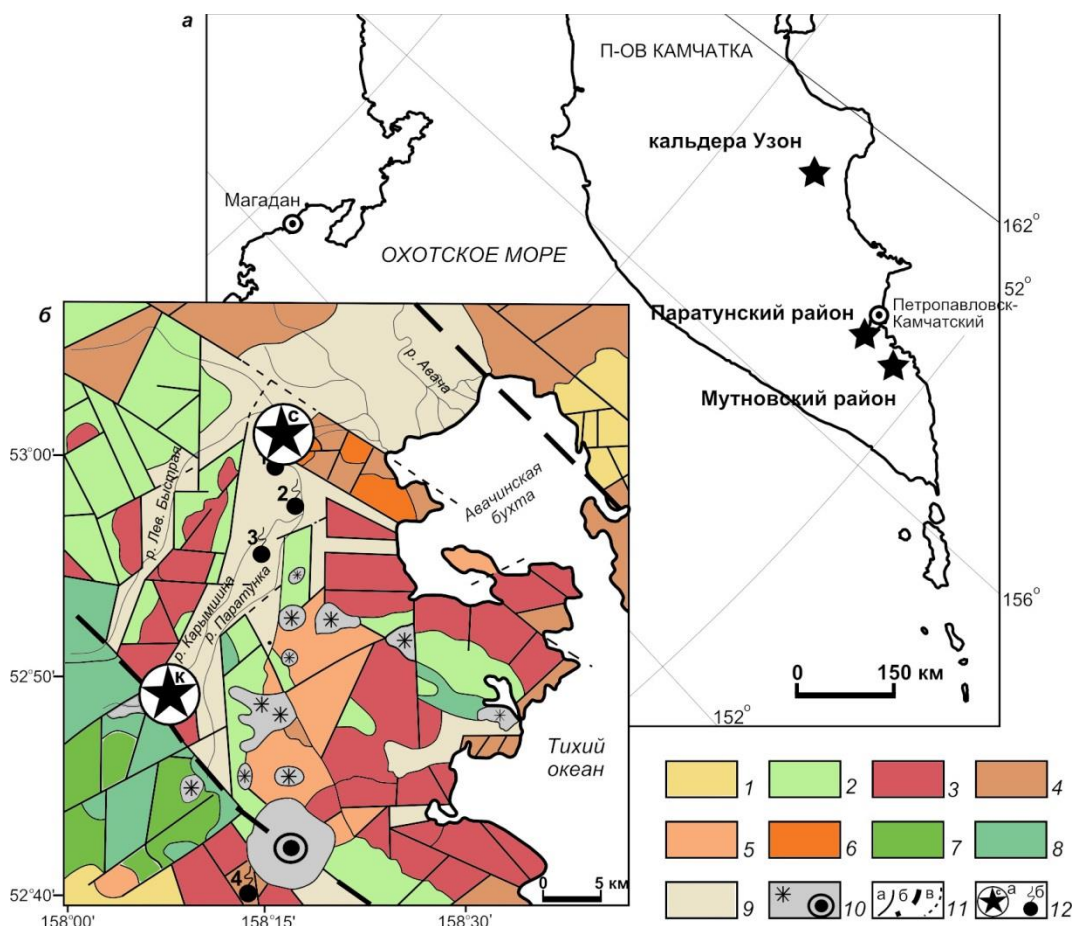


Рис. 1. Обзорная карта с месторасположением исследуемых геотермальных районов (а) и схематическая геологическая карта Паратунского района (б) по [32], с изменениями: 1) образования островной дуги на коре океанического типа; 2–4) отложения первого этапа формирования островной дуги на коре переходного типа: 2) эоцен-миоценовые вулканогенно-осадочные породы, 3) миоценовые гипабиссальные интрузии и субвулканические тела, 4) эффузивно-пирокластические покровы этого же возраста; 5–8) отложения второго этапа: 5) плиоценовые эффузивно-пирокластические образования андезибазальтовой формации, 6) субвулканические тела этой формации, 7) покровные пирокластические отложения плиоцен-эоплейстоценовой риодацитовой формации, 8) субвулканические тела этой формации; 9) рыхлые отложения плейстоцен-голоценового возраста; 10) голоценовые базальты: лавовые потоки, шлаковые конусы и стратовулкан Вилучинский; 11) разломы: а – достоверные, б – крупные региональные, в – предполагаемые; 12) гидротермальные системы и термальные источники: а – исследуемые термальные воды Паратунского района (с – Северные, к – Карымшинские), б – остальные группы термальных источников (1 – Нижнепаратунские, 2 – Среднепаратунские, 3 – Верхнепаратунские, 4 – Вилучинские)

Fig. 1. Overview map of the investigated geothermal areas location (а) and schematic geological map of the Paratunka geothermal area (б) [32], with modifications: 1) island arc formation on the oceanic crust; 2–4) deposits of the island arc first stage formation on the transition-type crust: 2) Eocene-Miocene volcanogenic-sedimentary rocks, 3) Miocene hypabissal intrusions and subvolcanic bodies, 4) effusive-pyroclastic covers of the same age; 5–8) deposits of the second stage: 5) Pliocene effusive-pyroclastic formations of the andesibasaltic formation, 6) subvolcanic bodies of this formation, 7) overlying pyroclastic deposits of the Pliocene-Epleistocene rhyodacite formation, 8) subvolcanic bodies of this formation; 9) loose deposits of Pleistocene-Holocene age of the Paratunka and Avachinsky; 10) Holocene basalts; 11) faults: а – reliable, б – large regional, в – inferred; 12) hydrothermal systems and thermal springs: а – studied thermal waters of the Paratunka area (с – Northern, к – Karymshin), б – other groups of thermal springs (1 – Nizhneparatunka, 2 – Sredneparatunka, 3 – Verkhneparatunka, 4 – Vilyuchinsk)

Паратунская гидротермальная система – это азотные термальные воды метеорного происхождения. Водовмещающие породы – олигоцен-нижнемиоценовые базальты, андезиты и их туфы [32]. Значения изотопов δD и $\delta^{18}O$ колеблются в пределах δD –116 ‰, –110 ‰; $\delta^{18}O$ –16 ‰, –15 ‰. Водное питание гидротермальной системы – многолетние снежники и ледники Вилучинского вулкана. Измеренные температуры достигают 107 °C [31]. Рассчитанные температуры глубинного резервуара Северных и Карымшинских источников с использованием кварцевого геотермометра – 112–113 °C [32]. Макрокомпонентный состав источников хлоридный и хлоридно-сульфатный натриевый. Среди газов доминирует азот (96–98 %) [31]. Это напорные термальные воды с преимущественно трещинно-жильным типом циркуляции. В горячих источниках Нижнепаратунского участка были установлены термофильные цианобактерии [33]. В работе представлены результаты исследования источников Северного участка (скважина № ГК-9 глубиной 1080 м и температурой воды на устье 82,5 °C) и Карымшинских термальных вод (скважина № 88 глубиной 815 м, температура воды на выходе достигает 88,5 °C). Для сравнения также приводятся данные по ОВ в Мутновской и Узонской гидротермальных системах. Информация о них будет дана в соответствующем параграфе раздела «Результаты и обсуждение».

Методика исследования. Пробы воды были отобраны в летний период 2005, 2007 и 2009 гг. в Паратунском, Мутновском и Узонском геотермальных районах. Вода отбиралась в специально подготовленные бутылки из темного стекла, объемом 0,5 дм³ (промытые хромовой смесью и дистиллированной водой и просушенные в сушильном шкафу при температуре 300 °C). Непосредственно на месте отбора осуществлялась твердофазная экстракция с применением патронов с сорбентом DS–C18, органические компоненты из которого извлекались хлористым метиленом. Для качественного анализа ОВ был использован метод капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии. Анализ проводился в лаборатории г. Хабаровска (КЦЭМиП, аналитик В.Л. Рапопорт) на газовом хроматомасс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010S. Подробное описание методики приводится в работе [26]. Идентификация пиков хроматограмм осуществлялась по масс-спектрам и индексам удерживания (индекс Ковача). Оценку относительного содержания соединений в пробе проводили по площадям пиков. Кроме этого, на полученных в ходе исследования хроматограммах фиксировались пики фталатов, которые были отнесены к инструментальному загрязнению [26] и исключены из дальнейшего обсуждения.

Результаты исследования и их обсуждение

Органическое вещество в термальных водах Паратунского района. В термальной воде из скважин Паратунского геотермального района установлено 40 органических соединений, которые относятся к 11 гомологическим рядам (табл. 1). Наибольшим распространением пользуются гомологический ряд нор-

мальных алканов – 15–83 отн. %, а также класс ароматических УВ – 6–61 отн. % (в том числе нафталин, хлорбензол и диэтилтолуамид). Эти ряды органических компонентов, по нашим данным, наиболее распространены в термальных водах Дальнего Востока [28, 30], а также повсеместно встречаются в термальных водах других регионов мира [3, 6, 7, 9, 10, 12]. При этом в холодных подземных и поверхностных водах Дальнего Востока доминируют другие компоненты – терпены, стероиды и эфиры [30].

Ароматические соединения являются одними из преобладающих органических компонентов в горячих источниках, т. к. гидротермальные условия благоприятны для образования низкомолекулярных ароматических УВ [12, 34, 35]. Воды с температурой более 65 °C содержат различные арены, а в водах, имеющих температуру ниже 50 °C, эти соединения менее распространены. При повышении температуры воды ОВ разлагается и содержание ароматических УВ увеличивается. Арены доминируют при пороге 80 °C [36]. Вода из опробованных скважин Паратунского района имеет температуру на выходе 82–88 °C, а на глубине – выше 112–113 °C [32]. Ароматические УВ не являются типичными компонентами для живых организмов, так как многие из этих соединений токсичны, поэтому считать их биогенными нет основания. В исследуемых термальных водах ароматические УВ, вероятно, образовались в результате термогенных процессов. Например, арены могут быть получены в результате термического реструктурирования и распада многих органических компонентов (каротин, аминокислоты, жирные кислоты и др.) [16, 36]. Нафталин, который был зафиксирован только в скважине № ГК-9, может формироваться в результате преобразования осадочного ОВ. Дегградация погребенной биомассы приводит к изменению состава ОВ, и основными продуктами гидротермальной переработки остатков ОВ являются газообразные УВ и ПАУ [37, 38]. Конкретные химические реакции, протекающие в термогенных процессах преобразования исходного ОВ в ароматические УВ, не ясны, в основном это такие реакции, как дегидратация, декарбонилирование, декарбоксилирование и др. [39]. Кроме этого, в термальной воде Северного участка был установлен диэтилтолуамид (ДЭТА), а в Карымшинских источниках – хлорбензол, которые могут быть расценены как загрязнители. ДЭТА – известный репеллент, а галогенсодержащие органические соединения содержатся в пестицидах (например, пестицид пентахлорнитробензол). Однако следует отметить, что скважины, из которых производился отбор проб, расположены в водоохраной зоне, вдали от возможных источников загрязнения. Происхождение гетероароматических УВ также может быть связано с преобразованием осадочного ОВ [37, 38], а галогенпроизводные органические соединения могут образовываться в процессе горения при лесных пожарах, а также в результате вулканических извержений или геотермальных процессов [20, 40]. Кроме этого, ДЭТА трудно растворим в воде, как и некоторые другие соединения (например, алкены, некоторые кетоны и спирты и др.). При этом

его температура кипения, при которой он становится летучим, около 110 °С. Однако на глубине, в геотермальном резервуаре, вследствие действия высокой

температуры и давления создаются условия, позволяющие труднорастворимым летучим компонентам растворяться в воде.

Таблица 1. Идентифицированные компоненты в экстракте термальных вод Паратунского месторождения
Table 1. Identified components in the Paratunka deposit thermal water extract

Гомологический ряд Homology series	№ п/п	Наименование компонента Component name	MV*, а.е.м. Dalton	m/z**	88	ГК-9 GK-9
					доля, отн. % content, rel. %	
Н-алканы/N-alkanes	1	н-гексан/n-hexane	86	57, 43, 41	16,9	–
	2	н-октан/n-octane	114	43, 41, 57	2,2	–
	3	н-декан/n-decane	142	57, 43, 41	26,6	1,8
	4	н-ундекан/n-undecane	156	57, 43, 71	–	6,2
	5	н-додекан/n-dodecane	170	57, 43, 71	22,8	2,2
	6	н-тридекан/n-tridecane	184	57, 43, 71	–	след
	7	н-тетрадекан/n-tetradecane	198	57, 43, 71	9,8	1,5
	8	н-пентадекан/n-pentadecane	212	57, 43, 71	–	2,2
	9	н-гексадекан/n-hexadecane	226	57, 43, 71	3,2	1,2
	10	н-гептадекан/n-heptadecane	240	57, 43, 71	–	след
	11	н-октадекан/n-octadecane	254	57, 43, 71	0,9	–
	12	н-эйкозан/n-eicosan	282	57, 71, 43	0,3	–
	13	н-пентакозан/n-pentacosan	352	57, 71, 43	–	след
	14	н-гексакозан/n-hexacosan	366	57, 71, 43	–	след
	15	н-гептакозан/n-heptacosan	380	57, 43, 71	–	след
Изоалканы/Isoalkanes	16-23	изоалканы (8 соединений) isoalkanes (8 compounds)	н/о		6,2	–
Н-алкены/N-alkenes	24	1-децен/1-decene	140	56, 55, 41	1,1	–
	25	1-додецен/1-dodecene	168	41, 43, 55	2,6	–
	26	алкен/alkene	н/о		0,3	–
	27	1-тетрадецен/1-tetradecene	196	43, 55, 57	1,1	–
	28	1-гексадецен/1-hexadecene	224	43, 41, 55	0,3	–
Каротиноиды (терпены) Carotenoids (terpenes)	29	скавален/squalene	410	69, 81, 41	–	4,8
Ароматические УВ Aromatic HC	30	толуол/toluene	92	91, 92, 65	2,8	12,4
	31	м+п-ксилол/m+p-xylene	106	91, 106, 105	0,6	21,5
	32	о-ксилол/o-xylene	106	91, 106, 105	0,8	3,3
	33	третбутил бензол/tretbutyl benzene	134	119, 91, 134	1	–
Биароматические УВ Biaromatic HC	34	нафталин/naphthalene	128	128,129,127	–	след
Монохлорбензолы Monochlorobenzenes	35	хлорбензол/chlorobenzene	112	112, 77, 114	0,5	–
Амиды/Amides	36	диэтилтолуамид/diethyltoluamide	191	119, 91, 190	–	23,5
Кетоны/Ketones	37	циклопентанон/cyclopentanone	84	55, 28, 84	–	7,2
Эфиры/Ethers	38	бутилацетат/butyl acetate	116	43, 56, 41	–	2,2
Спирты/Alcohols	39	циклопентандиол/cyclopentane diol	102	67, 68, 41	–	2,1
	40	2-этил-гексанол/2-ethylhexanol	130	57, 41, 43	–	7,9
Итого/Total					100	100

Примечание. *MV – молекулярная масса, а.е.м.; **m/z – характерные значения m/z соединения, расположенные от максимального; «–» – компонент не установлен; «след» – компонент идентифицирован только на хроматограмме СИМ (ионная хроматограмма по масс/заряду); «н/о» – структура молекулы соединения не определена.

Note: *MV – molecular weight, dalton; **m/z – characteristic m/z values of the compound located from the maximum; «–» – the component is not identified; «след» – the component is identified only on SIM chromatograms (ion chromatogram by mass/charge); «н/о» – the compound molecule structure is not identified.

Алифатические УВ, к которым относятся алканы, изоалканы и алкены, широко представлены в Карымшинских термах, а в воде Северного участка из алифатических УВ установлены только н-алканы и скавален. При этом относительная концентрация нормальных алканов значительно выше соответствующих им н-алкенов (соединения с одинаковой длиной углеродной цепи), в 9–20 раз. Происхождение этих компонентов расценивается как природное. Кроме этого, наличие 1-гексадецена, который найден в термальной воде из скважины № 88 Карымшинского участка, может быть связано с техногенным загрязнением, так как

этот компонент содержится в буровом растворе, применяемом при бурении скважины. Однако он имеет минимальное относительное содержание – 0,3 отн. %. В Северных источниках кроме алифатических и ароматических УВ были установлены низкомолекулярные кетоны, эфиры и спирты, которые, вместе со скаваленом, имеют, предположительно, биогенный генезис (однако не исключается вклад термокаталитических процессов в их происхождение). Например, как считают некоторые исследователи [9, 25], наличие терпенов в термальных водах, наряду с биогенным происхождением, может быть результатом термогенеза ОВ.

Таким образом, ОВ в Паратунских термальных водах довольно однообразно и представлено в основном низкомолекулярными алифатическими и ароматическими УВ (100 отн. % в Карымшинских источниках, 80 отн. % в Северных), что обусловлено, вероятно, высокой температурой воды. Устойчивость ОВ становится меньше с ростом температуры – в высокомолекулярных соединениях происходит разрыв углеродных связей, в результате чего доля компонентов сложного состава сокращается, а содержание низкомолекулярных УВ наоборот увеличивается [41].

Сравнительный анализ органического вещества в Паратунском, Мутновском и Узонском геотермальных районах. В ходе предшествующих работ был изучен состав ОВ в Мутновской и Узонской гидротермальных системах полуострова Камчатка, в результате чего установлено 57 соединений во флюиде

из скважин Северно-Мутновского и Дачного термальных полей (Мутновский район) и 71 компонент в термальных водах кальдеры Узон. В качестве сравнения были выбраны следующие объекты: скважина № 4Е Дачного термального поля с температурой и давлением на выходе 175 °С и 8,1 бара соответственно и рН 4, глубина скважины 1600 м; скважина № 3 Северо-Мутновского термального поля с температурой на выходе 97 °С и рН 9, глубина скважины 1800 м; термальная вода из скважины № К-4 Восточного термального поля (Узонская гидротермальная система) с температурой на выходе 98,5 °С, глубина скважины 16 м (рис. 1). На рис. 2 представлены гомологические ряды органических соединений и их процентное соотношение в термальных водах Паратунской, Мутновской и Узонской гидротермальных системах.

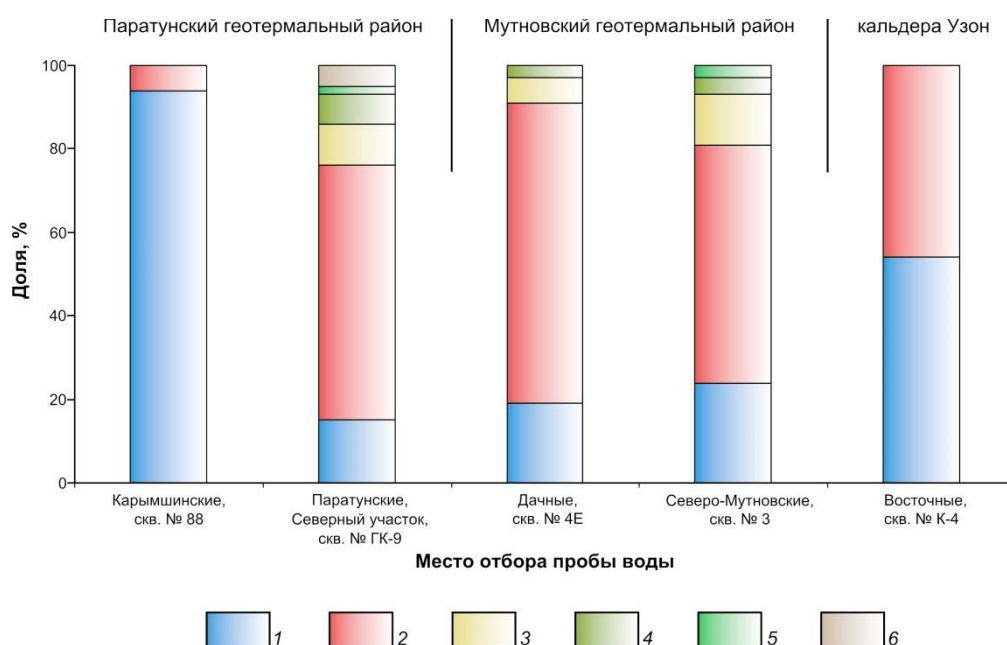


Рис. 2. Гомологические ряды органических соединений в исследуемых гидротермальных системах п-ова Камчатка: 1) алканы, изоалканы, алкены; 2) ароматические УВ (арены, нафталин, хлорбензол, ДЭТА); 3) спирты; 4) альдегиды и кетоны; 5) карбоновые кислоты и эфиры; 6) каротиноиды (терпены)

Fig. 2. Homologous series of organic compounds in the studied hydrothermal systems of the Kamchatka Peninsula: 1) alkanes, isoalkanes, alkenes; 2) aromatic HC (arenes, naphthalene, chlorobenzene, DETA); 3) alcohols; 4) aldehydes and ketones; 5) carboxylic acids and esters; 6) carotenoids (terpenes)

Как видно из представленных данных, состав ОВ в проанализированных пробах имеет схожие черты. При этом наиболее похожи термы Мутновского района и Северного участка Паратунского района (в основном за счет присутствия спиртов, кетонов и эфиров), а также Карымшинские и Узонские термальные воды, где зафиксированы только УВ. В целом в исследуемых водах хорошо заметно преобладание алифатических и ароматических УВ (более 80 отн. % в пробах) над остальными соединениями. Превалирование УВ (алифатических и ароматических) позволяет предполагать большой вклад термогенных процессов в их образование, поскольку такое доминирование зафиксировано в конденсате пароводяной смеси из скважины № 4Е (более 90 отн. %) с температурой

175 °С, при которой жизнь невозможна (производство микробного метана и других низкомолекулярных УВ возможно только до температур 122 °С [42–44]), что исключает происхождение этих компонентов в результате жизнедеятельности и деструкции микроорганизмов. Наличие ОВ в гидротермальных системах может быть связано с действием гидротермальных сверхкритических флюидов (по мере уменьшения давления и температуры при движении к поверхности Земли сверхкритические газы, включая воду, осаждают минералы и УВ) [45].

В исследуемых термальных водах, наряду с общими чертами состава ОВ, есть и определенные различия. Так, среди ароматических УВ в Паратунских термах установлены только толуол, хлорбензол,

нафталин, третбутилбензол, ксилолы и ДЭТА, а в Мутновском и Узонском районах кроме них найдены и другие УВ с ароматической структурой (изомеры нафталина, фенантрена и бифенила, флуорен, этилбензол и другие). Кроме этого, только во флюиде из скважин Мутновского района обнаружены карбоновые кислоты и альдегиды, а в термах Северного участка – сквалены. Отсутствие жирных кислот в Паратунских термальных водах подтверждается и в работе [6].

Молекулярно-массовое распределение n-алканов. Оценка происхождения ОВ в Паратунских термальных водах представляет существенный интерес. При температуре воды 82–88 °С здесь предполагается присутствие микроорганизмов, как это установлено в Нижнепаратунских источниках (где были выявлены термофильные цианобактерии) и в других термальных полях Камчатки [33, 46 и др.]. Поэтому в исследуемых термальных водах, вероятно, содержатся органические соединения биогенного генезиса. Однако в гидротермальных системах возможно также термогенное (т. е. преобразование органических остатков под действием высоких температур) и абиогенное (восстановление оксидов углерода водородом) образование органических соединений (последнее имеет место преимущественно в высокотемпературных гидротермальных системах на дне океанов в результате процессов серпентинизации [47, 48 и др.]).

На сегодняшний день нет надежных критериев определения генезиса УВ. Тем не менее в качестве маркеров происхождения ОВ используют данные по молекулярно-массовому распределению n-алканов, т. к. это единственная группа биогенных компонентов, которая химически устойчива [49, 50]. Характерные максимумы гомологов и их групп указывают на доминирующий источник ОВ. $\Sigma n-C_{10}-C_{14}$ – эти гомологи не являются типичными для живых организмов. По мнению [51], n-алканы $n-C_{10}-C_{14}$ гидротермальной биотой не синтезируются. Их значительное содержание (без резкого преобладания нечетных гомологов) может говорить о низкотемпературном катализе УВ или о процессах термодиссоциации органических остатков. $\Sigma n-C_{15}, n-C_{17}, n-C_{19}$ – соединения, типичные для гидробионтов. N-алканы с длиной углеродной цепи до $n-C_{22}$ и доминированием нечетных гомологов характерны для бактерий. Углеводород $n-C_{25}$ синтезируется цианобактериями и при максимуме может говорить о цианобактериальном происхождении n-алканов. Характерные «растительные» гомологи – $n-C_{25}, n-C_{27}, n-C_{29}, n-C_{31}$, синтезируются как часть эпикутикулярного воска листьев наземных растений [16, 50]. Кроме этого, для расшифровки молекулярно-массового распределения n-алканов применяется ряд критериев (proxies), таких как CPI, ACL, OEP, TAR_{HC} [49, 50, 52]. ACL (Average Chain Length) – средневзвешенное значение длины углеродной цепи установленных n-алканов (показывающее преобладание n-алканов в определенной области, в зависимости от длины углеродной цепи). Индексы нечетности OEP (odd-to-even predominance) – отношение нечетных гомологов к ближайшим четным (CPI рассчитан не был из-за отсутствия высокомолеку-

лярных n-алканов в экстрактах исследуемых вод). $OEP < 1$ и > 1 говорит о доминирующем биогенном источнике ОВ, а близкое к единице может свидетельствовать о глубокой преобразованности ОВ (в частности, в результате процессов термодиссоциации). TAR_{HC} (Terrigenous/Aquatic Ratio) – отношение характерных «растительных» гомологов к «водорослевым» или «бактериальным». $L/Hane$ – отношение низкомолекулярных n-алканов к высокомолекулярным. Подробно об используемых критериях и формулы их расчета можно посмотреть в работе [53]. Кроме этого, при рассмотрении вопроса о происхождении ОВ принимается во внимание наличие или отсутствие характерных биогенных соединений в исследуемых водах (например, стероидов, наличие которых в исследуемых водах не установлено).

Как уже было отмечено, алифатические УВ занимают большую часть от состава ОВ в экстракте Карымшинских термальных вод, при этом основная доля принадлежит именно n-алканам (83 отн. % от общего состава ОВ в пробе), хотя установлены также алкены и изоалканы. Северные источники характеризуются меньшим распространением алифатических УВ, до 20 отн. %, они представлены n-алканами – 15 отн. % и скваленом – 4,8 отн. %. Значительные различия между источниками Северного участка и Карымшинскими наблюдаются и в составе n-алканов (табл. 1). В Карымшинских водах установлены низкомолекулярные УВ состава C_6-C_{20} , при этом присутствуют только четные гомологи (т. е. содержащие четное число атомов углерода в молекуле). Нечетные n-алканы полностью отсутствуют. Это довольно необычно, поскольку в природных водах и в живых организмах (а также в результате химического синтеза) образуются как четные, так и нечетные гомологи в разном соотношении. Подобный феномен был зафиксирован нами также в термальных водах о. Уруп (Курильская островная дуга) [54]. В термальных водах Северного участка наблюдается бимодальный характер распределения n-алканов. Установлены две группы гомологов состава $n-C_{10}-C_{17}$ и $n-C_{25}-C_{27}$ с резким преобладанием первой группы четных и нечетных УВ. Такой профиль распределения наблюдается и в высокотемпературном флюиде из скважин Мутновского геотермального района.

Рассчитанные критерии распределения n-алканов и геохимические индексы приведены в табл. 2. В термальной воде Карымшина зафиксированы только четные n-алканы с короткой цепью (ACL 10.5). Из-за отсутствия нечетных гомологов большинство геохимических индексов рассчитать не удалось. Присутствие в Карымшинских термах исключительно только четных n-алканов может быть обусловлено, вероятно, существованием здесь микроорганизмов, синтезирующих такие гомологи. Например, в растворимой части некоторых прокариот (*Arthrobacter sp.*, *Pseudomonas aeruginosa* RM, *Geobacillus jursasicus*, *Shewanella putrefaciens*) характерно превалирование четных низкомолекулярных n-алканов над нечетными [55].

Таблица 2. Распределение *n*-алканов в рассматриваемых термальных водах

Table 2. Distribution of *n*-alkanes in the thermal waters

Критерии распределения Proxies	Паратунский район Paratunka area		Мутновский район Mutnovka area		Узон Uzon
	скв. 88 well 88	скв. ГК-9 well GK-9	скв. 4Е well 4E	скв. 3 well 3	скв. К-4 well K-4
C_{max}	C_{10}	$C_{11}; C_{26}$	$C_{11}; C_{22}$	$C_{11}; C_{27}$	$C_{10}; C_{24}$
$\Sigma n-C_9-C_{14}, \%$	71,5	77,9	84,9	84,9	59,8
нч/ч C_9-C_{14}	–	1,2	1,5	1,4	0,1
$\Sigma n-C_6-C_{22}, \%$	76,9	95,3	97,6	93,6	84,1
нч/ч $n-C_6-C_{22}$	–	1,4	1,4	1,5	0,3
$\Sigma n-C_{15}, C_{17}, C_{19} \%$ фитопланктон, водоросли phytoplankton, algae	–	11,8	6,3	5,7	15,5
$\Sigma n-C_{21}, C_{23}, C_{25} \%$ водоросли, мхи algae, mosses	–	1,6	2,3	2	7,1
$\Sigma n-C_{27}, C_{29}, C_{31} \%$ растения/plants	–	1,3	–	1,9	–
L/Hane	–	20,3	40,7	14,7	5,3
ОЕР ₁₅	–	1,1	1	1	0,9
ОЕР ₁₇	–	0,8	1	1,2	1,1
ОЕР ₁₉	–	–	0,8	–	–
ОЕР ₂₃	–	–	1	–	–
ОЕР ₂₅	–	1,6	1,4	1,7	1,2
ОЕР ₂₇	–	1,3	–	1,2	–
TAR _{HC}	–	0,1	–	0,3	–
ACL	10,5	12,9	12,4	12,4	14,5

Примечание. нч/ч – отношение нечетных гомологов к четным; «–» – критерий не рассчитан из-за отсутствия гомологов в экстракте.

Note: нч/ч – ratio of odd homologs to even homologs; «–» – the criterion is not calculated due to the absence of homologs in the extract.

Кроме Курильских терм, которые повторяют профиль УВ в термальных водах Карымшина, похожий состав *n*-алканов зафиксирован в термальной воде из скважины К-4 (Узон). В ней установлены и высокомолекулярные *n*-алканы, однако доминируют низкомолекулярные (C_{max} – декан). При этом наблюдается резкое преобладание четных гомологов с ACL 14,5, происхождение которых связано, вероятно, с термогенными процессами (индекс ОЕР_{15,17,25} 0,9–1,2), хотя не исключается вклад бактериальной деятельности в образование УВ. Такое же распределение парафинов зафиксировано в высокотемпературных конденсатах пароводяной смеси из скважин геотермального месторождения Лос Умерос в Мексике, где также значительно преобладают четные *n*-алканы с ACL 13,7–19,8 [12]. Авторы отмечают, что такое распределение УВ характерно для процессов гидротермального изменения/разложения ОВ, а *n*-алканы имеют термогенное происхождение. Преобладание четных *n*-алканов над нечетными гомологами установлено и в нефтепроявлениях кальдеры Узон [2], что связывается авторами с тем, что биологические предшественники нафтидов представляли биомассу с незначительным вкладом остатков высших растений. Происхождение парафинов в термальной воде из скважины К-4 ранее нами рассматривалось преимущественно как биогенное [26, 27], однако более глубокий анализ

молекулярно-массового распределения *n*-алканов и рассчитанные геохимические индексы ОЕР, значение которых близко единице, позволяют предполагать вклад термогенных процессов в образование здесь некоторой части УВ. В работах [2, 4] УВ кальдеры Узон также рассматриваются как продукт гидротермальной переработки биомассы микроорганизмов и остатков растений. Обращает на себя внимание тот факт, что похожий набор УВ установлен в совершенно различных по формированию водах – сульфатно-хлоридные кислые Ключевые, хлоридно-натриевые, глубинного формирования высокотемпературные воды Узона, скважины Карымшина. Этот вопрос еще предстоит детально изучить в будущем.

Термальные воды Северного участка Паратунского района характеризуются резким преобладанием короткоцепочечных *n*-алканов с примерно равным содержанием четных и нечетных гомологов. Доля *n*-алканов с длинной цепью не превышает 5 отн. %. Индексы нечетности в низкомолекулярной области имеют значение около единицы, что, вместе с резким доминированием *n*-алканов до $n-C_{22}$, указывает на то, что основная часть УВ здесь имеет термогенное происхождение (термокаталитическое преобразование органических остатков). Индексы нечетности длинноцепочечных *n*-алканов выше единицы (ОЕР₂₅, 1,6), что указывает на бактериальное участие в образовании этих УВ (пентакозан $n-C_{25}$ типичен для цианобактерий, а в Паратунских термальных водах обитают термофильные цианобактерии [33]). Схожим профилем распределение *n*-алканов обладает высокотемпературный флюид из скважин Мутновского района, где также доминируют низкомолекулярные УВ, образование которых связано с термогенными процессами [27].

Заключение

В результате проведенного исследования ОВ в термальных водах Паратунского геотермального месторождения установлено 40 органических соединений, из них 34 углеводорода. Максимальное распространение получили ароматические (7 компонентов) и алифатические (29 соединений) УВ, в сумме достигающие 100 отн. % в Карымшинских термах и 80 отн. % в термальных водах Северного участка. Ароматические УВ в исследуемых водах имеют, вероятно, термогенное происхождение (сформированные в результате термокаталитического преобразования органических остатков). Алифатические УВ в термах Северного участка представлены исключительно *n*-алканами и скваленом, а в Карымшинских водах – *n*-алканами, изоалканами и *n*-алкенами.

Особенности молекулярно-массового распределения нормальных алканов и рассчитанные геохимические индексы могут свидетельствовать о двух процессах, протекающих в термальных водах Северного участка: 1) происхождение низкомолекулярных *n*-алканов связано с термокаталитическим преобразованием органических остатков (TAR_{HC} 0,1; ОЕР_{15,17} 0,8–1,1); 2) высокомолекулярные *n*-алканы имеют, вероятно, бактериальный генезис (ОЕР₂₅ 1,6). Ка-

рымшинские термальные воды характеризуются специфическим молекулярно-массовым распределением нормальных алканов, выражающимся в присутствии только четных низкомолекулярных гомологов.

Состав ОВ и молекулярно-массовое распределение УВ в Паратунском, Мутновском и Узонском геотермальных районах имеет общие черты, заключающиеся в резком преобладании ароматических и алифатических УВ (более 80 отн. %) над другими соединениями. При этом наибольшего сходства достигают термы Северного участка с флюидом Мутновского района, которое состоит в наличии, кроме УВ термогенного происхождения, еще и кислородсодержащих соединений (спиртов и кетонов). Состав ОВ Ка-

рымшинских терм подобен органическому веществу Узонских термальных вод, где обнаружены исключительно алифатические и ароматические УВ.

Автор благодарит кандидата геолого-минералогических наук Владимира Николаевича Компаниченко, под руководством которого проводились полевые исследования гидротермальных систем Камчатки, за помощь в обсуждении полученных результатов. Автор выражает благодарность ведущему инженеру Краевого центра экологического мониторинга и прогнозирования ЧС г. Хабаровска Владимиру Львовичу Рапопорту за помощь в выполнении анализов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бескровный Н.С., Лебедев Б.А. Нефтепроявление в кальдере вулкана Узон // Доклады АН СССР. – 1971. – Т. 201. – № 4. – С. 953–956.
2. Углеводороды из вулканического района. Нефтепроявления в кальдере вулкана Узон на Камчатке / Э.М. Галимов, В.С. Севастьянов, Г.А. Карпов, А.И. Камалева, О.В. Кузнецова, И.В. Коноплева, Л.Н. Власова // Геохимия. – 2015. – № 12. – С. 1059–1068. DOI: 10.7868/S0016752515120043
3. Карцев А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 1972. – 280 с.
4. Кальдера вулкана Узон (Камчатка) – уникальная природная лаборатория современного нафтидогенеза / А.Э. Конторович, С.Б. Бортникова, Г.А. Карпов, В.А. Каширцев, Е.А. Костырева, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 8. – С. 986–990.
5. Геохимия нафтидов из локализованных на суше гидротермальных источников и вопросы их генезиса (Узон, Йеллоустон, Новая Зеландия) / Е.А. Фурсенко, В.А. Каширцев, А.Э. Конторович, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 918–930.
6. Швеиц В.М., Кириухин В.К. Органические вещества в минеральных лечебных водах // Бюллетень МОИП. Отделение геологии. – 1974. – Т. 6. – С. 83–96.
7. Органические вещества в минеральных водах горноскладчатых областей центральной Азии / Г.М. Шпейзер, Ю.К. Васильева, Г.М. Гановичева, Л.М. Минеева, В.А. Родионова, И.С. Ломоносов, Ванг Янсинь // Геохимия. – 1999. – № 3. – С. 302–311.
8. Bazhenova O.K., Arefiev O.A., Frolov E.B. Oil of the volcano Uzon caldera, Kamchatka // Organic Geochemistry. – 1998. – V. 29. – № 1–3. – P. 421–428. DOI: 10.1016/S0146-6380(98)00129-6
9. Organic compounds in surface and groundwaters in the surrounding of a Mexican geothermal reservoir; case study Los Hornos, Puebla / B.E. García-Sánchez, G.M. Vara-Castro, Th. Kretzschmar, J.I. Sánchez-Avila // Applied Geochemistry. – 2022. – V. 147. – 105442. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105442
10. Dissolved organic compounds in geothermal fluids used for energy production: a review / A. Leins, D. Bregnard, A. Vieth-Hillebrand, P. Junier, S. Regenspurg // Geothermal Energy. – 2022. – V. 10. – № 9. DOI: 10.1186/s40517-022-00220-8
11. Organic compounds in vent fluids from Yellowstone Lake, Wyoming / C. Ong, A.P.G. Fowler, Jr. W.E. Seyfried, T. Sun, Q. Fu // Organic Geochemistry. – 2021. – V. 159. – 104275. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2021.104275
12. Distribution and origin of organic compounds in the condensates from a Mexican high-temperature geothermal field / J.I. Sánchez-Avila, B.E. García-Sánchez, G.M. Vara-Castro, Th. Kretzschmar // Geothermics. – 2021. – V. 89. – 101980. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101980
13. Sunguti A.E., Kibet J.K., Kinyanjui T.K. A review of the status of organic pollutants in geothermal waters // Journal of Nature, Science & Technology. – 2021. – V. 4. – P. 19–28. DOI: 10.36937/janset.2021.004.005
14. Вассоевич Н.Б. Образование нефти в терригенных отложениях (на примере чокракско-караганских слоев Терского передового прогиба) // Вопросы образования нефти. – Л.: Гостоптехиздат, 1958. – С. 9–220.
15. Кудрявцев Н.А. Состояние вопроса о генезисе нефти на 1966 г. // Всесоюзное совещание по генезису нефти и газа. – М.: Недра, 1967. – С. 262–292.
16. Hunt J.M. Petroleum geochemistry and geology. – San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1979. – 617 p.
17. The production of methane, hydrogen, and organic compounds in ultramafic-hosted hydrothermal vents of the mid-atlantic ridge / C. Konn, J.L. Charlou, N.G. Holm, O. Mousis // Astrobiology. – 2015. – V. 15. – № 5. – P. 381–399. DOI: 10.1089/ast.2014.1198
18. Rushdi A.I., Simoneit B.R.T. Abiotic condensation synthesis of glyceride lipids and wax esters under simulated hydrothermal conditions // Origins of Life and Evolution of Biosphere. – 2006. – V. 36. – P. 93–108. DOI: 10.1007/s11084-005-9001-6
19. Самая молодая нефть Земли / С.Д. Варфоломеев, Г.А. Карпов, Г.А. Синал, С.М. Ломакин, Е.Н. Николаев // Доклады академии наук. – 2011. – Т. 438. – № 3. – С. 345–347.
20. Исидоров В.А., Зенкевич И.Г., Карпов Г.А. Летучие органические соединения в парогазовых выходах некоторых вулканов и гидротермальных систем Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 3. – С. 19–25.
21. Калинин М.К. Генезис микрофтепроявлений кальдеры вулкана Узон (Восточная Камчатка) // Преобразования органического вещества в современных и ископаемых осадках и основные этапы генерации свободных углеводородов. – М.: ВНИГНИ, 1975. – С. 50–58.
22. Коноплева И.В., Власова Л.Н., Немченко Т.Н. Исследование генезиса нефтей Восточной Камчатки по углеводородам-биомаркерам // Геохимия. – 2018. – № 7. – С. 709–717. DOI: 10.1134/S001675251807004X
23. Мархинин Е.К. Вулканы и жизнь. – М.: Мысль, 1980. – 196 с.
24. Аминокислоты в гидротермах Южной Камчатки / Л.М. Мухин, В.Б. Бондарев, Е.А. Вакин, Н.И. Ильохина, В.И. Калпиченко, Е.И. Милехина, Э.Н. Сафонова // Доклады академии наук СССР. – 1979. – Т. 244. – № 4. – С. 974–977.
25. Simoneit B.R.T., Deamer D.W., Kompanichenko V.N. Characterization of hydrothermally generated oil from the Uzon caldera, Kamchatka // Applied Geochemistry. – 2009. – V. 24. – P. 303–309.
26. Компаниченко В.Н., Потурай В.А., Карпов Г.А. Органические соединения в термальных водах Мутновского района и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. – 2016. – № 5. – С. 35–50. DOI: 10.7868/S0203030616050035
27. Потурай В.А., Компаниченко В.Н. Состав и распределение предельных углеводородов в термальных водах и пароводяной смеси Мутновского геотермального района и кальдеры Узон (Камчатка) // Геохимия. – 2019. – Т. 64. – № 1. – С. 79–88. DOI: 10.31857/S0016-752564179-88
28. Kompanichenko V.N. Exploring the Kamchatka geothermal region in the context of life's beginning // Life. – 2019. – V. 9. – 41. DOI: 10.3390/life9020041
29. Kompanichenko V.N., Poturay V.A., Rapoport V.L. Organic matter in hydrothermal systems on the Russian Far East in the context of prebiotic chemistry // Origin of Life and Evolution of Biospheres. – 2010. – V. 40. – № 6. – P. 516–517.
30. Потурай В.А. Органическое вещество в гидротермальных системах разных типов и обстановки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 6–16. DOI: 10.18799/24131830/2018/11/204

31. Условия формирования и моделирование эксплуатации Паратунского геотермального месторождения (Камчатка) / А.В. Кирюхин, Н.П. Асаулова, Л.А. Ворожейкина, П.О. Воронин, Н.В. Обора, П.А. Кирюхин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2017. – № 3. – С. 16–30.
32. Геохимические особенности распределения основных и редкоземельных элементов в Паратунской и Большебанной гидротермальных системах Камчатки / О.В. Чудаев, Г.А. Челноков, И.В. Брагин, Н.А. Харитонов, С.Н. Рычагов, А.А. Нуждаев, И.А. Нуждаев // Тихоокеанская геология. – 2016. – Т. 35. – № 6. – С. 102–119.
33. Ефимова М.В., Кузякина Т.И. Альгобактериальные сообщества плавающих матов Паратунской гидротермальной системы Камчатки // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 12. – С. 87–88.
34. McCollom T.M., Seewald J.S., Simoneit B.R.T. Reactivity of monocyclic aromatic compounds under hydrothermal conditions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2001. – V. 65. – P. 455–468. DOI: 10.1016/S0016-7037(00)00533-0
35. Volatile organic compounds (VOCs) in soil gases from Solfatara crater (Campi Flegrei, southern Italy): geogenic source(s) vs. Biogeochemical processes / F. Tassi, S. Venturi, J. Cabassi, F. Capecchiacci, B. Nisi, O. Vaselli // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 56. – P. 37–49. DOI: 10.1016/J.APGEOCHEM.2015.02.005
36. Szabo I., Varga C. Finding possible pharmacological effects of identified organic compounds in medicinal waters (BTEX and phenolic compounds) // *International J. Biometeorology*. – 2019. – V. 64. – № 6. – P. 989–995. DOI: 10.1007/s00484-019-01808-9
37. Aquathermolysis of humic and fulvic acids: Simulation of organic matter maturation in hot thermal waters / J. Fekete, C. Sajgó, Á. Kramarics, Z. Eke, K. Kovács, Z. Kárpáti // *Organic Geochemistry*. – 2012. – V. 53. – P. 109–118. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2012.07.005
38. Nye J.J., Shock E.L., Hartnett H.E. A novel PARAFAC model for continental hot springs reveals unique dissolved organic carbon compositions // *Organic Geochemistry*. – 2020. – V. 141. – P. 103964. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2019.103964
39. Нехаев А.И., Максимов А.Л. Получение ароматических углеводородов из биомассы (обзор) // *Нефтехимия*. – 2021. – Т. 61. – № 1. – С. 21–42. DOI: 10.31857/S0028242121010020
40. Gribble G.W. Halogenated organics // *Investigacion y ciencia*. – 2005. – V. 346. – P. 78–84.
41. Сорохтин Н.О., Лобковский Л.И., Козлов Н.Е. Коромантийный цикл углерода и происхождение абиогенных углеводородов // *Океанология*. – 2020. – Т. 60. – № 2. – С. 281–292. DOI: 10.31857/S0030157420020100
42. Etiope G., Sherwood Lollar B. Abiotic methane on earth // *Reviews of Geophysics*. – 2013. – V. 51. – P. 276–299. DOI: 10.1002/rog.20011
43. Reeves E.P., Fiebig J. Abiotic synthesis of methane and organic compounds in Earth's lithosphere // *Elements*. – 2020. – V. 16. – № 1. – P. 25–31.
44. Cell proliferation at 122 °C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation / K. Takai, K. Nakamura, T. Toki, U. Tsunogai, M. Miyazaki, J. Miyazaki, H. Hirayama, S. Nakagawa, T. Nunoura, K. Horikoshi // *PNAS*. – 2008. – V. 105. – P. 10949–10954. DOI: 10.1073/pnas.0712334105
45. Абрамов В.Ю., Пятаев А.А. Возможность формирования углеводородных систем термометаморфического генезиса и роль гидротермальных сверхкритических флюидов // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2021. – Т. 16. – № 1. – № 8.
46. Кальдерные микроорганизмы / Г.А. Заварзин, Г.А. Карпов, В.М. Горленко, Р.С. Головачева, Л.М. Герасименко, Е.А. Бонч-Осмоловская, В.К. Орлеанский. – М.: Наука, 1989. – 120 с.
47. Abiotic formation of hydrocarbons under hydrothermal conditions: constraints from chemical and isotope data / Q. Fu, B. Sherwood Lollar, J. Horita, G. Lacrampe-Couloume, W.E. Seyfried // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2007. – V. 71. – P. 1982–1998. DOI: 10.1016/j.gca.2007.01.022
48. Holm N.G., Charlou J.L. Initial indications of abiotic formation of hydrocarbons in the Rainbow ultramafic hydrothermal system, Mid-Atlantic Ridge // *Earth and Planetary Science Lett.* – 2001. – V. 191. – P. 1–8. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00397-1
49. Unusual aliphatic hydrocarbon profiles at hydrothermal vent fields of the Central and Southeast Indian Ridges and Mid-Indian Basin / U.U. Umoh, L. Li, J. He, L. Chen, L. Dong, G. Jia, N. Lahajnar, G. Massoth, U. Schwarz-Schampera // *Deep-Sea Research Part II*. – 2021. – V. 194. – P. 104996. DOI: 10.1016/j.dsr2.2021.104996
50. Chemical composition of n-alkanes and microbially mediated n-alkane degradation potential differ in the sediments of Qinghai-Tibetan lakes with different salinity / B. Wang, J. Yang, H. Jiang, G. Zhang, H. Dong // *Chemical Geology*. – 2019. – V. 524. – P. 37–48. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.05.038
51. Шульга Н.А., Пересыпкин В.И. О генезисе углеводородов в гидротермальных отложениях полей Лост Сити и Рэйнбоу (Срединно-Атлантический хребет) // *ДАН*. – 2012. – Т. 445. – № 2. – С. 196–199.
52. Bray E.E., Evans E.D. Distribution of n-paraffines as a clue to recognition of source beds // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1961. – V. 22. – № 1. – P. 2–15. DOI: 10.1016/0016-7037(61)90069-2
53. Потурай В.А. Органическое вещество и молекулярно-массовое распределение углеводородов в Анненских термальных водах (Дальний Восток, Россия) // *Геология и Геофизика*. – 2022. – Т. 63. – № 10. – С. 1352–1368. DOI: 10.15372/GiG2021150
54. Компаниченко В.Н., Потурай В.А. Органические соединения средней летучести в термальных полях Курильского острова Уруп и полуострова Камчатка: сравнительный анализ // *Геохимия*. – 2022. – Т. 67. – № 3. – С. 227–237. DOI: 10.31857/S0016752522010071
55. Юсупова А.А., Гируц М.В., Гордадзе Г.Н. Прокариоты как источник нефтяных углеводородов-биомаркеров // *Доклады Российской академии наук. Науки о земле*. – 2021. – Т. 497. – № 1. – С. 30–36. DOI: 10.31857/S2686739721030130

Поступила: 07.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 20.03.2023 г.

Информация об авторах

Потурай В.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии, генетики и эволюции Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

UDC 550.46(282.257.21)

ORGANIC MATTER IN THE PARATUNKA GEOTHERMAL FIELD (KAMCHATKA) THERMAL WATERS

Valery A. Poturay¹,
poturay85@yandex.ru

¹ Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
4, Sholem-Aleichem street, Birobidzhan, 679000, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to obtain actual data on the composition of organic compounds in thermal mineral waters. Hydrothermal systems contain different classes of organic matter, its composition in the Far East thermal waters being poorly investigated. The organic matter study is primarily aimed at elucidating the mechanisms of organic components transformation under high temperatures and pressure. This study contributes to deeper understanding of the processes occurring in the system «water–rock–organic matter».

The main aim of the research is to determine the organic compounds composition and genesis in the Paratunka geothermal area (Northern and Karymshin sites) thermal waters; estimation of the hydrocarbons molecular weight distribution; compare the obtained data with that for other hydrothermal systems of Kamchatka.

Objects: the Paratunka hydrothermal system (thermal water from deep wells in the Northern and Karymshin areas), the Mutnovka and Uzon hydrothermal systems (steam-water mixture from deep wells in the Dachnoe and North Mutnovskaya thermal fields, and thermal water from shallow wells in the Eastern thermal field).

Methods: field routes, solid-phase extraction, capillary gas chromatography-mass spectrometry, calculation of geochemical hydrocarbon distribution indices.

Results. In the Paratunka geothermal area thermal waters 40 organic compounds are found, which belong to 11 homological series. Aromatic and aliphatic hydrocarbons of thermogenic (formed as a result of thermocatalytic transformation of organic residues) and bacterial origin reach their maximum distribution. The specific molecular-weight distribution of normal alkanes showing only even low-molecular-weight homologues is characteristic of the Karymshin thermal waters. Comparison of the data with the results of the study of organic matter in Kamchatka (the Paratunka, Mutnovka, and Uzon geothermal areas) demonstrates a great similarity of main organic components composition, all of them showing a sharp predominance of aliphatic and aromatic hydrocarbons.

Key words:

Kamchatka Peninsula, hydrothermal system, organic matter, hydrocarbons, molecular weight distribution, genesis.

The author expresses his gratitude to Vladimir Kompanichenko, Cand. Sc., who led the Kamchatka hydrothermal systems field studies, for his assistance in discussing the research results. He is also grateful to Vladimir L. Rapoport, a leading engineer of the Khabarovsk regional center for ecological monitoring and forecasting of emergencies, for his help in performing the analyses.

The study was carried out within the framework of the Institute for complex analysis of regional problems FEB RAS state assignment.

REFERENCES

- Beskrovny N.S., Lebedev B.A. Nefteproyavlenie v kaldere vulkana Uzon [The oil manifestation in the caldera of the Uzon volcano]. *Doklady akademii nauk SSSR*, 1971, vol. 201, no. 4, pp. 953–956.
- Galimov E.M., Sevastyanov V.S., Kamaleeva A.I., Kuznetsova O.V., Konopleva I.V., Vlasova L.N., Karpov G.A. Hydrocarbons from a volcanic area. Oil seeps in the Uzon caldera, Kamchatka. *Geochemistry International*, 2015, no. 12, pp. 1019–1027.
- Karcev A.A. *Gidrogeologiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Hydrogeology of oil and gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 280 p. DOI: 10.7868/S0016752515120043
- Kontorovich A.E., Bortnikova S.B., Kashirtsev V.A., Kostyreva E.A., Fomin A.N., Karpov G.A. Uzon volcano caldera (Kamchatka): a unique natural laboratory of the present-day naphthide genesis. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 768–772.
- Fursenko E.A., Kashirtsev V.A., Kontorovich A.E., Fomin A.N. Geokhimiya naftidov iz lokalizovannykh na sushe gidrotermalnykh istochnikov i voprosy ikh genezisa (Uzon, Ellouston, Novaya zelandiya) [Naphthides of continental hydrotherms (Uzon, Yellowstone, New Zealand): geochemistry and genesis]. *Russian Geology Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 726–736.
- Shvets V.M., Kiryukhin V.K. Organicheskie veshchestva v mineralnykh lechebnykh vodakh [Organic substances in mineral medicinal waters]. *MOIP Bulletin. Department of Geology*, 1974, vol. 6, pp. 83–96.
- Shpeizer G.M., Vasil'eva Yu.K., Ganovicheva G.M., Mineeva L.M., Rodionova V.A., Lomonosov I.S., Wang Yansin. Organic matter in the mineral waters of orogenic regions of Central Asia. *Geochemistry International*, 1999, vol. 37, no. 3, pp. 259–267.
- Bazhenova O.K., Arefiev O.A., Frolov E.B. Oil of the volcano Uzon caldera, Kamchatka. *Organic Geochemistry*, 1998, vol. 29, no. 1–3, pp. 421–428. DOI: 10.1016/S0146-6380(98)00129-6
- Garcia-Sanchez B.E., Vara-Castro G.M., Kretzschmar Th., Sanchez-Avila J.I. Organic compounds in surface and groundwaters in the surrounding of a Mexican geothermal reservoir; case study Los Humeros, Puebla. *Applied Geochemistry*, 2022, vol. 147, 105442. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105442
- Leins A., Bregnard D., Vieth-Hillebrand A., Junier P., Regenspurg S. Dissolved organic compounds in geothermal fluids used for energy production: a review. *Geothermal Energy*, 2022, vol. 10, no. 9. DOI: 10.1186/s40517-022-00220-8
- Ong C., Fowler A.P.G., Seyfried Jr. W.E., Sun T., Fu Q. Organic compounds in vent fluids from Yellowstone Lake, Wyoming. *Organic Geochemistry*, 2021, vol. 159, 104275. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2021.104275
- Sanchez-Avila J.I., Garcia-Sanchez B.E., Vara-Castro G.M., Kretzschmar T. Distribution and origin of organic compounds in the condensates from a Mexican high-temperature geothermal field. *Geothermics*, 2021, vol. 89, 101980. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101980
- Sunguti A.E., Kibet J.K., Kinyanjui T.K. A review of the status of organic pollutants in geothermal waters. *Journal of Nature, Science & Technology*, 2021, vol. 4, pp. 19–28. DOI: 10.36937/janset.2021.004.005

14. Vassoevich N.B. Obrazovanie nefi v terrigennykh otlozheniyakh (na primere chokrasko-karaganskikh sloev Terskogo peredovogo progiba) [Oil Formation in Terrigenous Sediments (Case Study of Chokrak-Karagan Layers of the Tersky Advanced Trough)]. *Voprosy obrazovaniya nefi* [Oil formation issues]. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1958. pp. 9–220.
15. Kudryavtsev N.A. Sostoyaniye voprosa o genezise nefi na 1966 g. [The state of the question of the genesis of oil as of 1966.]. *Vsesoyuznoe soveshchanie po genezisu nefi i gaza* [All-Union Meeting on the Genesis of Oil and Gas]. Moscow, Nedra Publ., 1967. pp. 262–292.
16. Hunt J.M. *Petroleum geochemistry and geology*. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1979. 617 p.
17. Konn C., Charlou J.L., Holm N.G., Mousis O. The production of methane, hydrogen, and organic compounds in ultramafic-hosted hydrothermal vents of the mid-atlantic ridge. *Astrobiology*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 381–399. DOI: 10.1089/ast.2014.1198
18. Rushdi A.I., Simoneit B.R.T. Abiotic condensation synthesis of glyceride lipids and wax esters under simulated hydrothermal conditions. *Origins of Life and Evolution of Biosphere*, 2006, vol. 36, pp. 93–108. DOI: 10.1007/s11084-005-9001-6
19. Varfolomeev S.D., Lomakin S.M., Nikolaev E.N., Karpov G.A., Sinal G.A. The youngest natural oil on Earth. *Doklady Chemistry*, 2011, vol. 438, no. 1, pp. 144–147.
20. Isidorov V.A., Zenkevich I.G., Karpov G.A. Letuchie organicheskie soedineniya v parogazovykh vykhodakh nekotorykh vulkanov i gidrotermalnykh sistem Kamchatki [Volatile organic compounds in steam-gas outflows of several volcanoes and hydrothermal systems in Kamchatka]. *Journal of Volcanology and Seismology*, 1992, vol. 13, no. 3, pp. 287–293.
21. Kalinko M.K. Genezis mikronefteproyavleniy kaldery vulkana Uzon (Vostochnaya Kamchatka) [Genesis of micro-oil occurrences in the Uzon Volcano Caldera (Eastern Kamchatka)]. *Preobrazovaniya organicheskogo veshchestva v sovremennykh i iskopaemykh osadkakh i osnovnye etapy generatsii svobodnykh uglevodородов* [Transformations of organic matter in modern and fossil sediments and the main stages of free hydrocarbon generation]. Moscow, VNIGNI Publ., 1975. pp. 50–58.
22. Konopleva I.V., Vlasova L.N., Nemchenko T.N. Genesis of oils in Eastern Kamchatka: evidence from hydrocarbon biomarkers. *Geochemistry International*, 2018, vol. 56, no. 7, pp. 735–742. DOI: 10.1134/S001675251807004X
23. Marhinin E.K. *Vulkany i zhizn* [Volcanoes and life]. Moscow, Mysl Publ., 1980. 196 p.
24. Mukhin L.M., Bonlarev V.B., Vakin E.A., Ilyuhina N.I., Kalinichenko V.I., Milekhina E.I., Safonova E.N. Aminokisloty v gidrotermakh Yuzhnoy Kamchatki [Amino acids in the hydrothermal waters of South Kamchatka]. *Doklady akademii nauk SSSR*, 1979, vol. 244, no. 4, pp. 974–977.
25. Simoneit B.R.T., Deamer D.W., Kompanichenko V.N. Characterization of hydrothermally generated oil from the Uzon caldera, Kamchatka. *Applied Geochemistry*, 2009, vol. 24, pp. 303–309.
26. Kompanichenko V.N., Poturay V.A., Karpov G.A. Organic compounds in thermal water: the Mutnovskii area and the Uzon caldera. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 305–319. DOI: 10.1134/S0742046316050031
27. Poturay V.A., Kompanichenko V.N. Composition and distribution of saturated hydrocarbons in the thermal waters and vapor-water mixture of the Mutnovskii geothermal field and Uzon caldera, Kamchatka. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 1, pp. 74–82. DOI: 10.1134/S0016702919010087
28. Kompanichenko V.N. Exploring the Kamchatka geothermal region in the context of life's beginning. *Life*, 2019, vol. 9, no. 41. DOI: 10.3390/life9020041
29. Kompanichenko V.N., Poturay V.A., Rapoport V.L. Organic matter in hydrothermal systems on the Russian Far East in the context of prebiotic chemistry. *Origin of Life and Evolution of Biospheres*, 2010, vol. 40, no. 6, pp. 516–517.
30. Poturay V.A. Organic matter in hydrothermal systems of the Far East of different types and situations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 6–16. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2018/11/204
31. Kiryuhin A.V., Asaulova N.P., Vorozhejkina L.A., Voronin P.O., Obora N.V., Kiryuhin P.A. Formation conditions and modeling of the Paratunsky geothermal field (Kamchatka). *Geoekologiya*, 2017, no. 3, pp. 16–30. In Rus.
32. Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Rychagov S.N., Nuzhdaev A.A., Nuzhdaev I.A. Geochemical features of major and rare-earth element behavior in the Paratunka and Bol'shebanniy hydrothermal systems of Kamchatka. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2016, vol. 10, no. 6, pp. 458–475.
33. Efimova M.V., Kuzjakina T.I. Algebacterial communities of floating mats of the Paratunsky hydrothermal system of Kamchatka. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2004, no. 12, pp. 87–88. In Rus.
34. McCollom T.M., Seewald J.S., Simoneit B.R.T. Reactivity of monocyclic aromatic compounds under hydrothermal conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, vol. 65, pp. 455–468. DOI: 10.1016/S0016-7037(00)00533-0
35. Tassi F., Venturi S., Cabassi J., Capecciacci F., Nisi B., Vaselli O. Volatile organic compounds (VOCs) in soil gases from Solfatara crater (Campi Flegrei, southern Italy): geogenic source(s) vs. Biogeochemical processes. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 56, pp. 37–49. DOI: 10.1016/J.APGEOCHEM.2015.02.005
36. Szabo I., Varga C. Finding possible pharmacological effects of identified organic compounds in medicinal waters (BTEX and phenolic compounds). *International J. Biometeorology*, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 989–995. DOI: 10.1007/s00484-019-01808-9
37. Fekete J., Sajgó C., Kramarics Á., Eke Z., Kovács K., Kárpáti Z. Aquathermolysis of humic and fulvic acids: simulation of organic matter maturation in hot thermal waters. *Organic Geochemistry*, 2012, vol. 53, pp. 109–118. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2012.07.005
38. Nye J.J., Shock E.L., Hartnett H.E. A novel PARAFAC model for continental hot springs reveals unique dissolved organic carbon compositions. *Organic Geochemistry*, 2020, vol. 141, 103964. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2019.103964
39. Nekhaev A.I., Maksimov A.L. Obtaining aromatic hydrocarbons from biomass (review). *Petroleum Chemistry*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 21–42. In Rus. DOI: 10.31857/S0028242121010020
40. Gribble G.W. Halogenuros organicos [Organic halogenides]. *Investigacion y ciencia*, 2005, vol. 346, pp. 78–84.
41. Sorokhtin N.O., Lobkovsky L.I., Kozlov N.E. The crust–mantle carbon cycle and origin of abiogenic hydrocarbons. *Oceanology*, 2020, vol. 60, no. 2, pp. 248–258. DOI: 10.31857/S0030157420020100
42. Etiope G., Sherwood Lollar B. Abiotic methane on earth. *Reviews of Geophysics*, 2013, vol. 51, pp. 276–299. DOI: 10.1002/rog.20011
43. Reeves E.P., Fiebig J. Abiotic synthesis of methane and organic compounds in Earth's lithosphere. *Elements*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 25–31.
44. Takai K., Nakamura K., Toki T., Tsunogai U., Miyazaki M., Miyazaki J., Hirayama H., Nakagawa S., Nunoura T., Horikoshi K. Cell proliferation at 122°C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *PNAS*, 2008, vol. 105, pp. 10949–10954. DOI: 10.1073/pnas.0712334105
45. Abramov V.Yu., Pyataev A.A. The possibility of hydrocarbon systems formation by thermometamorphical genesis and the role of hydrothermal super critical fluids. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*, 2021, vol. 16, no. 1, no. 8. In Rus.
46. Zavarzin G.A., Karpov G.A., Gorlenko V.M., Golovacheva R.S., Gerasimenko L.M., Bonch-Osmolovskaya E.A., Orleanskij V.K. *Kaldernye mikroorganizmy* [Caldera microorganisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 120 p.
47. Fu Q., Sherwood Lollar B., Horita J., Lacrampe-Couloume G., Seyfried W.E. Abiotic formation of hydrocarbons under hydrothermal conditions: Constraints from chemical and isotope data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, vol. 71, pp. 1982–1998. DOI: 10.1016/j.gca.2007.01.022
48. Holm N.G., Charlou J.L. Initial indications of abiotic formation of hydrocarbons in the Rainbow ultramafic hydrothermal system, Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Lett.*, 2001, vol. 191, pp. 1–8. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00397-1
49. Umoh U.U., Li L., He J., Chen L., Dong L., Jia G., Lahajnar N., Massoth G., Schwarz-Schampera U. Unusual aliphatic hydrocarbon profiles at hydrothermal vent fields of the Central and Southeast Indian Ridges and Mid-Indian Basin. *Deep-Sea Research Part II*, 2021, vol. 194, 104996. DOI: 10.1016/j.dsr2.2021.104996

50. Wang B., Yang J., Jiang H., Zhang G., Dong H. Chemical composition of n-alkanes and microbially mediated n-alkane degradation potential differ in the sediments of Qinghai-Tibetan lakes with different salinity. *Chemical Geology*, 2019, vol. 524, pp. 37–48. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.05.038
51. Shulga N.A., Peresypkin V.I. The genesis of hydrocarbons in hydrothermal deposits of the Lost City and Rainbow fields (Mid-Atlantic Ridge). *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 445, no. 1, pp. 879–882.
52. Bray E.E., Evans E.D. Distribution of n-paraffines as a clue to recognition of source beds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1961, vol. 22, no. 1, pp. 2–15. DOI: 10.1016/0016-7037(61)90069-2
53. Poturay V.A. Organic matter and molecular-weight distribution of hydrocarbons in the annenskoe thermal waters (Far East, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 10, pp. 1119–1132. DOI: 10.2113/RGG20204311
54. Kompanichenko V.N., Poturay V.A. Organic compounds of medium volatility in the thermal fields of Urup Island, Kuriles, and the Kamchatka Peninsula: a comparative analysis. *Geochemistry International*, 2022, vol. 60, no. 3, pp. 256–265. DOI: 10.1134/S0016702922010074
55. Yusupova A.A., Giruc M.V., Gordadze G.N. Prokaryotes as a source of petroleum hydrocarbons. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 497, no. 1, pp. 211–216. DOI: 10.31857/S2686739721030130

Received: 07 February 2023.

Reviewed: 20 March 2023.

Information about the authors

Valery A. Poturay, Cand. Sc., senior associate, Institute for Complex Analysis of Regional Problems FEB RAS.

УДК 551.578.46: 550.42

ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ СНЕГОВОЙ ПЫЛИ ТЮМЕНИ И ТОБОЛЬСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Захарченко Александр Викторович¹,
avzakh@gmail.com

Пасько Ольга Анатольевна²,
o.pasko@noironline.ru

Тигеев Александр Анатольевич¹,
ttruubbaa@mail.ru

¹ Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера,
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

² Национальный открытый институт г. Санкт-Петербург,
Россия, 197183, г. Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая, 6.

Актуальность. Сформированы новые методические подходы оценки аэрозольной миграции веществ и выявления фоновых значений территорий, удаленных от источника загрязнения.

Целью работы является сравнительный анализ кластеров содержания микроэлементов твердой фазы снега в близко расположенных городах Тюмень и Тобольск относительно чистых фоновых и подверженных техногенному воздействию территорий.

Материалы: микроэлементы твердой фазы снегового покрова.

Методы: химико-аналитический метод для определения содержания микроэлементов, иерархический кластерный метод при анализе геохимических спектров, вероятностно-статистический метод.

Результаты. Условно-фоновый кластер С6 присутствует как в Тобольске (22,6 %), так и в Тюмени (11,7 %), а С5 – 13 % в Тобольске и 8 % в Тюмени. Специфичный тобольский техногенный кластер – С8 (48 %) с преобладанием рассеянных элементов. Этот кластер присутствует в Тюмени (2 точки), что указывает на возможность переноса аэрозолей между городами. Техногенные кластеры (С7, С1) различаются по форме геохимического спектра: в одних преобладают тяжелые металлы, в других – рассеянные микроэлементы (С8); то же самое относится к условно-фоновым пробам. Специфический техногенный тюменский кластер С4 выделяется высокими значениями Си и Мо. Для выделенных условно фоновых кластеров характерно низкое содержание микроэлементов; в одних кластерах присутствуют тяжелые металлы, в других – Sc, Cr, Ni, Zn, Cd. При использовании в расчетах кластеров с низким содержанием микроэлементов суммарный показатель загрязнения снега в Тобольске достигает высокого и опасного уровня загрязнения (60,8–83,7), который для Тюмени становится средним и умеренно опасным. Сравнительный анализ кластеров геохимических спектров содержания микроэлементов в снеговой пыли городских и фоновых территорий позволяет более обоснованно оценить уровень загрязнения микроэлементами.

Ключевые слова:

снежный покров, твердые аэрозоли, иерархический кластерный анализ, микроэлементы, региональный перенос, геохимический спектр.

Введение

Содержание микроэлементов снеговой пыли и снеговых вод изучено в Западной Сибири [1–7]. Тяжелые металлы накапливаются на поверхности твердых аэрозольных частиц, переносятся в атмосферном воздухе в виде пыли и осаждаются в снеговом покрове. Этот процесс зависит от множества естественных и антропогенных факторов. Место выпадения твердых аэрозолей определяет преимущественно географический фактор. В зимний период региональные естественные источники поступления пыли ограничены из-за промерзания почв и ближайших морей. Особое значение приобретает близость к южным пустынным территориям, подверженным ветровой эрозии. С этих мест происходит перенос твердых аэрозольных частиц на тысячи километров на север. Для Западной Сибири характерно снижение содержания микроэлементов твердой фракции снега в направлении от степных районов на север к среднетаежным лесам.

Актуальность работы обуславливается формированием новых методических подходов к пространственной оценке аэрозольной миграции веществ в атмосферном воздухе при использовании кластерного анализа геохимических спектров твердой фазы снежного покрова [8, 9]. Зимнее сокращение возможности естественного поступления пыли в атмосферу из региональных источников приводит к преобладанию над ними глобальных антропогенных источников [6]. Например, антропогенное воздействие китайской промышленности на аэрозольный состав воздуха фиксируются на юге Дальневосточного региона России [10]. Показано, что в Казахстане вихревая циркуляция атмосферного воздуха контролирует загрязнение тяжелыми металлами степей Евразии [11]. Анализ химического состава снега и льда может дать ценную информацию об источниках атмосферных аэрозолей, циркуляции атмосферы, экологических изменениях климата и загрязнении территорий [12, 13]. Часто антропогенный фактор приобретает решающее значение в формировании состава твердого атмо-

сферного аэрозоля [14–16]. Техногенные аэрозоли, соединяясь с естественными частицами, формируют локальные области повышенного и даже аномального содержания загрязняющих веществ в снеговом покрове [17–19].

Для геохимической классификации микроэлементного состава снеговой пыли, источников поступления, а также районирования территорий используют иерархический кластерный анализ (ИКА) [6, 17, 20, 21]. Идея данного исследования заключается в сравнительном анализе стандартизованного содержания микроэлементов пыли снегового покрова в точках наблюдения в городах Тюмень и Тобольск с использованием кластеризации. Наличие общих кластеров в Тюмени и Тобольске можно интерпретировать как близость условий формирования пыли снегового покрова, их отсутствие – как специфику загрязнения атмосферного воздуха. Присутствие специфических кластеров в обоих городах указывает на возможность переноса пыли.

Целью работы является анализ кластеров содержания микроэлементов твердой фазы снега относи-

тельно чистых фоновых и подверженных техногенному воздействию территорий для выявления различий в условиях формирования снеговой пыли между Тюменью и Тобольском.

Практическое значение заключается в выработке новых подходов к изучению регионального переноса твердых атмосферных аэрозолей с учетом местной специфики выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Объекты и методы

За основу исследования микроэлементов снеговой пыли взяты два крупных города региона – Тюмень и Тобольск. Тобольск расположен в южно-таежной подзоне (58°12' с. ш., 68°16' в. д. (рис. 1). Основу его промышленного комплекса составляют предприятия химической переработки нефти и энергетики, что может влиять на содержание углеводородов, окислов азота, фенола и пыли [3].

Город Тюмень находится в подзоне подтайги с географическими координатами 57°15' с. ш., 65°54' в. д. (рис. 2).

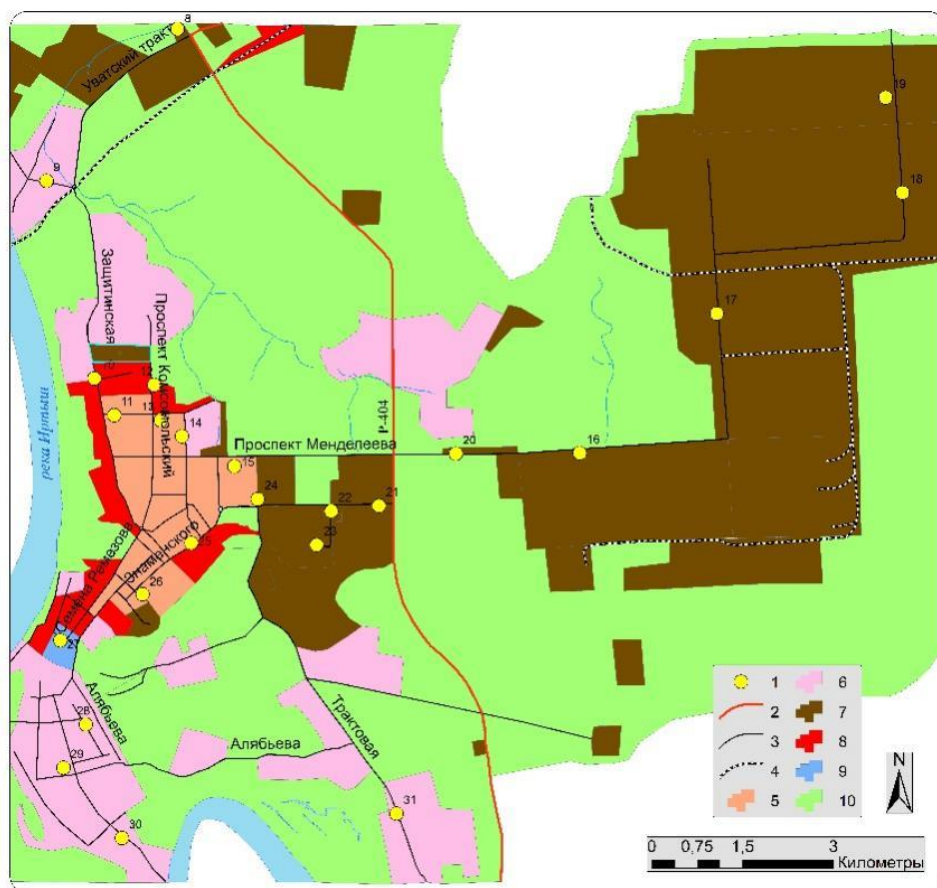


Рис. 1. Расположение точек отбора проб в г. Тобольске [3]: 1 – пункты опробования; 2 – федеральная автодорога Р-404; 3 – дороги общегородского пользования; 4 – железная дорога; 5 – зона многоэтажной застройки; 6 – зона малоэтажной застройки; 7 – зоны производственного и коммунально-складского назначения; 8 – общественно-деловая зона; 9 – зона историко-культурного центра города; 10 – рекреационная зона

Fig. 1. Location of sampling points in Tobolsk [3]: 1 – sampling points; 2 – federal highway R-404; 3 – public roads; 4 – railway; 5 – zone of multi-storey buildings; 6 – zone of low-rise buildings; 7 – zones of industrial and municipal storage purposes; 8 – public business zone; 9 – zone of the historical and cultural center of the city; 10 – recreational area

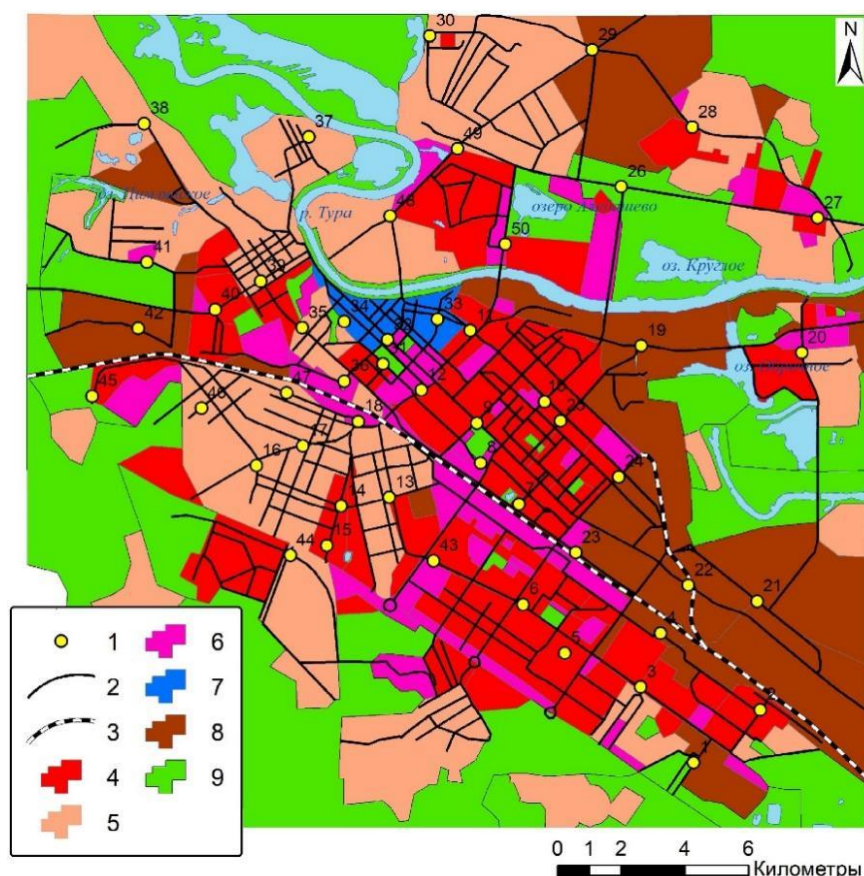


Рис. 2. Расположение точек отбора проб в г. Тюмени [4]: 1 – точки отбора проб снега; 2 – основные автодороги; 3 – железная дорога; 4 – зона многоэтажной застройки; 5 – зона жилой и нежилкой малоэтажной застройки; 6 – общественно-деловая зона; 7 – зона историко-культурного центра; 8 – зона промышленного и коммунально-складского назначения; 9 – зона рекреации, городских лесов и зеленых насаждений

Fig. 2. Location of sampling points in Tyumen [4]: 1 – snow sampling points; 2 – main roads; 3 – railway; 4 – zone of multi-storey buildings; 5 – zone of residential and non-residential low-rise buildings; 6 – public and business zone; 7 – zone of historical and cultural center; 8 – zone of industrial and municipal storage purposes; 9 – zone of recreation, urban forests and green spaces

В городе преобладают предприятия, производящие нефтегазовое оборудование. Специализированным производством можно считать аккумуляторный завод, являющийся источником загрязнения Pb и Cu [14]. Неспециализированный источник загрязнения атмосферного воздуха находится на двух ТЭЦ, не представляющих экологической опасности, так как в виде топлива используется газ [2].

Обор проб снега проведен стандартным снегомером на всю глубину слоя снега [22]. В зависимости от мощности слоя снега отбиралась средняя проба из трех–пяти образцов. Все пробы снега отобраны в 2020 г.: в г. Тюмени взяты 60 проб, в г. Тобольске – 31. Отделение твердой фракции проведено фильтрацией через безольные нитроцеллюлозные фильтры «Millipore» с диаметром пор 0,45 мкм. Для получения достаточного количества твердого осадка фильтровали 1,5–2 л талой воды. После высушивания фильтров при $t=95\text{ }^{\circ}\text{C}$ они взвешены для определения массы пыли.

Масса пыли рассчитана на литр талой воды (мг/л). Пылевая нагрузка на снеговой покров определена по формуле [23]:

$$P = \frac{Pc}{ST},$$

где P – поток вещества на единицу поверхности в единицу времени ($\text{мг}/(\text{м}^2 \times \text{сут})$); Pc – вес пыли; S – суммарная площадь отбора проб; T – временной интервал в сутках между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова. Для характеристики содержания пыли в снегу взяты минимальные, максимальные и средние значения.

Химико-аналитические работы по определению элементного химического состава твердофазных выпадений (50 элементов) произведены в аналитическом сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН (г. Черноголовка, Московская область) с дальнейшим расчетом содержания микроэлементов в снеговой пыли ($\text{мг}/\text{кг}$). Содержания отдельных химических элементов в некоторых пробах было ниже порога определения, поэтому в расчетах они использованы не все, а только 24: Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, W, Pb.

Суммарный показатель загрязнения снеговой пыли Zc определялся согласно общепринятым методи-

кам [22]. Коэффициент концентрации рассчитан по отношению содержания микроэлементов к фоновому значению [23]:

$$Kc_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{фj}}, \quad (1)$$

где C_{ij} – концентрация j -микроэлемента в i -точке наблюдения; $C_{фj}$ – его фоновая концентрация; Kc_{ij} – коэффициент концентрации j -микроэлемента, интегральный коэффициент загрязнения [24]:

$$Z_c = \sum_{j=1}^n Kc_{ij} - (n - 1), \quad (2)$$

где K – коэффициент концентрации (1); n – число учитываемых элементов с $K > 1,5$.

Значение $C_{фj}$ обычно определяют с помощью условно-фоновых точек. На предприятиях установлены высокие трубы (>100 м) для выбросов загрязняющих веществ, что создает условия для их переноса на большие расстояния и рассеивания с загрязнением удаленных от предприятия территорий. С помощью кластерного анализа выделяются пробы с наименьшим содержанием микроэлементов, в которые не попадают загрязняющие вещества, т. е. формирование микроэлементного состава снеговой пыли происходит только по естественным причинам. Такие точки наблюдаются среди условно-фоновых вне города, а также в городских условиях. В первом случае в фоновые попадают техногенно-загрязненные пробы, что занижает реальное значение Kc_{ij} (1), во втором имеем независимое от наблюдателя условие сравнения отобранных в городе проб.

Содержание микроэлементов в геохимическом спектре может различаться на порядки, что делает невозможным их сравнение в едином статистическом комплексе данных. Корректный анализ геохимических спектров микроэлементов между точками наблюдения возможен при переходе от абсолютных значений содержания к относительным путем стандартизации. Обычно осуществляют нормирование отклонения значения от минимума ($x_{ij} - \min(x_{ij})$) на весь размах шкалы содержания микроэлемента ($\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})$). Для каждой точки наблюдения стандартизованные значения рассчитаны по формуле [20]:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}, \quad (3)$$

где x_{ij} – содержание химического элемента; $\min(x_{ij})$ – его минимальное значение, $\max(x_{ij})$ – максимальное значение; a_{ij} – безразмерная величина, отражающая нормированное значение содержания элемента.

В этом случае изучаются не различия абсолютных значений содержания элемента, а форма кривой, отражающая различия относительных значений (a_{ij}) содержания химических элементов между точками наблюдения (3), где i – порядковый номер точки отбора пробы, j – порядковый номер химического элемента в списке изученных. Затем определяем вероятностный вклад P_{ij} относительной величины a_{ij} к сумме значений, используемых в расчетах всех химических элементов (n):

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n (a_{ij}) - a_{ij}}, \quad (4)$$

где P_{ij} – индекс структуры, который является безразмерной величиной, отражающей вероятностный вклад j -го химического элемента, равный отношению нормированных значений a_{ij} к сумме химических элементов (n), исключая из суммы само значение a_{ij} . В каждой пробе имеется n химических элементов, отражающих форму геохимического спектра пробы (P_{ij}).

Кластерный и геоинформационный анализы проведены с помощью программы Orange 3.29.3 с пакетом Geo. Геохимический спектр в каждой точке отбора пробы имеет 24 стандартизованных значения содержания элементов, по которым оценивалась их мера сходства с другими точками с помощью коэффициента корреляции Спирмена. Для кластеризации использован метод Word. Он представляет собой систему вложенных разбиений выборки, в результате получается «дерево», где корень – это вся выборка, а листья – наименьшие группы данных. Кластеры – это объединения проб (точек наблюдения) по схожим относительным геохимическим спектрам. Пакет Geo на основе данных GPS точек наблюдения позволяет визуализировать кластеры на карте местности и оценивать их близость к источникам загрязнения атмосферного воздуха. Для понимания геохимического смысла выделенных кластеров осуществлен переход от относительных стандартизованных безразмерных величин к их номинальным значениям. Рассчитаны средние значения содержания микроэлементов в кластере.

Результаты

К условно-фоновым относят точки наблюдения, которые соответствуют условию удаленности от источников загрязнения атмосферного воздуха на расстояние более 10 км. Обычно отмеряют от городской черты. К условно-городским точкам наблюдения отнесены все точки, расположенные в черте города. Внутри этих территорий выделены кластеры с низким (чистые) и высоким (техногенные) содержанием микроэлементов. Обнаружено проявление широтных закономерностей снижения содержания пыли в снеготалой воде с юга на север от подтайги тюменских ландшафтов к тобольским южно-таежным лесам (табл. 1).

В случае условно-фоновых территорий при переходе от Тюмени к Тобольску наблюдается снижение минимального и среднего значений по содержанию снеговой пыли и пылевой нагрузки, что соответствует широтной тенденции в регионе [6, 7]. Их максимальные значения в Тобольске в два раза выше, чем в Тюмени, что обусловлено различием техногенного поступления пыли в снеговую покров территорий. По содержанию пыли в талой воде для городских точек минимальные значения имеют сходство с условно-фоновыми точками наблюдения. Следует отметить, что средние значения не различаются между городами, а максимальные в три раза выше в Тобольске, чем

в Тюмени. По пылевой нагрузке наблюдаются еще большие различия по минимальным значениям, в то время как средние значения между городами различаются несущественно. Для кластеризации в иерар-

хическом кластерном анализе использован индекс структуры геохимических спектров микроэлементов (4), общий для Тюмени и Тобольска. Выделено восемь кластеров (рис. 3).

Таблица 1. Изменение содержания твердой фазы в снеготалой воде (мг/л), пылевая нагрузка (мг/м²сут.) в городах и на условно-фоновых территориях

Table 1. Change in solid phase content in snowmelt water (mg/l), dust load (mg/m² day) in cities and conditionally background areas

Города/Cities	Единицы измерения Units	Широта Latitude	Фоновые места/Background sites			Городские точки City sites		
			Мин Min	Макс Max	Средние Average	Мин Min	Макс Max	Средние Average
Тюмень/Tyumen	мг/л/mg/l	57°15'	4,1	10,9	7,5	9,4	121	37,1
Тобольск/Tobolsk		58°12'	2,2	22,6	5,7	4,4	316,3	30,2
Тюмень/Tyumen	мг/м ² сут mg/m ² day	57°15'	2,4	8,3	5,5	5,4	94,3	20
Тобольск/Tobolsk		58°12'	1,4	11,6	4,0	4,3	406,3	32,1

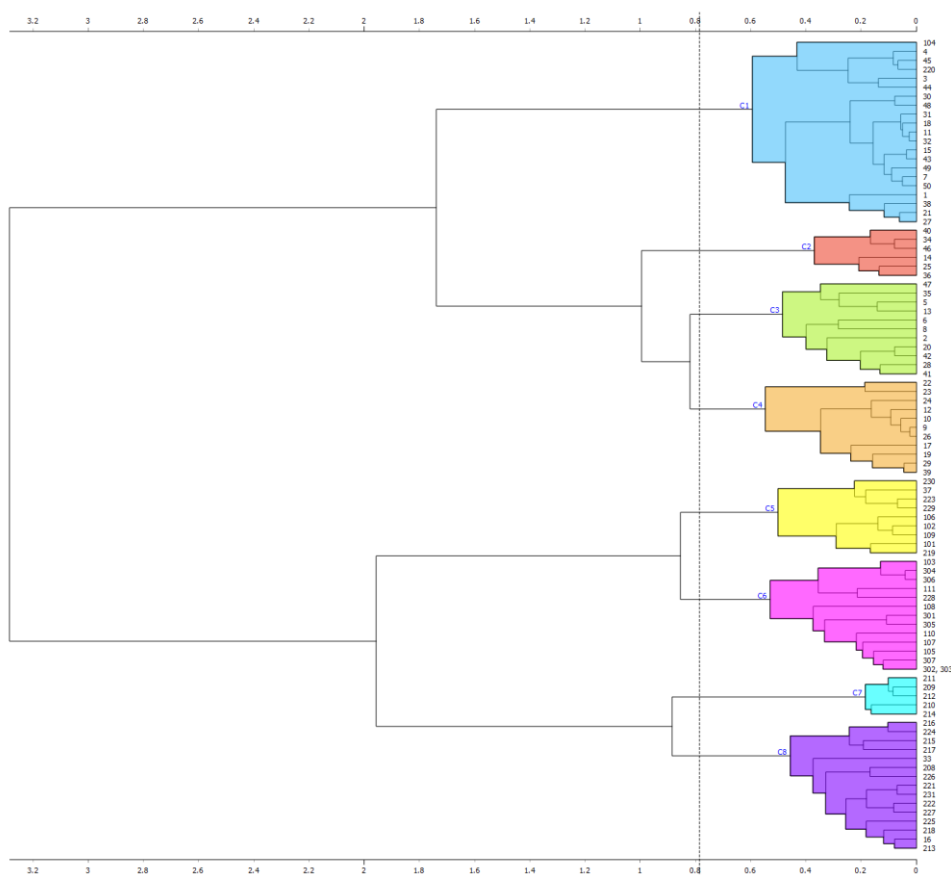


Рис. 3. Иерархическая структура кластеров C1–C8 геохимических спектров микроэлементов точек наблюдения: 1–50 – в городской черте г. Тюмени, 101–111 – на значительном удалении от г. Тюмени, 208–231 – в городской черте и в промышленной зоне г. Тобольска, 301–307 – фоновые участки г. Тобольска

Fig. 3. Hierarchical structure of C1–C8 clusters of geochemical spectra of microelements of observation points: 1–50 – in the city of Tyumen, 101–111 – at a considerable distance from Tyumen, 208–231 – in the city and industrial zone of the city Tobolsk, 301–307 – background areas of the city of Tobolsk

На высшем уровне иерархии обособились преобладающие внутригородские тюменские кластеры (C1–C4) и преобладающие тобольские (C5–C8). Тюменская группа кластеров делится на кластеры, подверженные воздействию городской среды (C1, C4) и относящиеся к городским фоновым или низкого уровня воздействия (C2, C3). С другой стороны, тобольская группа делится на два относительно чистых

кластера – C5 и C6. Тобольские кластеры C7 и C8 имеют повышенное содержание тяжелых металлов и рассеянных микроэлементов. По форме геохимического спектра они аналогичны техногенным тюменским кластерам C1 и C4.

Кластеры C1–C4 характерны для Тюмени, C7 встречается исключительно в Тобольске, остальные кластеры могут быть общими для этих городов (рис. 4).

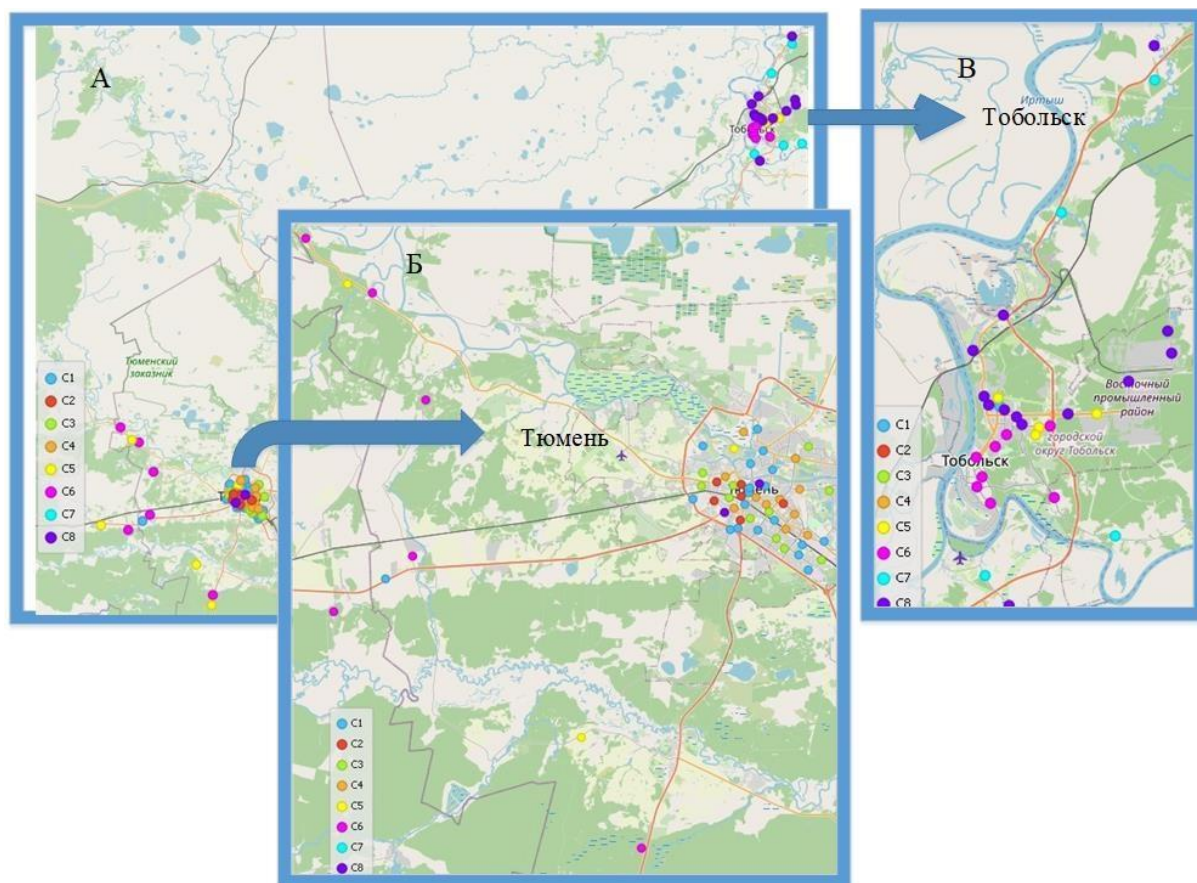


Рис. 4. Распределение общих кластеров относительного содержания микроэлементов снеговой пыли: А – между городами, Б – в Тюмени, В – Тобольске. Цветом показаны точки расположения кластеров С1–С8

Fig. 4. Distribution of common clusters of the relative content of trace elements in snow dust: A – between cities, B – in Tyumen, C – in Tobolsk. The color shows the location of the clusters C1–C8

Техногенный кластер С1 объединяет 21 точку (34,4 % от их общего числа в городе). Исключением является тюменская точка 220 кластера С1, расположенная в Тобольске, что указывает на возможность схожих условий формирования микроэлементного состава снеговой пыли этих городов. Кластер С2 объединяет 6 точек, располагаясь вблизи аккумуляторного завода. Кластер С3 объединяет 11 точек с относительно низким содержанием микроэлементов (городские фоновые). Точки техногенного С4 (11 точек, 18,0 %) концентрируются вблизи промышленной зоны и автомагистралей. Условно-фоновый кластер С5 (девять точек), находится на удалении от г. Тюмени (8 %), хотя внутри городской черты имеется т. 37; он также встречается в северной части г. Тобольска и его промышленной зоне (13 %). Кластер С5 имеет низкое относительное содержание микроэлементов и может рассматриваться в качестве местного фона. Серебряно-оловянный фоновый кластер С6, который также имеет низкие значения содержания микроэлементов, встречается как в низкоэтажной застройке южной части Тобольска (22,6 %), так и на удалении от Тюмени (условно-фоновые) (11,7 %). Наиболее высокое относительное содержание микроэлементов отмечается в кластерах С7 (16 %) в точках, расположенных на удалении от промышленной зоны Тобольска. Кластер С8

(48 %) характерен для промышленной зоны г. Тобольска, но две точки С8 обнаружены в Тюмени.

Обсуждение

Фоновые участки неоднородны [7]. Они делятся на три кластера: фоновые городские, фоновые чистые и фоновые серебряно-оловянные. Отличие в том, что в Тобольске они находятся внутри городской черты, а в Тюмени преимущественно на удалении от города. В городской черте формируются специфичные фоновые участки снегового покрова (С3). В Тобольске снеговая пыль с высоким содержанием тяжелых металлов обнаружена на удалении от источника выброса, за городской чертой. Похожая ситуация складывается с положением техногенного кластера С8, точки которого концентрируются на территории северной части г. Тобольска и на удалении от него. Аналогично, в пробах снеготалой воды на Шельмовских островах и в устье реки Якта в сотнях километрах от Норильска обнаружено повышенное содержание свинца [18]. Здесь пылевая нагрузка составляет 35–1000 кг/км² и распределена на площади 755 км², распространяясь на расстояние 30–40 км от города. Это существенно больше того, что выявлено в Тобольске (406 кг/км²), где крайняя точка техногенного кластера С8 отстоит от промышленной зоны на 20 км.

Экологическую оценку степени загрязнения территорий, соответствующих выделенным кластерам, можно произвести путем перехода от стандартизо-

ванных относительных значений к средним веществным значениям содержания микроэлементов в кластерах (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения содержания микроэлементов в снеговой пыли (мг/кг) для кластеров Тюмени и Тобольска (C1–C8)

Table 2. Average values of microelement content in snow dust (mg/kg) for Tyumen and Tobolsk clusters (C1–C8)

Элементы, показатели Elements, indicators	Кластеры/Clusters							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Li	5,2	3,6	1,7	5,7	3,3	2,7	9,1	11,1
Sc	8,6	3,6	2,2	8,0	2,0	1,5	10,9	8,2
V	5,4	3,1	1,5	5,8	2,9	4,2	4,6	6,0
Cr	11,2	4,2	3,0	9,4	1,9	2,4	14,2	9,3
Co	13,2	4,6	3,2	10,4	1,2	1,5	17,1	8,5
Ni	12,9	4,3	3,2	10,0	1,1	1,9	20,1	7,8
Cu	5,0	5,4	3,0	8,8	2,3	1,9	5,5	6,1
Zn	3,4	2,8	2,1	4,4	1,4	1,7	11,7	6,6
Ga	4,3	3,3	1,6	4,8	3,0	3,6	6,8	8,3
As	3,1	3,9	1,3	4,1	1,6	3,7	9,0	9,9
Rb	3,8	3,3	1,4	3,9	4,1	3,3	10,6	15,6
Sr	6,4	6,1	2,6	6,8	3,2	3,0	9,7	12,4
Y	5,1	3,7	1,7	5,5	2,9	2,8	9,1	10,7
Zr	5,8	5,3	2,1	7,4	3,1	3,6	10,4	12,2
Nb	4,2	3,7	1,8	5,6	2,8	3,2	6,7	10,0
Mo	4,3	4,6	2,4	8,6	2,7	4,3	4,6	3,9
Ag	0,9	1,2	1,3	1,3	1,4	7,1	1,8	1,6
Cd	3,9	4,4	2,9	6,0	2,2	3,7	9,1	8,4
Sn	3,8	3,7	1,8	5,0	1,3	10,0	3,0	2,8
Sb	10,6	10,7	4,5	16,1	3,2	3,2	7,4	7,8
Cs	3,3	2,5	1,1	3,3	2,7	2,3	6,7	8,6
Ba	9,6	10,4	5,5	13,7	5,7	4,3	14,9	21,4
W	16,7	5,3	4,5	15,3	1,7	2,0	14,0	7,9
Pb	5,1	18,3	4,6	11,1	6,0	6,7	5,8	8,0
Макс*/Max	1	2	0	2	0	2	6	11
Мин*/Min	1	0	11	0	7	2	0	0
Zc (2)	46,6	17,2	0,0	55,0	0,0	0,0	83,7	60,8

*Количество максимальных значений (Max) в ряду кластеров показано полужирным шрифтом, минимальные (Min) – курсивом.

*The number of maximum values (Max) in a series of clusters is shown in bold, minimum values (Min) in italics.

Для каждого микроэлемента в ряду восьми кластеров выделяются максимальные (Max) и минимальные (Min) значения его содержания. Кластер C8 включает 11 максимальных значений из 24 возможных реализаций; минимальные значения отсутствуют. По набору микроэлементов он специфичен для Тобольска. Соответствующие географически точки расположены в северной части города, вблизи промышленной зоны, которая является источником загрязнения воздуха. По сравнению с C7 содержание Ni, Zn, Cr, Co, Cd меньше в кластере C8, но заметно повышено для редких и рассеянных элементов, особенно Rb, Sc и Ba. В Тюмени две точки C8 находятся у второстепенных дорог, в средневысотной застройке, то есть промышленный источник микроэлементов отсутствует. Причиной загрязнения можно предложить атмосферный перенос, вызывающий мозаичное выпадение тобольской пыли в Тюмени. Например, явления регионального переноса отмечены в Польше для региональных шлейфов городского и промышленного загрязнения, несущих частые южные и юго-восточные адвекции сильно загрязненных воздушных масс [16]. Противоположный кластеру рассеянных микроэлементов (C8) кластер C3 содержит 11 минимальных значений содержания микроэлементов в снеговой пыли при отсутствии максимальных.

Его можно считать городским фоновым, но он не встречается на удалении от города в составе условно-фоновых. Геохимические спектры кластеров C1 и C7 схожи по форме, имеют повышенное содержание тяжелых металлов, хотя характеризуют загрязнение разных городов. Кластер C7 содержит шесть максимумов тяжелых металлов: Sc, Cr, Ni, Zn, Cd. В C1 максимумы совпадают, но содержание тяжелых металлов в них ниже, чем в C7. Микроэлементы Cd, Cu, Ni, Pb и Zn обычно связаны с антропогенными источниками поступления загрязнения в атмосферу [9]. Например, добыча и плавка цветных металлов обогащают аэрозоли Cr, As, Ba и Zn, сжигание угля – Pb, Zn, Se, Cu и Mn, сжигание твердых бытовых отходов – Cd и Mo [25, 26].

Кластер C4 специфичен для Тюмени. Он имеет в спектре два максимума у элементов Cu, Mo и повышенное содержание у Zn, Pb, Cd. Такое соотношение Pb, Cd, Cu, Zn характерно для дорожной пыли [27]. Для снеговой пыли Тобольска Д.В. Московченко с соавторами [6] рассчитали коэффициент обогащения пылеаэрозолей (КО). Считается, что если КО<10, то источник естественный, если КО>100, то элемент имеет техногенное происхождение. Оказалось, что КО>100 для Ag и Sn фоновых условий Тобольска. Все эти точки объединены в кластере C6, который

наблюдается среди условно-фоновых точек Тюмени и в Тобольске. Кластер С5 также относится к фоновым, имеет семь минимумов и встречается в обоих городах. Кластер С2 специфичен для Тюмени, он содержит максимумы Sb и Pb. Повышенная концентрация свинца относительно фона обнаружена в районе аккумуляторного завода и в частном секторе, он попадает в атмосферу при сжигании твердого топлива [13]. Существует мнение [28], что основным источником загрязнения снега в городе является автотранспорт.

Для расчета Кс (1) в качестве фоновых нами взяты значения условно-фоновых кластера С5, который присутствует как в Тюмени, так и в Тобольске. Интегральный коэффициент загрязнения Zс (2) в тобольских кластерах С7 и С8 достигает 60,8–83,7, что означает высокий и опасный уровень загрязнения [22]. Ранее в Тобольске [6] опубликованы более низкие значения загрязнения Zс от 16 (промышленная зона) до 29 (многоэтажная застройка), что вызывает сомнения, так как Тобольск более насыщен крупными промышленными предприятиями, чем Тюмень. Средняя пылевая нагрузка в нем достигает 32 мг/м²сут, что выше, чем в Тюмени (20 мг/м²сут.), а пылевая нагрузка в городе выше фоновых значений в 4,7 раза. Возможно, для расчета интегрального показателя загрязнения использованы условно-фоновые точки, загрязненные промышленными выбросами в атмосферу. Кластерный анализ позволяет группировать точки, находящиеся в условиях формирования пылевого пула, более точно подходящих под определение фона, как участки с наименьшим количеством поступивших загрязнений атмосферы от местных антропогенных источников. В Тюмени уровень загрязнения кластеров С1, С4 относится к среднему, умеренно опасному Zс (32–64), находящемуся в пределах 46,6–55,0. По литературным данным [2] значения Zс меняются в пределах от многоэтажной застройки (80), промышленных предприятий (91) до одноэтажной застройки (105), что указывает на опасный уровень загрязнения. Это подтверждается результатами, полученными с использованием ИКА. Тюменский кластер С2 имеет низкий и неопасный уровень загрязнения (17), а Zс для экологически чистых кластеров С6 и С3 равен нулю.

Выводы

1. Минимальные фоновые значения пылевой нагрузки в Тобольске составляют 1,4 мг/м²сут, средние – 4 мг/м²сут, что ниже, чем в Тюмени. Максимальные фоновые значения пылевой нагрузки в Тобольске выше, чем в Тюмени, что связано с местным фактором, так как максимальное содержание

пыли в снегу в Тобольске (406 мг/м²сут), почти в 3 раза выше, чем в Тюмени (121 мг/м²сут).

2. Кластерная структура микроэлементного состава снеговой пыли разделяется на две большие группы – тюменские внутригородские и тобольские, которые делятся на загрязненные микроэлементами и относительно чистые участки. Тобольские кластеры С7 и С8 имеют высокий уровень техногенного загрязнения и схожи по форме геохимического спектра с тюменскими С1 и С4.
3. Техногенные кластеры (С7, С1) различаются по форме геохимического спектра: в одних преобладают тяжелые металлы, в других – рассеянные микроэлементы (С8); то же самое относится к условно-фоновым пробам. Специфический техногенный тюменский кластер С4 выделяется высокими значениями Cu и Mo.
4. Кластерный анализ выявляет три кластера с низким содержанием микроэлементов: 1) относительно чистые городские (С3), 2) тюменские условно-фоновые чистые и чистые городские Тобольска (С5) и 3) условно-фоновые серебряно-оловянные (С6). Поэтому для выделения фоновых участков снегового покрова недостаточно выполнять условие пространственной удаленности более 10 км от источников загрязнения, а следует провести их кластеризацию.
5. Некоторые незагрязненные микроэлементами кластеры, например С6, присутствуют не только в Тобольске (22,6 %), но и вблизи Тюмени в виде фоновых участков (11,7 %), то же относится к С5 – 13 % в Тобольске и 8 % в Тюмени.
6. Специфичный тобольский кластер рассеянных элементов С8 (48 %) встречается в двух точках в пределах городской черты Тюмени, где отсутствуют аналогичные промышленные источники загрязнения для формирования такого состава снеговой пыли.
7. Техногенный кластер С7 находится только в Тобольске. Специфичными для Тюмени являются относительно чистый кластер С3 и загрязненный рассеянными микроэлементами кластер С4.
8. При их использовании в качестве фона суммарный показатель загрязнения Zс снега в Тобольске достигает высокого и опасного уровня загрязнения (60,8–83,7). Для Тюмени уровень загрязнения техногенных кластеров характеризуется как средний и умеренно опасный Zс (32–64). Использование кластерного анализа позволяет объективно определять уровень загрязнения снега.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-50062/20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.Б., Мухаметдинова Э.А., Королик В.С. Распределение загрязнения тяжелыми металлами в снежном покрове г. Нижневартовск // Вестник ТюмГУ. – 2010. – № 3. – С. 148–153.
2. Concentrations of major and trace elements within the snowpack of Tyumen, Russia / D.V. Moskovchenko, R.Yu. Pozhitkov, A.V. Zakharченко, A.A. Tigeev // Minerals. – 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/min11070709> (дата обращения 01.02.2023).
3. Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Соромотин А.В. Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. – Т. 335 – № 5. – С. 156–169. DOI: 0.18799/24131830/2021/05/319.
4. Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени / Д.В. Московченко, Р.Ю. Пожитков, А.Н. Курчатова, Р.И. Тимшанов // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2021. – № 3. – С. 13–26.

5. Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic / V.P. Shevchenko, A.A. Vinogradova, A.P. Lisitzin, A.N. Novigatsky, M.V. Panchenko, V.V. Polkin // Implications and Consequences of Anthropogenic Pollution in Polar environments. – Berlin; Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2016. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12315-3_5 (дата обращения 01.02.2023).
6. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient / V.P. Shevchenko, S.P. Oleg, N.V. Sergey, I.V. Krickov, R.M. Manasyrov, N.V. Politova, S.G. Kopysov, O.M. Dara, Y.V. Auda, L.S. Shirokova, L.G. Kolesnichenko, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2017. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017> (дата обращения 01.02.2023).
7. Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А. Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 09. – С. 790–800.
8. Atmospheric deposition: sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature / M. Amodio, S. Catino, P.R. Dambruoso, G. de Gennaro, A. di Gilio, P. Giungato, M. Tutino // Advances in Meteorology. – 2014. DOI: 10.1155/2014/161730.
9. Степанец В.Н., Серых Т.Г., Папина Т.С. Оценка содержания микроэлементов в снежном покрове юга Западной Сибири // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 64. – С. 480–491. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-480-492.
10. Кондратьев И.И. Атмосферный трансграничный перенос загрязняющих веществ из центров эмиссии восточной Азии на юг Дальневосточного региона России // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 1. – С. 107–112.
11. Ormanova G., Karaca F., Kononova N. Analysis of the impacts of atmospheric circulation patterns on the regional air quality over the geographical center of the Eurasian continent // Atmospheric research. – 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104858.
12. Li Z., Li H., Dong Z. I. Chemical characteristics and environmental significance of fresh snow deposition on Urumqi Glacier No. 1 of Tianshan Mountains, China // Chin. Geogr. – 2010. – V. 20. URL: <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0412-6> (дата обращения 01.02.2023).
13. Integrated evaluation of aerogenic pollution by air-transported heavy metals (Pb, Cd, Ni, Zn, Mn and Cu) in the analysis of the main deposit media / E. Baltreinaite, P. Baltrenas, A. Lietuvninkas, V. Sereviciene, E. Zuokaite // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2014. DOI: 10.3846/enviro.2017.048
14. Химико-экологическая оценка загрязнения свинцом атмосферы города Тюмени / Е.В. Крестьянникова, В.В. Козлова, Н.С. Ларина, С.И. Ларин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 5 (2). – С. 679–684.
15. Distribution of major elements between the dissolved and insoluble fractions in surface snow at Urumqi Glacier. No. 1, Eastern Tien Shan / C. Zhang, G. Wu, S. Gao, Z. Zhao, X. Zhang, L. Tian, Y. Mu, D. Joswiak // Atmos. Res. – 2013. DOI: 10.1007/s11434-011-4684-8
16. Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland // Environ. Monit. Assess. – 2015. DOI: 10.1007/s10661-015-4446-1.
17. Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk Town (Russia) by pollution level / A. Onuchin, G. Kofman, O. Zubareva, I. Danilova // Polish Journ. of Environmental Studies. – 2020. DOI: 10.15244/pjoes/118168.
18. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района / А.А. Онучин, Т.А. Буренина, О.Н. Зубарева, О.В. Трефилова, И.В. Данилова // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 1025–1037.
19. Таловская А.В., Филимонов Е.А., Языков Е.Г. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – № 6. – С. 491–495.
20. Гилязов А.Ф. Кластерный анализ как инструмент районирования территории по крупности речных наносов (на примере бассейна Волги) // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. – 2015. – Т. 25. – Вып. 2. – С. 149–158.
21. Farida M.S., El-Dars E.N., Sami H.M. Interpretation of hydrogeochemical data using Hierarchical Cluster Analysis: a case study at Wadi El-Natron, Egypt // Journal of African Earth Sciences. – 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103930> (дата обращения 01.02.2023).
22. Методические рекомендации по геохимическим оценкам загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.Е. Саэт, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 12 с.
23. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
24. Водяницкий Ю.Н. Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. – 2010. DOI: 10.1134/S106422931010011X
25. Chemical characterization of surface snow in Istanbul (NW Turkey) and their association with atmospheric circulations / A. Baysal, H. Baltaci, N. Ozbek, O. Destanoglu, G. Ustabasi, G. Gumus // Environ. Monit. Assess. – 2017. DOI: 10.1007/s10661-017-5982-7.
26. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: Regional sources and cloud processing / T. Li, Y. Wang, W.J. Li, J.M. Chen, T. Wang, W.X. Wang // Atmos. Chem. Phys. Discuss. – 2015. DOI: 10.5194/acpd-15-13001-201529.
27. Integrated evaluation of road transport pollution impact on the urban air / V. Šerevičienė, V. Vasiliauskienė, D. Paliulis, J. Aleknaitė // Environmental Engineering: 10th International Conference. – Vilnius, Lithuania, 27–28 April 2017. DOI: 10.3846/enviro.2017.048.
28. Viklander M. Substances in urban snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Lulea, Sweden // Water Air Soil Pollut. – 1999. DOI: 10.1023/A:1005121116829.

Поступила: 31.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 12.03.2023 г.

Информация об авторах

Захарченко А.В., доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера.

Пасько О.А., доктор сельскохозяйственных наук, проректор по научной работе, Национальный открытый институт г. Санкт-Петербурга.

Тигеев А.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера.

UDC 551.578.46: 550.42

FORMATION OF THE COMPOSITION OF TRACE ELEMENTS OF SNOW DUST IN TYUMEN AND TOBOLSK USING HIERARCHICAL CLUSTER ANALYSIS

Alexander V. Zakharchenko¹,
avzakh@gmail.com

Olga A. Pasko²,
o.pasko@noironline.ru

Alexander A. Tigeev¹,
ttruubbaa@mail.ru

¹ Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Institute of the Problems of Northern Development,
86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russia.

² Saint-Petersburg National Open Institute,
6, Sestroretskaya street, St. Petersburg, 197183, Russia.

The relevance: search for new methodological approaches and techniques for assessing the aerosol migration of substances and characterizing air pollution.

The purpose of the work is a comparative analysis of clusters of the content of microelements of the solid phase of snow in the closely located cities of Tyumen and Tobolsk with respect to clean background and areas subject to technogenic impact.

The materials: the trace elements of solid phase of the snow cover.

The methods: chemical-analytical for determining the content of trace elements, hierarchical cluster in the analysis of geochemical spectra, probabilistic-statistical.

Results. The background dust load in Tobolsk is less, and the inner city load is higher compared to Tyumen. A cluster data structure of 8 clusters has been established with the allocation of two large groups that combine the Tobolsk and Tyumen sites, which are divided into clusters with low and high content of trace elements.

Conclusions. The conditionally background cluster C6 is present in Tobolsk (22,6 %) and Tyumen (11,7 %), and C5 – 13 % in Tobolsk and 8 % in Tyumen. A specific Tobolsk cluster C8 with a predominance of scattered elements (48 %) was found at 2 sites in Tyumen, which may indicate a possible transfer of aerosols between these cities. Some technogenic clusters contained heavy metals, while others were dominated by Sc, Cr, Ni, Zn, and Cd. Technogenic clusters (C7, C1) differ in the shape of the geochemical spectrum: heavy metals predominate in some, trace elements (C8) predominate in others; the same applies to conditionally background samples. The specific technogenic Tyumen cluster C4 is distinguished by high values of Cu and Mo. Conditionally isolated background clusters had a low content of microelements. To identify environmental conditions, we moved from the standardized values of cluster analysis to their material content. It is shown that some clusters contain heavy metals, while others contain Sc, Cr, Ni, Zn, and Cd. Conditionally isolated background clusters had a low content of microelements. Using the content of microelements of the C5 cluster as a background, the environmental index of pollution Zc was calculated, which in Tobolsk reaches a high and dangerous level of pollution 60,8–83,7, in Tyumen – an average, moderately dangerous level Zc (32–64). The use of cluster analysis makes it possible to determine the trace elements pollution of snow dust and the territory as a whole.

Key words:

snow cover, solid aerosols, cluster analysis, trace elements, regional transport, geochemical spectra.

This study was supported by Russian Foundation for Basic Research, grant no. 19-05-50062/20.

REFERENCES

- Ivanov V.B., Mukhametdinova E.A., Korolik V.S. Allocations of heavy metal pollution in the snow cover of Nizhnevartovsk City. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2010, no. 3, pp. 148–153. In Rus.
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Zakharchenko A.V., Tigeev A.A. Concentrations of major and trace elements within the snowpack of Tyumen, Russia. *Minerals*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/min11070709> (accessed 1 February 2023).
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Soromotin A.V. Geochemical characteristics of snow cover in Tobolsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 156–169. In Rus.
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Kurchatova A.N., Timshanov R.I. Geochemistry of snow cover within the tyumen city. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography. Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*, 2021, no 3, pp. 13–26. In Rus.
- Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Panchenko M.V., Polkin V.V. Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic. *Implications and Consequences of Anthropogenic Pollution in Polar environments*. Berlin, Heidelberg, Germany, Springer-Verlag, 2016. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12315-3_5 (accessed 1 February 2023).
- Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 21, pp. 5725–5746. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017> (accessed 1 February 2023).
- Ermolov Yu.V., Makhmatkov I.D., Khudyaev S.A. Background concentration of chemical elements in snow cover of the typical

- regions of the Western Siberia. *Optics of the atmosphere and the ocean*, 2014, vol. 27, no. 9, pp. 790–800. In Rus.
8. Amodio M., Catino S., Dambruoso P.R., De Gennaro G., Di Gilio A., Giungato P., Tutino M. Atmospheric deposition: sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature. *Advances in Meteorology*, 2014. DOI: 10.1155/2014/161730.
 9. Stepanets V.N., Serykh T.G., Papina T.S. Chemical composition of snow cover in the south of Western Siberia. *Journal of Hydro-meteorology and Ecology*, 2021. In Rus. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-480-492.
 10. Kondratev I.I. Atmospheric transboundary pollutants transport from emission centers in East Asia to the South of the Far-Eastern region of Russia. *Vestnik DVO RAN*, 2008, no. 1, pp. 107–113. In Rus.
 11. Ormanova G., Karaca F., Kononova N. Analysis of the impacts of atmospheric circulation patterns on the regional air quality over the geographical center of the Eurasian continent. *Atmospheric research*, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104858.
 12. Li Z., Li H., Dong Z. Chemical characteristics and environmental significance of fresh snow deposition on Urumqi Glacier No. 1 of Tianshan Mountains, China. *Chinese Geographical Science*. 2010. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0412-6> (accessed 1 February 2023).
 13. Baltreinaite E., Baltrenas P., Lietuvninkas A., Sereviciene V., Zuokaite E. Integrated evaluation of aerogenic pollution by air-transported heavy metals (Pb, Cd, Ni, Zn, Mn and Cu) in the analysis of the main deposit media. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014. DOI: 10.3846/enviro.2017.048.
 14. Kretyannikova E.V., Kozlova V.V., Larina N.S., Larin S.I. Chemical and environmental assessment of lead pollution in the atmosphere of the city of Tyumen. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy*, 2015, vol. 17, pp. 679–684. In Rus.
 15. Zhang C., Wu G., Gao S., Zhao Z., Zhang X., Tian L., Mu Y., Joswiak D. Distribution of major elements between the dissolved and insoluble fractions in surface snow at Urumqi Glacier. No. 1, Eastern Tien Shan. *Atmospheric Research*, 2013. DOI: 10.1007/s11434-011-4684-8.
 16. Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015. DOI: 10.1007/s10661-015-4446-1.
 17. Onuchin A., Kofman G., Zubareva O., Danilova I. Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk Town (Russia) by pollution level. *Polish Journ. of Environmental Studies*, 2020. DOI: 10.15244/pjoes/118168.
 18. Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Pollution of snow cover in the impact zone of enterprises in Norilsk industrial areas. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*, 2014, no. 7 (6), pp. 714–722. In Rus.
 19. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2014, vol. 27, no. 6, p. 491–495. In Rus.
 20. Gilyazov A.F. Cluster analysis as a tool of zoning according to the size of river sediments (by the example of Volga basin). *Bulletin of Udmurt University. Series Biology Earth Sciences*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 149–158. In Rus.
 21. Farida M.S., El-Dars E.N., Sami H.M. Interpretation of hydrogeochemical data using Hierarchical Cluster Analysis: a case study at Wadi El-Natron, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103930> (accessed 1 February 2023).
 22. Revich B.A., Saet Yu.E., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Methodological recommendations on the geochemical assessment of urban pollution by chemical elements]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 112 p.
 23. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover within the Eastern district of Moscow. *Bulletin of the Moscow University. Geography*, 2012, vol. 4, pp. 14–24. In Rus.
 24. Vodyanitskii Y.N. Equations for assessing the total contamination of soils with heavy metals and metalloids. *Eurasian Soil Science*, 2010. In Rus. DOI: 10.1134/S106422931010011X.
 25. Baysal A., Baltaci H., Ozbek N., Destanoglu O., Ustabasi G., Gumus G. Chemical characterization of surface snow in Istanbul (NW Turkey) and their association with atmospheric circulations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017. DOI: 10.1007/s10661-017-5982-7.
 26. Li T., Wang Y., Li W.J., Chen J.M., Wang T., Wang W.X. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: regional sources and cloud processing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015. DOI: 10.5194/acpd-15-13001-201529.
 27. Šerevičienė V., Vasiliauskienė V., Paliulis D., Aleknaitė J. Integrated evaluation of road transport pollution impact on the urban air. *Environmental Engineering. 10th International Conference*. Vilnius, Lithuania, 27–28 April 2017. DOI: 10.3846/enviro.2017.048.
 28. Viklander M. Substances in urban snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Lulea, Sweden. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1999. DOI: 10.1023/A:1005121116829.

Received: 31 January 2023.

Reviewed: 12 March 2023.

Information about the authors

Alexander V. Zakharchenko, principal scientist, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Institute of the Problems of Northern Development.

Olga A. Pasko, Dr. Sc., vice-rector for research, Saint-Petersburg National Open Institute.

Alexander A. Tigeev, Cand. Sc., senior researcher, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Institute of the Problems of Northern Development.

УДК 532.5-1/-9

РАСЧЕТ ЗАБОЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО СТВОЛУ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЫ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОТОКА

Гильманов Александр Янович¹,
a.y.gilmanov@utmn.ru

Родионова Анна Васильевна¹,
stud0000230197@study.utmn.ru

Шевелёв Александр Павлович¹,
a.p.shevelev@utmn.ru

¹ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью вовлечения в разработку месторождений с высоковязкой нефтью, поскольку месторождения с нефтью низкой и средней вязкости истощаются. Вязкость тяжёлой нефти существенно зависит от температуры, поэтому для снижения вязкости используют тепловые методы увеличения нефтеотдачи. С точки зрения использования закаченного в пласт тепла наиболее эффективным тепловым методом является пароциклический метод, т. е. периодическое нагнетание пара в скважину. Однако при движении пара по трубе происходит его конденсация, из-за чего продукция на забое скважины нередко обводнена. Точное знание параметров теплоносителя вдоль всего ствола скважины поможет избежать этой проблемы.

Цель: определить влияние величины угла наклона скважины, сухости пара на устье, начального давления и коэффициента теплопроводности теплоизоляции на характеристики теплоносителя в стволе скважины с учётом режимов течения.

Объекты: месторождения с высоковязкой нефтью.

Методы: физико-математическое моделирование нагнетания двухфазного (пар–вода) теплоносителя в пласт на основе законов сохранения массы, импульса и энергии с учетом движения теплоносителя по стволу наклонной скважины, потерь тепла через стенки скважины и режимов течения жидкости.

Результаты. Произведен расчет паросодержания и расхода теплоносителя вдоль ствола наклонной скважины. Проанализировано влияние величины угла наклона скважины на параметры теплоносителя на забое скважины (паросодержание, давление и устьевый расход теплоносителя). Определено, что чем меньше угол наклона скважины, тем глубже пар проникает по глубине пласта.

Ключевые слова:

Высоковязкая нефть, тепловые методы увеличения нефтеотдачи, пароциклическое воздействие, наклонная скважина, массовый расход теплоносителя, глубина конденсации пара.

Введение

Применение закачки водяного пара среди всех тепловых методов увеличения нефтеотдачи [1–4] наиболее распространено в связи с максимальным количеством теплоты, вносимым в пласт, по сравнению с другими теплоносителями. Одна из проблем использования пароводяной смеси связана с конденсацией пара при движении по стволу скважины [5].

Существующие забойные парогенераторы [6] обеспечивают неконтролируемое выделение тепла, что может приводить к механическим нарушениям фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта, и характеризуются небольшими расходными характеристиками, при этом в пласт параллельно с теплоносителем поступают газы горения. Режим работы устьевых парогенераторов можно контролировать в широком диапазоне расходных характеристик, а сами такие парогенераторы достаточно просты в эксплуатации и существенно дешевле забойных.

К сожалению, устьевые парогенераторы [6] не позволяют получать сухой пар в промышленных масштабах [7]. Поэтому уже на устье скважины попадает пароводяная смесь. Для глубоко залегающих скважин критическим параметром является их глубина. При движении теплоносителя по стволу такой

скважины происходят значительные теплотери, зачастую приводящие к полной конденсации пара и выделению существенной части транспортируемого тепла в стволе скважины, а не в пласте. Частично нивелировать этот эффект позволяет применение теплоизолированных насосно-компрессорных труб.

Вертикальные скважины в реальных условиях являются лишь условно расположенными под углом 90°. Чаще всего эти скважины расположены под некоторым углом, значение которого может достигать 5° [8]. Кроме того, для добычи нефти распространено применение наклонно-направленных скважин [9, 10], в которых углы отклонения от вертикали достигают 70° [11]. При угле наклона скважины до 20° тепловые потери за счёт увеличения площади контакта теплоносителя со стенкой скважины возрастают до 6 % при неизменной глубине пласта. При этом площадь фильтрации также возрастает на 6 %.

Всё вышесказанное обуславливает актуальность моделирования движения теплоносителя по стволу наклонной скважины. Современным направлением в области моделирования задач физики нефтегазового пласта является использование гидродинамических симуляторов [12]. Эти симуляторы хорошо зарекомендовали себя при решении стандартных задач.

Движение теплоносителя по стволу наклонной скважины в таких симуляторах не моделируется. Использование специализированного программного обеспечения [13] также настроено на решение стандартных задач и не учитывает всех эффектов при движении теплоносителя по стволу скважины, а также сопряжено с временными и финансовыми затратами.

Для решения упомянутой проблемы были предложены математические модели [5, 7]. Одной из современных работ в этой области является модель Морради и его соавторов [5]. В основе этой модели лежит баланс массы и энергии для наклонной скважины, при этом учитываются потери давления на трение для двух режимов течения: ламинарного и турбулентного. Структура потока в этой модели не учитывается.

К настоящему времени разработан подход использования классической системы уравнений механики многофазных сред [14–18] для описания потоков, сопровождающихся фазовыми переходами в стволе скважины [19]. Как правило, газожидкостный поток в таких моделях считается одномерным [19, 20]. Однако среди этих моделей нет такой, которая бы учитывала структуру потока и её возможные изменения при движении пароводяной смеси в стволе нагнетательной скважины с учётом тепловых потерь через многослойную стенку этой скважины.

Работа авторов [7] учитывает динамику структуры многофазного газожидкостного потока, но предназначена для расчёта только вертикальных скважин.

Применение нейросетевого или машинного обучения для решения задач движения многофазных потоков в нагнетательных и добывающих скважинах [21] не позволяет учесть индивидуальных особенностей каждой конкретной скважины, а даёт лишь общую усреднённую картину и по сути является методом приближённых статистических оценок.

Поэтому целью работы является определение забойных характеристик теплоносителя при его движении по стволу скважины с учётом как режимов течения, так и структуры потока, а также тепловых потерь через стенку многослойной скважины. В рамках развиваемого авторами подхода [7] впервые будет учтено влияние угла наклона скважины на эволюцию структуры газожидкостного потока и технологические параметры для неизотермической задачи движения теплоносителя по стволу нагнетательной скважины.

Методы

Для описания поставленной задачи вводятся две оси z и $z \cdot \cos \theta$ (рис. 1), где z – это ось, направленная вдоль ствола скважины, м, с ее помощью далее описываются законы движения теплоносителя вдоль ствола наклонной скважины, а $z \cdot \cos \theta$ – это ось, направленная по глубине пласта, она нужна, чтобы учесть истинную глубину скважины, здесь θ – угол наклона скважины, °. Пусть внутренний радиус насосно-компрессорных труб r_0 , м.

Чтобы решить поставленную задачу, можно использовать модель [7], построенную на основе классической системы уравнений механики многофазных систем и материальных соотношений энтальпии и

плотности фаз. В законе сохранения импульса учитываются потери на трение о стенки скважины. Также модель учитывает режимы течения жидкости. Ее решение позволяет определить скорость теплоносителя, паросодержание, давление и расход нагнетаемой пароводяной смеси вдоль всего ствола скважины. Однако такая модель не учитывает угол наклона скважины.

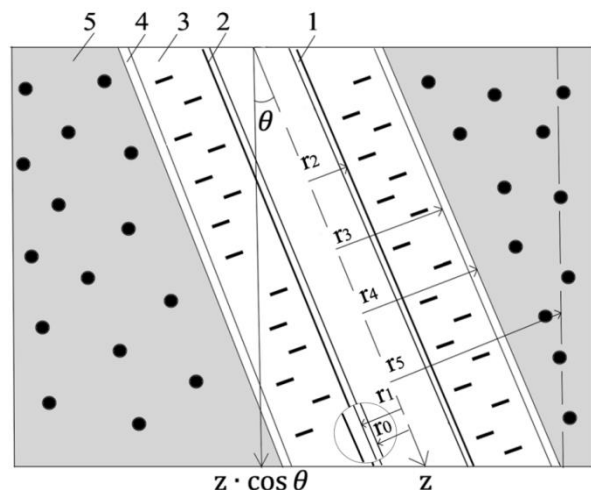


Рис. 1. Схематическая структура конструкции скважины: 1 – насосно-компрессорные трубы; 2 – слой теплоизоляции; 3 – затрубное пространство, заполненное водой; 4 – обсадная колонна; 5 – окружающая порода

Fig. 1. Schematic structure of the well design: 1 – tubing pipe; 2 – thermal insulation layer; 3 – annular space filled with water; 4 – casing string; 5 – surrounding rock

Если учесть угол наклона скважины, то закон сохранения импульса примет вид:

$$\frac{dP}{dz} = (\rho_s C + (1 - C)\rho_w)g \cdot \cos \theta - \frac{dP_f}{dz},$$

где P – давление, Па; ρ_s и ρ_w – плотности пара и воды, кг/м³; C – сухость пара, д. ед.; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; P_f – потери давления на трение, Па.

Следует учесть угол наклона также в формуле для потерь давления на трение P_f при снарядном режиме течения, тогда потери будут рассчитываться как:

$$\frac{dP_f}{dz} = C_d \frac{1}{2} \frac{(1 - \beta)}{\beta + (1 - \beta)(1 - \sigma_1)} \frac{(1 - \sigma_1)^3}{\sigma_1^2} \rho_w g \cdot \cos \theta,$$

где безразмерный коэффициент

$$\sigma_1 = \frac{2}{1 + \frac{\bar{q}_w}{1 - \beta} + \sqrt{\left[1 + \frac{\bar{q}_w}{1 - \beta}\right]^2 - 4\bar{q}_w}}$$

где $\beta = \frac{\bar{q}_s}{\bar{q}_s + \bar{q}_w}$ – расходное объемное газосодержание, д. ед.; $\bar{q}_w = \frac{q_w}{h\sqrt{gdd}}$ и $\bar{q}_s = \frac{q_s}{h\sqrt{gdd}}$ – приведённые расходы воды и пара, безразмерные; q_s и q_w – объёмные расходы пара и воды, м³/с; h – глубина скважины, м; d – внутренний диаметр насосно-компрессорных труб, м; C_d – коэффициент потерь давления на трение, без-

размерный, определяется по формулам Стокса или Альтушуля [7] с учётом ламинарного или турбулентного режима течения.

Для пузырькового режима потери давления на трение вычисляются как

$$\frac{dP_f}{dz} = (\rho_s C + (1 - C)\rho_w) \frac{C_d v^2}{2d},$$

где v – скорость теплоносителя, м/с.

Закон сохранения массы имеет вид

$$\frac{d}{dz} ((\rho_s C + (1 - C)\rho_w) v) = 0.$$

Закон сохранения энергии описывается уравнением

$$\frac{d}{dz} ((\rho_s C i_s + (1 - C)\rho_w i_w) v) = -\frac{Q}{\pi r_0^2 h},$$

где i_s и i_w – удельные энтальпии пара и воды, Дж/кг; Q – тепловой поток, Вт.

Удельные энтальпии и плотности пара и воды вычисляются по эмпирическим корреляциям:

$$\begin{aligned} \rho_s &= \beta_s P - \rho_{s1}, P \leq P', \\ \rho_s &= \beta_s P - \rho_{s2}, P > P', \\ \rho_w &= \beta_{w1} P + \rho_{w1}, P \leq P', \\ \rho_w &= \beta_{w2} P + \rho_{w2}, P > P', \\ i_s &= \alpha_s T_s + i_{s0}, \\ i_w &= \alpha_w T_s - i_{w0}, \end{aligned}$$

где постоянные коэффициенты $\beta_s = 10^{-5}$ кг/(м³·Па), $\rho_{s1} = 57,2$ кг/м³, $\rho_{s2} = 67,6$ кг/м³, $\rho_{w1} = 575$ кг/м³, $\rho_{w2} = 566$ кг/м³, $\beta_{w1} = 2 \cdot 10^{-6}$ кг/(м³·Па), $\beta_{w2} = 3 \cdot 10^{-6}$ кг/(м³·Па), $i_{s0} = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $i_{w0} = 125518$ Дж/кг, $\alpha_s = -513$ Дж/(кг·К), $\alpha_w = 4987$ Дж/(кг·К); P' – переходное значение давления, равное $20 \cdot 10^6$ Па.

Для наклонной скважины тепловой поток также будет вычисляться по известной формуле:

$$Q = \frac{2\pi h(T_s - T_r)}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}},$$

где T_s – температура теплоносителя, К; λ_1 – коэффициент теплопроводности стали; λ_2 – коэффициент теплопроводности теплоизоляции; λ_3 – коэффициент теплопроводности воды; λ_4 – коэффициент теплопроводности породы (λ_i измеряется в Вт/(м·К)); r_1 – внешний радиус насосно-компрессорных труб, м; r_2 – внешний радиус теплоизоляции, м; r_3 – внутренний радиус обсадной колонны, м; r_4 – внешний радиус обсадной колонны, м; r_5 – эффективный радиус (в м), на котором в пласте устанавливается значение невозмущённой температуры T_r (в К) (рис. 1).

Однако эту температуру нужно разбить на два слагаемых, каждое из которых учитывает свое значение невозмущенной температуры T_r , так как в сторону наклона скважины тепловые потери распространяются на большую глубину, чем с противоположной наклону скважины стороны (рис. 2). Так, в первом случае невозмущенная температура (в К) вычисляется по формуле:

$$T_{r1} = \Gamma(z/\cos\theta - z^*) + T^*,$$

а во втором:

$$T_{r2} = \Gamma(z/(2 - 1/\cos\theta - z^*)) + T^*,$$

где Γ – геотермический градиент, равный для большинства месторождений Западной Сибири 0,03 К/м; T^* – значение температуры (в К) на опорной глубине z^* (в м). Обычно в качестве опорной глубины принимается $z^* = 2$ м, чтобы исключить сезонное влияние на значение температуры на этой глубине. Само значение температуры должно быть измерено экспериментально на реальном объекте, в модельном случае принимается равным 293 К.

Тогда конечная формула для теплового потока наклонной скважины будет иметь вид:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

• $Q_1 = \frac{2\pi h(T_s - T_{r1})}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}$ – тепловой поток, который распространяется в сторону наклона скважины;

• $Q_2 = \frac{2\pi h(T_s - T_{r2})}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}$ – тепловой поток, распространяющийся в противоположную наклону скважины сторону.

Температура теплоносителя считается известной и аппроксимирована линейным трендом. Граничные условия соответствуют заданию на устье расхода теплоносителя, сухости пара и давления.

Дифференциальные уравнения в приведённой системе уравнений решаются по методу Эйлера, система получившихся алгебраических уравнений решается по методу последовательного исключения неизвестных. Шаг по координате равен 0,01 м.

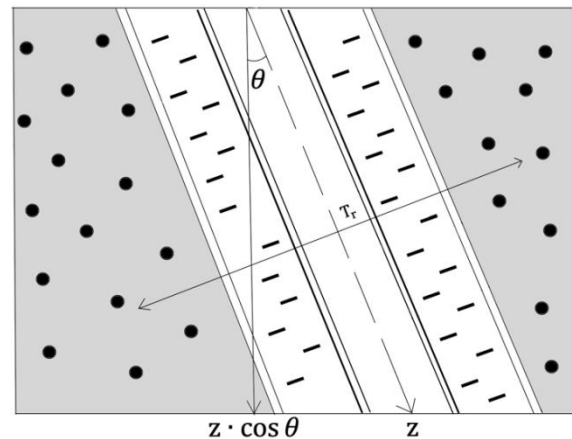


Рис. 2. Схематическое изображение распространения тепловых потоков в разные стороны от наклонной скважины

Fig. 2. Schematic representation of the propagation of heat flows in different directions from a directional well

Анализ влияния угла наклона скважины на параметры теплоносителя на забое скважины

Исходные данные, использованные при вычислениях, приведены в табл. 1 и соответствуют модельной скважине. Глубина скважины принята равной 500 м.

Наибольшая скорость теплоносителя наблюдается при вертикальном расположении скважины. При увеличении угла наклона скорость теплоносителя падает, так как влияние гравитационных сил уменьшается (рис. 3).

Таблица 1. Исходные данные, использованные при вычислениях

Table 1. Initial data used for calculation

Устьевая температура теплоносителя Heat carrier temperature at the wellhead T_{sp} , K	626
Забойная температура теплоносителя Heat carrier temperature at the bottom-hole T_{sb} , K	621
Коэффициент теплопроводности стали $\lambda_1=\lambda_4$, Вт/(м·К) Steel thermal conductivity $\lambda_1=\lambda_4$, W/(m·K)	60
Коэффициент теплопроводности теплоизоляции λ_2 , Вт/(м·К) Thermal insulation thermal conductivity λ_2 , W/(m·K)	0,001
Коэффициент теплопроводности воды λ_3 , Вт/(м·К) Water thermal conductivity λ_3 , W/(m·K)	0,683
Коэффициент теплопроводности породы λ_5 , Вт/(м·К) Rock thermal conductivity λ_5 , W/(m·K)	4
Внешний радиус теплоизоляции r_2 , м Thermal insulation external radius r_2 , m	0,085
Внешний радиус обсадной колонны r_4 , м Casing string outer radius r_4 , m	0,11
Угол наклона скважины/Well inclination angle θ , °	30
Сухость пара на устье/Steam quality at the wellhead C_0	0,7
Массовый расход теплоносителя на устье Q_s , т/ч Mass steam injection flow rate at the wellhead Q_s , ton/h	3,2
Давление смеси на устье P_0 , МПа Pressure of the mixture at the wellhead P_0 , MPa	15
Внутренний радиус насосно-компрессорных труб r_0 , м Inner radius of the tubing r_0 , m	0,04
Внешний радиус насосно-компрессорных труб r_1 , м Tubing outer radius r_1 , m	0,045
Внутренний радиус обсадной колонны r_3 , м Casing string inner radius r_3 , m	0,1
Эффективный радиус r_5 , м Effective radius r_5 , m	10

Режим течения при этом остаётся снарядным. Пузырьковый режим достигается только при расходе теплоносителя более 0,012 м³/с. Однако на практике расход теплоносителя не превосходит 0,01 м³/с, поэтому режим течения остаётся снарядным и структура газожидкостного потока не эволюционирует.

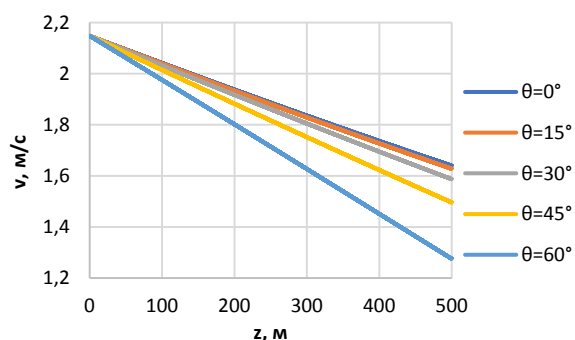


Рис. 3. Влияние угла наклона скважины θ на распределение скорости теплоносителя v по глубине пласта z

Fig. 3. Influence of the well inclination angle θ on heat carrier velocity distribution v over the depth of the formation z

Для анализа влияния величины начальных характеристик на параметры на забое скважины можно использовать «торнадо» диаграмму. Этот тип диаграммы позволяет провести анализ чувствительности, т. е. сравнить степень влияния различных параметров. На горизонтальной оси находится базовый параметр, влияние на который оценивается, на вертикальной –

влияющие параметры, значение которых изменяется. Синим цветом показано изменение базового параметра (и указано значение в %) при увеличении влияющего параметра на 20 %, а красным – при уменьшении влияющего параметра на 20 %. Начальные значения влияющих параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2. Базовые значения параметров

Table 2. Basic parameter values

Сухость пара на устье/Steam quality at the wellhead C_0	0,7
Массовый расход теплоносителя на устье Q_s , т/ч Mass steam injection flow rate at the wellhead Q_s , ton/h	3,2
Коэффициент теплопроводности теплоизоляции для рис. 4 λ_2 , Вт/(м·К) Thermal conductivity of the thermal insulation for Fig. 4 λ_2 , W/(m·K)	0,001
Коэффициент теплопроводности теплоизоляции для рис. 5 λ_2 , Вт/(м·К) Thermal conductivity of the thermal insulation for Fig. 5 λ_2 , W/(m·K)	0,08
Угол наклона скважины/Well inclination angle θ , °	30
Давление смеси на устье P_0 , МПа Mixture pressure at the wellhead P_0 , MPa	15

С увеличением угла наклона скважины массовый расход теплоносителя на забое скважины уменьшается (рис. 4). Массовый расход пара напрямую зависит от скорости, которая с увеличением угла уменьшается. Наибольшее влияние на массовый расход пара на забое оказывают устьевой расход пара и начальное давление, которые задаётся на устье скважины. С увеличением количества пара на устье растет и количество пара по всей скважине и ему тяжелее конденсироваться, поэтому массовый расход пара увеличивается и на забое. При уменьшении давления на устье пар полностью не конденсируется и его расход на забое увеличивается.

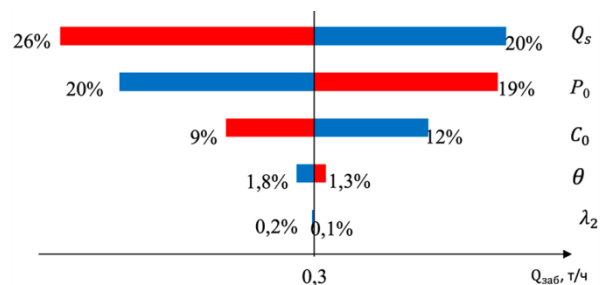


Рис. 4. Диаграмма влияния расхода теплоносителя на устье, устьевого давления, начального паросодержания, угла наклона скважины и коэффициента теплопроводности на массовый расход теплоносителя на забое скважины

Fig. 4. Diagram of the effect of heat carrier flow rate at the wellhead, wellhead pressure, initial steam quality, well inclination angle and thermal conductivity coefficient on the mass flow of heat carrier at the well bottom-hole

С увеличением угла наклона скважины глубина конденсации пара (глубина, на которой сухость пара равна нулю) уменьшается (рис. 5). Это связано с тем, что с увеличением угла наклона скважины скорость теплоносителя становится медленнее, а значит, у па-

ра при его движении по стволу имеется больше времени, чтобы сконденсироваться, и глубина его конденсации уменьшается. Наибольшее влияние на глубину конденсации оказывают начальное паросодержание, массовый расход пара на устье и коэффициент теплопроводности теплоизоляции. С увеличением сухости пара увеличивается и время, за которое пар сконденсируется, что приводит к увеличению глубины конденсации. С уменьшением коэффициента теплопроводности теплоизоляции уменьшаются и тепловые потери через стенки скважины, пар медленнее остывает и проникает глубже.

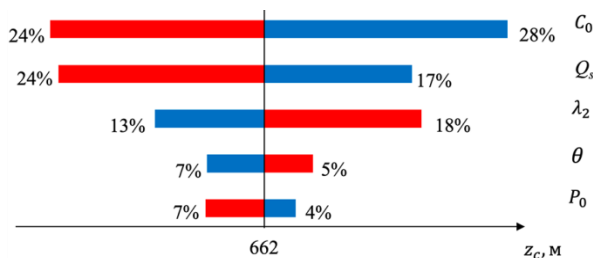


Рис. 5. Диаграмма влияния начального паросодержания, расхода теплоносителя на устье, коэффициента теплопроводности теплоизоляции, угла наклона скважины и устьевое давление на глубину конденсации пара

Fig. 5. Diagram of the effect of the initial steam quality, heat carrier flow at the wellhead, thermal conductivity coefficient of thermal insulation, well inclination angle and wellhead pressure on the depth of steam condensation

Угол наклона скважины практически не влияет на распределение давления в скважине (рис. 6).

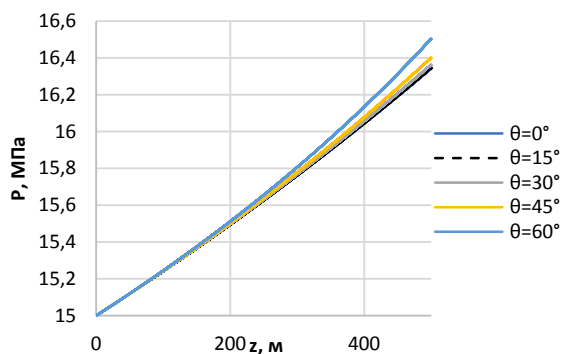


Рис. 6. Распределение давления P по глубине пласта z в зависимости величины угла наклона скважины θ

Fig. 6. Pressure P distribution over the depth of the formation z depending on the magnitude of the well inclination angle θ

Верификация модели

Для верификации модели проведено сопоставление результатов расчётов сухости пара с промышленными данными по одному из месторождений в Казахстане. Глубина скважины составляет 313 м, устьевое давление 2 МПа, сухость пара на устье 70 %, устьевая температура 485 К, забойная 484 К, массовый расход пара 0,29 т/ч. Теплоизоляция представляет собой ба-

зальтовую вату с коэффициентом теплопроводности $\lambda_2=0,035$ Вт/(м·К). Остальные параметры соответствуют данным, приведённым в табл. 1.

По результатам промысловых исследований установлено, что сухость пара на забое составляет 59 %. Расчёт по предлагаемой в статье методике даёт значение сухости пара на забое 60 %, что свидетельствует о верификации модели.

Кроме того, проведено сопоставление результатов расчётов по предлагаемой методике с моделью Моради, Аюба, Батаи, Мохаммадиана [5] и с моделью Саттера [22], основанной на тепловом балансе и уравнении Раменя для определения распределения температуры по глубине скважины. Массовый расход пара равнялся 0,63 кг/с, температура закачиваемого пара на устье 811 К, сухость пара 100 %, устьевое давление 3,45 МПа, глубина скважины 1400 м, забойная температура 573 К. Коэффициент теплопроводности теплоизоляции $\lambda_2=0,035$ Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности стали $\lambda_1=\lambda_4=43,3$ Вт/(м·К), внешний радиус теплоизоляции $r_2=0,055$ м, внутренний радиус обсадной колонны $r_3=0,08$ м, внешний радиус обсадной колонны $r_4=0,081$ м, остальные параметры соответствуют данным, приведённым в табл. 1. Из-за неполноты информации о полученных результатах проведено сопоставление глубины, на которой начинается конденсация пара, а сухость становится меньше 100 %. По данным Саттера [22] пар начинает конденсироваться на глубине 914 м, по данным Моради, Аюба, Батаи, Мохаммадиана их результат отличается по относительной ошибке не более чем на 15 % (однако в работе не приводится, в большую или меньшую сторону). По результатам методики, предлагаемой в статье, получено, что пар начинает конденсироваться на глубине 929 м, что отличается от данных Саттера на 2 %.

Заключение

Решена задача о движении теплоносителя (пар-вода) по стволу скважины с учетом угла наклона скважины, потерь тепла через стенки скважины и режимов течения жидкости.

Произведен расчёт паросодержания и расхода теплоносителя вдоль всего ствола наклонной скважины. Проанализировано влияние величины угла наклона скважины на параметры теплоносителя на забое скважины, а именно на сухость пара, расход нагнетаемой пароводяной смеси и глубину конденсации пара.

Показано, что с ростом угла наклона скважины скорость теплоносителя уменьшается, а значит уменьшается и глубина конденсации пара, и массовый расход теплоносителя на забое.

Проведена верификация модели путём сопоставления результатов расчётов с промышленными данными и моделью Моради, Аюба, Батаи, Мохаммадиана, а также моделью Саттера.

Установлено, что независимо от величины угла наклона скважины режим течения также всегда остается снарядным (пробковым).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optimizing the development strategy of combined steam flooding and cyclic steam stimulation for enhanced heavy oil recovery through reservoir proxy modeling / B. Swadesi, S.A. Muraji, A. Kurniawan, I. Widiyaningsih, R. Widiyaningsih, A. Budiarto, B.M. Aslam // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2021. – V. 11. – P. 4415–4427.
2. Белов Ю., Белова А.А., Страхов П.Н. Геологические проблемы освоения залежей углеводородов с трудноизвлекаемыми запасами // *Нефтяное хозяйство*. – 2021. – № 3. – С. 50–53.
3. Совершенствование технологии пароциклической обработки скважин с площадным применением растворителя / И.С. Закиров, А.Т. Зарипов, Е.Ф. Захарова Д.К. Шайхутдинов, А.А. Бисенова, И.Е. Белошапка // *Нефтяное хозяйство*. – 2019. – № 9. – С. 102–106.
4. Al Yousef Z., AlDaif H., Al Otaibi M. An overview of steam injection projects in fractured carbonate reservoirs in the Middle East // *Journal of Petroleum Science Research*. – 2014. – V. 3. – № 3. – P. 101.
5. Calculation of temperature profile in injection wells / B. Moradi, M. Ayoub, M. Bataee, E. Mohammadian // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – V. 10. – P. 687–697.
6. Самарцев А.А. Разработка и применение гидродинамической модели парогенератора, используемой при паротепловых методах добычи нефти // *Вестник кибернетики*. – 2003. – № 2. – С. 1–9.
7. Гильманов А.Я., Шевелёв А.П., Родионова А.В. Расчет расходных характеристик теплоносителя в стволе скважины с учетом режимов течения // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. – 2022. – Т. 8. – № 4 (32). – С. 21–39.
8. Vigneaux P.G., Catala G.N., Hulin J.P. Oil/water flow structure measurements in inclined pipes // *SPE Conference Paper SPE-18217-MS*. – SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1988. – P. 383–392.
9. Гречин Е.Г., Кузнецов В.Г., Щербakov А.В. Определение оптимального местоположения резки бокового ствола наклонно направленной скважины // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 1. – С. 45–49.
10. Moridis G.J., Queiruga A.F., Reagan M.T. Geomechanical stability and overall system behavior of sloping oceanic accumulations of hydrates responding to dissociation stimuli // *Offshore Technology Conference Paper OTC-28496-MS*. – Offshore Technology Conference. – Asia, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018. – P. 1–39.
11. Исследование влияние зенитного угла наклонно направленной скважины на напряженно-деформированное состояние околоскважинного пространства / В.С. Юдаков, Э.М. Деканоидзе, М.Ш. Мухтаров, А.А. Тиличкан // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2020. – № 8 (98). – С. 157–162.
12. Стрикун С.М., Грачев С.И., Майер С.В. Повышение эффективности применения гидродинамического симулятора «Техсхема» при планировании геолого-технических мероприятий // *Территория «Нефтегаз»*. – 2013. – № 8. – С. 60–62.
13. Садыков А.Ф. Симулятор многофазного потока PIPESIM – полный набор рабочих процессов для моделирования производственных операций // *Нефть. Газ. Новации*. – 2019. – № 12. – С. 36–40.
14. Intelligent well killing control method driven by coupling multiphase flow simulation and real-time data / Z. Zhang, B. Sun, Z. Wang, S. Pan, W. Lou, D. Sun. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – V. 213. – № 110337. – P. 1–22.
15. Multiphase flow modeling of gas intrusion in oil-based drilling mud / B. Sun, W. Fu, N. Wang, Z. Wang, Y. Gao // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 174. – P. 1142–1151.
16. You J., Rahnema H. Numerical modeling of multiphase steam flow in wellbore // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 164. – P. 259–277.
17. Sun F., Yao Y., Li X. Numerical simulation of superheated steam flow in dual-tubing wells // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – V. 8. – P. 925–937.
18. Sun F., Yao Y., Li X. The heat and mass transfer characteristics of superheated steam in horizontal wells with toe-point injection technique // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – V. 8. – P. 1295–1302.
19. Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л. Расчет термодинамических параметров опускного течения теплоносителя в скважине с учетом протаивания многолетнемерзлых пород // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 135–144.
20. Шулюпин А.Н. Гравитационная неустойчивость газожидкостного потока при освоении геотермальных месторождений // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 140–146.
21. Alarifi S.A. Workflow to predict wellhead choke performance during multiphase flow using machine learning // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – V. 214. – № 110563. – P. 1–10.
22. Satter A. Heat losses during flow of steam down a wellbore // *Journal of Petroleum Technology*. – 1965. – V. 17. – № 8. – P. 845–851.

Поступила: 16.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 06.03.2023 г.

Информация об авторах

Гильманов А.Я., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета.

Родионова А.В., студент кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета.

Шевелёв А.П., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета.

UDC 532.5-1/-9

CALCULATION OF THE BOTTOM-HOLE PARAMETERS OF THE HEAT CARRIER DURING ITS MOVEMENT ALONG THE WELLBORE OF A DIRECTIONAL WELL CONSIDERING THE FLOW STRUCTURE

Alexander Ya. Gilmanov¹,
a.y.gilmanov@utmn.ru

Anna V. Rodionova¹,
stud0000230197@study.utmn.ru

Alexander P. Shevelev¹,
a.p.shevelev@utmn.ru

¹ University of Tyumen,
15a, Perekopskaya street, Tyumen, 625003, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to involve fields with high viscosity oil in the development, since fields with low and medium viscosity oil are depleted. Oil viscosity directly depends on the temperature, therefore, thermal enhanced oil recovery methods are used to reduce the viscosity. From the point of view of using the heat injected into the formation, the most effective thermal method is the cyclic steam stimulation, i. e. cyclic steam injection into the well. However, when steam moves through the pipe, it condenses, that is why the production at the well bottom-hole are often has high water cut. Accurate calculation of the heat carrier parameters along the entire wellbore will help to avoid this problem.

The main aim of the research is to determine the effect of the well inclination angle, steam quality at the wellhead, initial pressure and thermal conductivity of thermal insulation on the heat carrier characteristics in the wellbore, considering flow modes.

Objects of the research are deposits with high-viscosity oil.

Methods: physical and mathematical modeling of injection of a two-phase (steam-water) heat carrier into the reservoir based on the laws of conservation of mass, momentum and energy, considering the movement of the heat carrier along the wellbore of a directional well, heat loss through the walls of the well and fluid flow modes.

Results. The calculation of the steam quality and heat carrier flow rate along the wellbore of a directional well was conducted. The influence of the well inclination angle on the parameters of the heat carrier at the well bottom-hole (steam quality, pressure and wellhead flow rate of the heat carrier) is analyzed. It is determined that the smaller the well inclination angle, the deeper the steam penetrates through the depth of the formation.

Key words:

High-viscosity oil, thermal enhanced oil recovery methods, cyclic steam stimulation, directional well, mass flow rate of heat carrier, steam condensation depth.

REFERENCES

- Swadesi B. Optimizing the development strategy of combined steam flooding and cyclic steam stimulation for enhanced heavy oil recovery through reservoir proxy modeling. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, vol. 11, pp. 4415–4427.
- Belov A.Yu., Belova A.A., Strakhov P.N. Geological aspects of the development of hydrocarbon deposits with hard-to-recover reserves. *Oil Industry Journal*, 2021, no. 3, pp. 50–53. In Rus.
- Zakirov I.S., Zaripov A.T., Zakharova E.F., Shaikhutdinov D.K., Bisenova A.A., Beloshapka I.E. Improving the technology of huff-and-puff well treatment with areal solvent application. *Oil Industry Journal*, 2019, no. 9, pp. 102–106. In Rus.
- Al Yousef Z. An overview of steam injection projects in fractured carbonate reservoirs in the Middle East. *Journal of Petroleum Science Research*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 101.
- Moradi B. Calculation of temperature profile in injection wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10, pp. 687–697.
- Samartsev A.A. Development and application of steam generator hydrodynamic model used under stream-and-heat methods of oil recovery. *Proceeding in Cybernetics*, 2003, no. 2, pp. 1–9. In Rus.
- Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P., Rodionova A.V. Calculation of the flow characteristics of the heat carrier in the well considering the flow modes. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2022, vol. 8, no. 4 (32), pp. 21–39. In Rus.
- Vigneaux P.G., Catala G.N., Hulin J.P. Oil/water flow structure measurements in inclined pipes. *SPE Conference Paper SPE-18217-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1988. pp. 383–392.
- Grechin E.G., Kuznetsov V.G., Sherbakov A.V. Determining the optimal location for sidetrack kickoff for inclined well. *Oil Industry Journal*, 2022, no. 1, pp. 45–49. In Rus.
- Moridis G.J., Queiruga A.F., Reagan M.T. Geomechanical stability and overall system behavior of sloping oceanic accumulations of hydrates responding to dissociation stimuli. *Offshore Technology Conference Paper OTC-28496-MS. Asia, Kuala Lumpur, Malaysia*, 2018. pp. 1–39.
- Yudakov V.S., Dekanoidze E.M., Mukhtarov M.Sh., Tilichkan A.A. Research of the influence of the zenith angle of an inclined directional well on the stress-deformed state of the bird space. *International research journal*, 2020, no. 8 (98), pp. 157–162. In Rus.
- Strikun S.M., Grachev S.I., Mayer S.V. Increasing efficiency of hydrodynamic simulator «Tecscheme» application for planning of geological-technical activities. *Oil and gas territory*, 2013, no. 8, pp. 60–62. In Rus.
- Sadykov A.F. PIPESIM Multi-phase flow simulator – complete set of operation processes to simulate industrial operations. *Neft. Gas. Novicii*, 2019, no. 12, pp. 36–40. In Rus.
- Zhang Z., Sun B., Wang Z., Pan S., Lou W., Sun D. Intelligent well killing control method driven by coupling multiphase flow simulation and real-time data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 213, no. 110337, pp. 1–22.
- Sun B., Fu W., Wang N., Wang Z., Gao Y. Multiphase flow modeling of gas intrusion in oil-based drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 1142–1151.

16. You J., Rahnema H. Numerical modeling of multiphase steam flow in wellbore. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 164, pp. 259–277.
17. Sun F. Numerical simulation of superheated steam flow in dual-tubing. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 8, pp. 925–937.
18. Sun F. The heat and mass transfer characteristics of superheated steam in horizontal wells with toe-point injection technique. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 8, pp. 1295–1302.
19. Musakaev N.G., Borodin S.L. Calculation of thermodynamic parameters of the heat transfer agent downward flow in a well, taking into account permafrost melting. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 135–144. In Rus.
20. Shulyupin A.N. Gravitational instability of gas-liquid development of geothermal fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 120–146. In Rus.
21. Alarifi S.A. Workflow to predict wellhead choke performance during multiphase flow using machine learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 214, no 110563, pp. 1–10.
22. Satter A. Heat losses during flow of steam down a wellbore. *Journal of Petroleum Technology*, 1965, vol. 17, no. 8, pp. 845–851.

Received: 16 January 2023.

Reviewed: 6 March 2023.

Information about the authors

Alexander Ya. Gilmanov, Cand. Sc., senior lecturer, University of Tyumen.

Anna V. Rodionova, student, University of Tyumen.

Alexander P. Shevelev, Cand. Sc., associate professor, professor, University of Tyumen.

УДК 550.812.1; 553.632; 553.98

РАЗРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОДТВЕРЖДАЕМОСТИ АМПЛИТУД СТРУКТУР, ПОДГОТОВЛЕННЫХ ПО ОТЛОЖЕНИЯМ СРЕДНЕГО КАРБОНА НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Галкин Владислав Игнатьевич¹,
vgalkin@pstu.ru

Суворова Анастасия Сергеевна²,
Anastasija.Suvorova@pnn.lukoil.com

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

² Пермский регион филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,
Россия, 614000, г. Пермь, ул. Пермская, 3а.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поддержания подтверждаемости ресурсов категории D_0 приростом запасов категорий C_1+C_2 на высоком уровне. Оценка ресурсов подготовленных структур производится по нефтегазоносным комплексам при наличии открытых промышленных залежей углеводородов на месторождениях-аналогах, а также при условии картирования замкнутых амплитудных понятий по отражающим поверхностям. Одним из факторов, влияющих на снижение коэффициентов подтверждаемости, является изменение структурных построений от поисково-оценочного к разведочному этапам геологоразведочных работ.

Цель: на основе ретроспективных данных создать вероятностную модель прогноза, позволяющую определить наиболее достоверные на поиски углеводородов в разрезе среднекаменноугольных отложений поднятия в рамках существующего фонда подготовленных структур, скорректировать текущую оценку ресурсов категории D_0 и исключить бурение новых поисково-оценочных скважин в пределах малоперспективных объектов.

Объекты. Для исследования создана база данных, включающая сведения о 125 подготовленных структурах, выведенных из бурения с 1997 по 2021 гг. База данных отражает информацию об амплитудах структур в соответствии с материалами на их подготовку (A_n) и согласно актуализации структурных построений по результатам глубокого поисково-оценочного, разведочного бурения, сейсморазведочных работ на открытых месторождениях и пр. (A_a).

Методика исследования основана на использовании методов математической статистики.

Результаты. Выполнен корреляционный анализ амплитуд структур по материалам паспортов и амплитуд структур, актуализированных по данным глубокого бурения. По итогам анализа между A_n и A_a выявлено разделение корреляционного поля на два подполя. При использовании детального статистического анализа соотношений A_a и A_n между подполями установлено граничное значение A_n , составляющее 13 м, что позволило разработать индивидуальную вероятностную линейную модель прогноза подтверждаемости амплитуды структуры по значениям A_n .

Ключевые слова:

амплитуда поднятия, подготовленная структура, подтверждаемость структурных построений, вероятностно-статистические модели, поисково-оценочное бурение, среднекаменноугольные отложения.

Введение

На территории Пермского края в разрезе среднекаменноугольных отложений C_2 промышленно нефтегазоносными комплексами являются верейский терригенно-карбонатный и верхневизейско-башкирский карбонатный [1].

Как правило, количественный прогноз нефтеносности локальных поднятий, подготовленных к глубокому бурению, осуществляется исходя из морфологических характеристик структур – амплитуды, площади и др. [2]. Изменение структурных построений от этапа подготовки структуры к разведочному этапу играет значимую роль в подтверждаемости ресурсов категории D_0 приростом запасов категорий C_1+C_2 [3, 4].

В работе выполнен анализ изменения амплитуд структур по отражающим горизонтам I^K и I^H , приуроченных к кровлям верейских терригенных и башкирских карбонатных отложений, соответственно. Исследование проведено для поднятий, подготовленных

по результатам структурного бурения, сейсморазведочных работ МОГТ 2D и МОГТ 3D, а также комплексом этих методов и выведенных из глубокого бурения с 1997 по 2021 гг. На основе изменения амплитуд структур в зависимости от этапа геологоразведочных работ выполнено построение вероятностно-статистической модели.

Возможности применения статистических оценок для решения аналогичных задач приведены в работах [5–21].

Использование корреляционного анализа для сопоставления амплитуд A_n и A_a

Первоначально выполним сравнение амплитуд структур согласно паспортам на их подготовку (A_n) и амплитуд структур согласно актуализации структурных построений (A_a) и оценим связь между A_n и A_a путем построения поля корреляции между ними. Количественно определим связь путем построения уравнения регрессии и вычисления коэффициента корреляции r (рис. 1, а).

Анализ полученных данных демонстрирует, что несмотря на наличие статистически значимой корреляционной связи ($r=0,766$; $p=0,0000000$), в пределах поля корреляции наблюдается два подполя, в рамках которых соотношения между An и Aa значительно различаются.

Условно границу между этими подполями можно провести по $An=20$ м. Поля корреляции между An и Aa , уравнения регрессии и коэффициент корреляции r , согласно вышеприведенному условию, приведены на рис. 1, б. Отсюда видно, что поля корреляции имеют различные виды: при $An<20$ м связь между An и Aa слабая ($r=0,21$); при $An>20$ м связь между An и Aa достаточно тесная ($r=0,57$).

Разработка вероятностной модели

С целью выявления различий в соотношениях между An и Aa вычислим значения t -критерия Стьюдента и критерия Пирсона χ^2 в зависимости от значений An (табл. 1). Использование данных критериев для решения подобных задач приведено в работах [22–24].

Для более детального статистического анализа значений An и Aa исследуем их распределения (табл. 2). Оптимальные величины интервалов значений показателей вычисляются по формуле Стерджеса [25]:

$$\Delta X = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{1 + 3,32 \cdot \lg N},$$

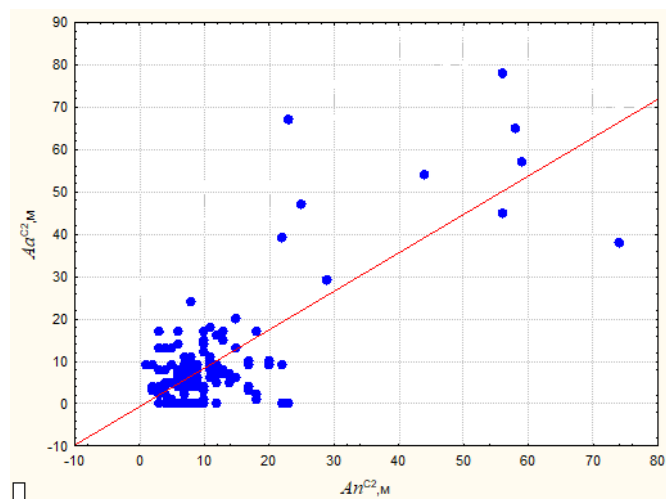
где $A_{\max}$ – максимальное значение амплитуды структуры, м; $A_{\min}$ – минимальное значение амплитуды структуры, м; N – количество структур.

В каждом интервале определяются частоты по формуле [26]:

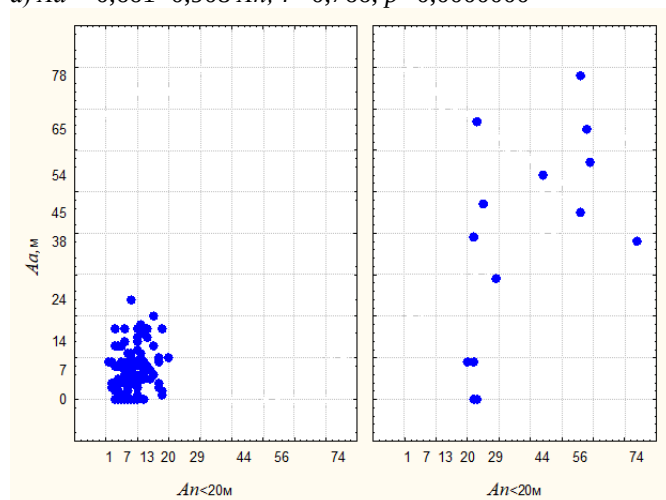
$$P(X) = \frac{N_k}{N_g},$$

где $P(X)$ – частота в k -м интервале для группы An ($q=1$), $q=2$ соответствует группе Aa ; N_k – число случаев содержания показателя $P(X)$ в k -м интервале; N_q – объем выборки для 1 и 2 классов.

Распределение частот в исследуемых классах структур приведено в табл. 2.



а) $Aa = -0,661 + 0,908 An$; $r = 0,766$; $p = 0,0000000$



б) $An < 20$ м $Aa = 4,298 + 0,271 An$; $r = 0,21$; $p = 0,027$
 $An > 20$ м $Aa = 8,995 + 0,771 An$; $r = 0,57$; $p = 0,034$

Рис. 1. Поля корреляции: а) для всех структур; б) для структур с $An < 20$ м и $An > 20$ м

Fig. 1. Correlation fields: а) for all structures; б) for structures with $An < 20$ m and $An > 20$ m

Таблица 1. Сравнение средних значений An и Aa

Table 1. Comparison of mean values of An and Aa

Класс Category	Статистические характеристики амплитуд, м Statistical characteristics of amplitudes, m		Критерии/Criteria	
	An/Ap	Aa/Aa	$\frac{t}{p}$	$\frac{\chi^2}{p}$
$An < 20$ м/ $Ap < 20$ м	8,7±4,1, n=110	6,7±5,3, n=110	$\frac{3,129724}{0,001989}$	$\frac{10,58157}{0,005038}$
$An > 20$ м/ $Ap > 20$ м	38,0±18,8, n=14	38,3±25,7, n=14	$\frac{-0,033574}{0,973473}$	$\frac{0,427970}{0,807360}$

Таблица 2. Распределение частоты значений An и Aa

Table 2. Distribution of the frequency of Ap and Aa values

Параметр Parametric variable	Интервалы варьирования An и Aa , м, при $An < 20$ м Intervals of variation of Ap and Aa , m, at $Ap < 20$ m					
	0–4	4–8	8–12	12–16	16–20	20–24
An/Ap	0,163	0,390	0,263	0,109	0,072	–
Aa/Aa	0,400	0,272	0,163	0,090	0,063	0,009
	Интервалы варьирования An и Aa , м, при $An > 20$ м Intervals of variation of Ap and Aa , m, at $Ap > 20$ m					
	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70
An/Ap	0,071	0,50	–	0,071	0,285	0,071
Aa/Aa	0,285	0,071	0,142	0,142	0,142	0,142

Для сравнения плотностей распределений амплитуд структур, приведенных в табл. 2, в изучаемых классах применим статистику Пирсона χ^2 [3, 8]. Значения критерия χ^2 приведены в табл. 1. По критерию χ^2 изучаемые показатели статистически различны при $An < 20$ м, при $An > 20$ м они статистически не различаются. Таким образом, статистически установлено, что соотношения между An и Aa различаются в зависимости от значений An .

Далее для установления более точной границы различных соотношений между An и Aa сформирована изучаемая выборка по принципу от минимального ($An^{\min}=1,0$ м) до максимального ($An^{\max}=74,0$ м) значений. По этим данным построены уравнения регрессии

An от Aa . Первое уравнение регрессии построено по 6 данным, следующее – при $n=7$, и так далее до $n=124$. Таким образом, построено 119 уравнений.

В результате комплексного анализа построенных уравнений регрессии установлена граница An , равная 13 м, после которой уравнения становятся статистически значимыми. Здесь необходимо отметить, что при $An=13$ м наблюдается статистически значимая зависимость An от Aa , далее при повышении значений An данная статистически значимая корреляция между An и Aa сохраняется.

По данной величине статистически исследуем значения Aa по критериям t и χ^2 , которые приведены в табл. 3. Распределение частот в исследуемых классах приведено в табл. 4.

Таблица 3. Сравнение средних значений Aa

Table 3. Comparison of the mean values of Aa

Параметр Parametric variable	Статистические характеристики амплитуд, м Statistical characteristics of amplitudes, m		Критерии Criteria $\frac{t}{p}$ $\frac{\chi^2}{p}$	Верхняя строка – уравнение вероятности принадлежности к классу $An > 13$ м; средняя – область применения модели; нижняя – диапазон изменения вероятности Upper line is the equation of the probability of belonging to the class $Ap > 13$ m; medium – the scope of the model; lower one is the range of probability variation
	$An < 13$ м $Ap < 13$ м	$An > 13$ м $Ap > 13$ м		
Aa/Aa	$\frac{6,2 \pm 5,2}{0,579 \pm 0,026}$	$\frac{22,7 \pm 23,51}{0,413 \pm 0,149}$	$\frac{-10,3469}{0,000000}$ $\frac{36,23078}{0,000000}$	$P(An) = 0,348 + 0,00881 An$ 1,0–74,0 м 0,356–0,999

Таблица 4. Распределение частот значений Aa

Table 4. Distribution of the frequencies of Aa values

Класс Category	Интервалы варьирования Aa , м/ Aa variation intervals, m							
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80
	C_2							
$An < 13$ м/ $Ap < 13$ м	0,808	0,182	0,010	–	–	–	–	–
$An > 13$ м/ $Ap > 13$ м	0,466	0,200	0,033	0,067	0,067	0,067	0,067	0,033

Отсюда видно, что в диапазоне 0–10 м имеется превышение значений частот для $An < 13$ м над частотами при $An > 13$ м. При Aa в диапазоне 10–20 м величины частот достаточно близки. В интервале 20–30 м происходит, наоборот, превышение значений частот

при $An > 13$ м над частотами $An < 13$ м. При $Aa > 30$ м встречаются только значения при $An > 13$ м. По критерию χ^2 распределения значений Aa являются статистически различными (табл. 3). Таким образом, выполненный детальный статистический анализ соот-

ношений Aa и An позволил обосновать критическое значение An , которое составляет 13 м.

Данная величина будет использована для построения индивидуальной вероятностной линейной модели принадлежности к совокупности структур, которые подтвердятся по значениям An [6]. Для построения данной модели в каждом интервале определяются вероятности принадлежности к классу $An > 13$ м $P(An\text{-инт})$. Далее эти значения сопоставляются со средними интервальными значениями $An\text{-инт}$. По этим данным строится уравнение регрессии и вычисляется парный коэффициент корреляции r . При построении моделей обязательным условием является, что среднее значение $P(An)$ для класса $An > 13$ м должно быть больше 0,5, а для $An < 13$ м – меньше 0,5. Графическое изображение зависимостей $P(An)$ от значений An приведены на рис. 2.

По данной зависимости вычислены все значения $P(An)$ изучаемой выборки. Средние значения $P(An)$ для изучаемых классов структур приведены в табл. 5: средние значения для класса структур у которых $An > 13$ м равны $0,579 \pm 0,026$, для структур, у которых $An < 13$ м, – $0,413 \pm 0,149$. По критериям t и χ^2 они являются статистически различными. Таким образом, используя разработанную зависимость $P(An)$ от An , можно ранжировать структуры по степени перспективности.

Рассмотрим зависимости $P(An)$ от An по методам подготовки структур к глубокому нефтепоисковому бурению (рис. 3). В табл. 5 приведены средние значе-

ния $P(An)$ в зависимости от методов подготовки структур.

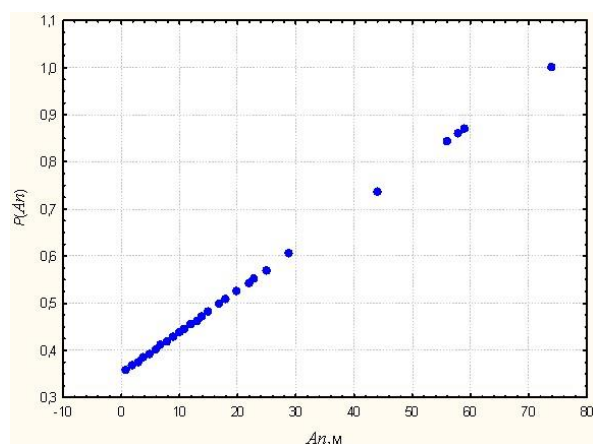


Рис. 2. Зависимость $P(An)$ от An

Fig. 2. Relationship of $P(An)$ and An

Отсюда видно, что при $An < 13$ м средние значения $P(An)$ для всех вариантах меньше 0,5, при $An > 13$ м имеются данные по МОГТ 2D и МОГТ 3D, которые больше 0,5. Средние значения $P(An)$ статистически различны. В табл. 6 приведены распределения значений вероятностей $P(An)$ в зависимости от критического значения An .

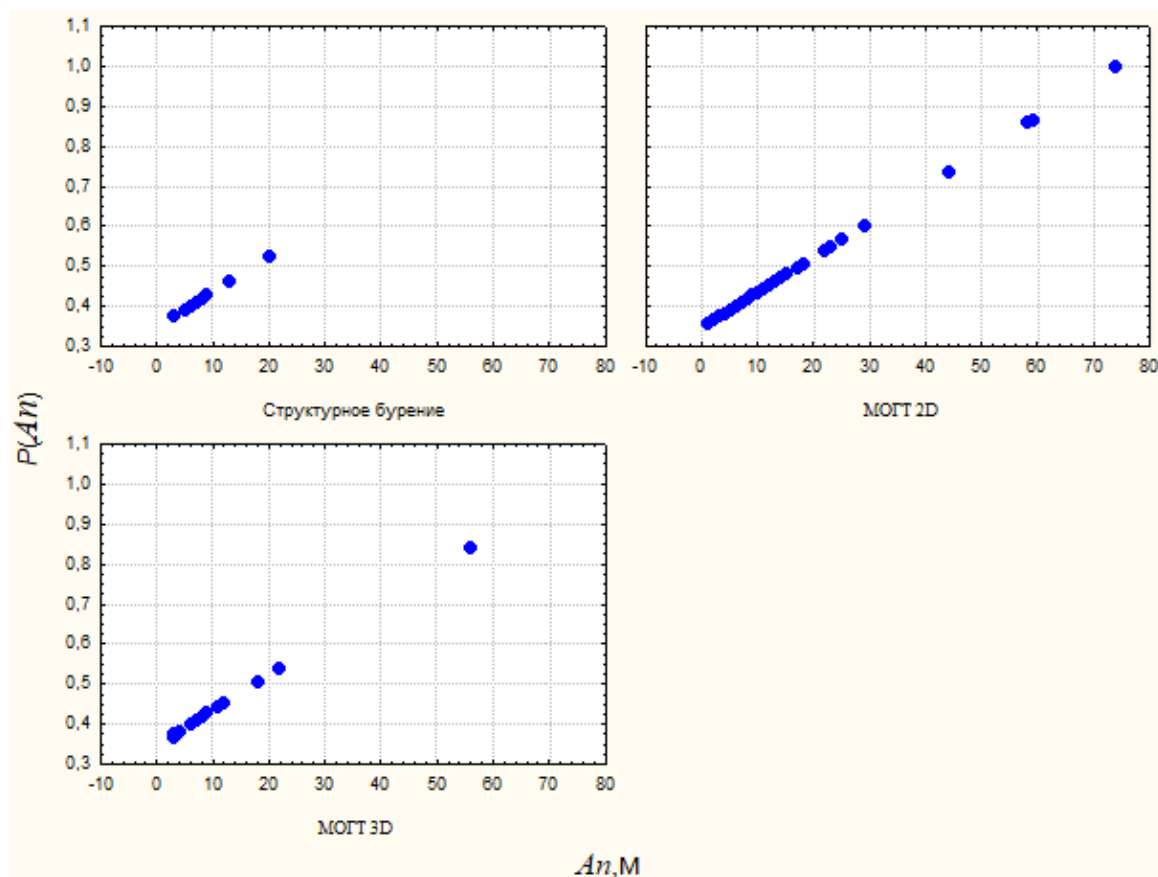


Рис. 3. Зависимость $P(An)$ от An по методам подготовки структур

Fig. 3. Relationship of $P(An)$ and An by the methods of preparing structures

Таблица 5. Сравнение средних значений $P(An)$

Table 5. Comparison of mean values of $P(Ap)$

Показатель Parameter	Статистические характеристики амплитуд, м Statistical characteristics of amplitudes, m		Критерии/Criteria	
	$An > 13$ м/ $Ap > 13$ м	$An < 13$ м/ $Ap < 13$ м	$\frac{t}{p}$	$\frac{\chi^2_p}{p}$
Структурное бурение/Structural drilling				
$P(An)/P(Ap)$	–	0,413±0,028	–	–
МОГТ 2D/CDP 2D survey				
$P(An)/P(Ap)$	0,580±0,028	0,416±0,151	$\frac{8,21193}{0,000000}$	$\frac{48,74733}{0,000000}$
МОГТ 3D/CDP 3D survey				
$P(An)/P(Ap)$	0,608±0,160	0,408±0,024	$\frac{5,87733}{0,000003}$	$\frac{23,16800}{0,000000}$

Таблица 6. Распределение частот значений $P(An)$

Table 6. Distribution of frequencies of $P(Ap)$ values

Класс Category	Интервалы варьирования $P(An)/P(Ap)$ variation intervals						
	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,6	0,6–0,7	0,7–0,8	0,8–0,9	0,9–1,0
Структурное бурение/Structural drilling							
$An < 13$ м/ $Ap < 13$ м	0,364	0,636	–	–	–	–	–
$An > 13$ м/ $Ap > 13$ м	–	–	–	–	–	–	–
МОГТ 2D/CDP 2D survey							
$An < 13$ м/ $Ap < 13$ м	0,222	0,778	–	–	–	–	–
$An > 13$ м/ $Ap > 13$ м	–	–	–	–	–	0,095	0,048
МОГТ 3D/CDP 3D survey							
$An < 13$ м/ $Ap < 13$ м	0,272	0,728	–	–	–	–	–
$An > 13$ м/ $Ap > 13$ м	–	0,143	0,572	–	–	0,285	–

По данным табл. 6 вычислены значения χ^2 , которые показывают, что для методов подготовки структур МОГТ 2D и МОГТ 3D плотности распределений значений $P(An)$ статистически различны (табл. 5).

Закключение

В результате сопоставления амплитуд структур по данным структурного бурения, сейсморазведочных работ МОГТ 2D и МОГТ 3D с фактическими амплитудами поднятий, установленными по результатам глубокого бурения, по отражающим поверхностям среднего карбона на территории Пермского края, установлено статистически обоснованное критическое значение $An=13$ м. Это позволило разработать

индивидуальную вероятностную линейную модель принадлежности к совокупности структур, которые подтвердятся по значениям амплитуды подготовленных поднятий.

Разработанная вероятностная модель $P(An)$ от An для среднекаменноугольных отложений позволит ранжировать подготовленные поднятия по степени перспективности до ввода структур в глубокое бурение. Что, в свою очередь, позволит избежать разбуривания малоперспективных объектов, скорректировать текущую оценку ресурсов категории D_0 и повысить подтверждаемость ресурсов приростом запасов категорий C_1+C_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галкин В.И., Соловьев С.И. Районирование территории Пермского края по степени перспективности приобретения нефтяных участков недр // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 16. – С. 14–24.
- Лядова Н.А., Яковлев Ю.А., Распопов А.В. Геология и разработка нефтяных месторождений Пермского края. – М.: ВНИИОЭНГ, 2010. – 335 с.
- Галкин В.И., Жуков Ю.А., Шишкин М.А. Применение вероятностных моделей для локального прогноза нефтегазоносности. – Екатеринбург: Изд-во Уро РАН, 1990. – 108 с.
- Zhuoheng Ch., Osadetz K.G. Geological risk mapping and prospect evaluation using multivariate and Bayesian statistical methods, western Sverdrup Basin of Canada // AAPG Bulletin. – 2006. – V. 90. – № 6. – P. 859–872.
- Галкин В.И., Мелкишев О.А., Варушкин С.В. Разработка статистической модели прогноза нефтегазоносности по газовыделениям в толще Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 4–13.
- Южаков А.Л., Путилов И.С. Прогнозирование нефтегазоносности южной части Пермского края с использованием регионального трехмерного моделирования // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 317–330.
- Галкин В.И., Растегаев А.В., Галкин С.В. Вероятностно-статистическая оценка нефтегазоносности локальных структур. – Екатеринбург: Изд-во Уро РАН, 2001. – 277 с.
- Путилов И.С., Юрьев А.В., Винокурова Е.Е. Типизация терригенных пород-коллекторов с применением метода накопленной корреляции и индивидуальных вероятностных моделей на примере месторождения им. Сухарева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 75–83.
- Галкин В.И., Резвухина Д.В. Разработка статистических моделей для прогноза поглощений по характеристикам разрывных нарушений // Недропользование. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 103–108.
- Лигинькова Я.С. Исследование влияния геолого-промысловых характеристик Турнейского пласта на обводненность продукции скважин // Недропользование. – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 15–20.
- Кошкин К.А. Разработка вероятностно-статистических моделей для оценки перспектив нефтегазоносности пластов Тл2-б и Бб Пожвинского участка // Недропользование. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 4–16.
- Галкин С.В., Лобанов Д.С. Использование многомерных статистических моделей при оперативном контроле извлекаемых запасов визейских залежей Пермского края // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 126–136.

13. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. Dynamic data analysis. – Paris: Kappa Engineering, 2008. – 694 p.
 14. Van Golf-Racht T.D. Fundamentals of fractured reservoir engineering. – Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier scientific publishing company, 1982. – 709 p.
 15. Darling T. Well logging and formation evaluation. – Eastbourne: Gardners Books, 2010. – 336 p.
 16. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to liner regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
 17. Armstrong M. Basic linear geostatistics. – Berlin: Springer, 1998. – 155 p.
 18. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics. – Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1994. – 231 p.
 19. Bartels C.P.A., Ketellapper R.H. Exploratory and explanatory statistical analysis of spatial data. – Boston: Martinus Nijhoff Publishing, 1979. – 268 p.
 20. Goodwin N. Bridging the gap between deterministic and probabilistic uncertainty quantification using advanced proxy based methods. SPE Reservoir Simulation Symposium. – Houston: Richardson Publ., 2015. – P. 1796–1868.
 21. Кочнев А.А., Галкин С.В. Прогнозная оценка эффективности технологии радиального бурения для турнейских эксплуатационных объектов платформенной части Пермского края // Недропользование. – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 263–274.
 22. Tran D.T., Gabbouj M., Iosifidis A. Multilinear class-specific discriminant analysis // Pattern Recognition Letters. – 2017. – V. 100. – P. 131–136. DOI: 10.1016/j.patrec.2017.10.027.
 23. Horne R.N. Modern well test analysis: a computer aided approach. 2nd ed. – Palo Alto: PetrowayInc, 2006. – 257 p.
 24. Maurya S.P., Singh N.P., Singh K.H. Geostatistical inversion. Seismic inversion methods: a practical approach. – Cham: Springer International Publ., 2020. – 216 p.
 25. Девис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 319 с.
 26. Девис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. – М.: Недра, 1990. – Кн. 2. – 426 с.
- Поступила 03.02.2023 г.
Прошла рецензирование: 13.02.2023 г.*

Информация об авторах

Галкин В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Суворова А.С., ведущий геолог отдела оценки ресурсов Пермского региона Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 550.812.1; 553.632; 553.98

DEVELOPMENT OF A STATISTICAL MODEL FOR PREDICTING THE CONFIRMABILITY OF THE AMPLITUDES OF STRUCTURES PREPARED FROM THE DEPOSITS OF THE MIDDLE CARBONIFEROUS IN THE PERM REGION

Vladislav I. Galkin¹,
vgalkin@pstu.ru

Anastasia S. Suvorova²,
Anastasija.Suvorova@pnn.lukoil.com

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

² LUKOIL-Engineering LLC PermNIPIneft branch in Perm,
3a, Permskaya street, Perm, 614000, Russia.

The relevance of the research is caused by the requirement to maintain the confirmability of resources of category D_0 with an addition to reserves of categories C_1+C_2 at a high level. The assessment of the resources of the prepared structures is carried out by total petroleum systems in the presence of open industrial deposits of hydrocarbons in analog fields, as well as under the condition of mapping closed amplitude structures on reflective surfaces. One of the factors influencing the decrease in the confirmability factors is the change in the structural constructions from the prospecting and evaluation to the exploration stages of geological exploration.

The main aim of the research is to create, based on retrospective data, a probabilistic prediction model that allows us to determine the most reliable hydrocarbon prospecting in the context of medium-carboniferous uplift deposits within the existing fund of prepared structures, adjust the current assessment of resources of category D_0 and exclude drilling of new exploration and evaluation wells within unpromising objects.

Objects. The author have created the database for the research, which includes information about 125 prepared structures removed from drilling from 1997 to 2021. It includes information about the amplitudes of structures in accordance with the materials for their preparation (Ap) and according to the updating of structural constructions based on the results of deep exploration, exploration drilling, seismic exploration in open fields, etc. (Aa).

The research methodology is based on the use of mathematical statistics methods.

The results. The correlation analysis of the amplitudes of structures based on the materials of passports and the amplitudes of structures updated according to deep drilling data was performed. According to the results of the analysis, the correlation field was divided into two subfields between Ap and Aa. When using a detailed statistical analysis of the Aa and Ap correlations between the subfields, a boundary value of 13 m was established, which made it possible to develop an individual probabilistic linear model for predicting the confirmability of the amplitude of the structure by the values of the Ap.

Key words:

amplitude of the structure, prospect structure, confirmability of structural constructions, probabilistic and statistical models, prospecting and evaluation drilling, medium-carboniferous deposits.

REFERENCES

- Galkin V.I., Solovyov S.I. Rayonirovanie territorii Permskogo kraya po stepeni perspektivnosti priobreteniya neftyanykh uchastkov nedr [Regionalization of the territory of the Perm region according to the degree of prospects for the acquisition of oil sub-surface areas]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2015, no. 16, pp. 14–24.
- Lyadova N.A., Yakovlev Yu.A., Raspopov A.V. *Geologiya i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy Permskogo kraya* [Geology and development of oil fields in the Perm region]. Moscow, VNIIOENG Згидю, 2010. 335 p.
- Galkin V.I., Zhukov Yu.A., Shishkin M.A. *Primeneniye veroyatnostnykh modeley dlya lokalnogo prognoza neftegazonosnosti* [The application of probabilistic models for the local forecast of oil and gas potential]. Yekaterinburg, Uro RAN Publ., 1990. 108 p.
- Zhuoheng Ch., Osadetz K.G. Geological risk mapping and prospect evaluation using multivariate and bayesian statistical methods, Western Sverdrup Basin of Canada. *AAPG Bulletin*, 2006, vol. 90, no. 6, pp. 859–872.
- Galkin V.I., Melkishev O.A. Varushkin S.V. Development of the statistical model to forecast oil and gas potential according to gas content in the Verkhnekamskoe deposit of potassium and magnesium salts. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 4–13. In Rus.
- Yuzhakov A.L., Putilov I.S. Forecasting the oil and gas content of the southern part of the Perm krai using regional three-dimensional modeling. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 317–330. In Rus.
- Galkin V.I., Rastegaev A.V., Galkin S.V. *Veroyatnostno-statisticheskaya otsenka neftegazonosnosti lokalnykh struktur* [Probabilistic-statistical assessment of oil and gas potential of local structures]. Yekaterinburg, Uro RAN Publ., 2001. 277 p.
- Putilov I.S., Yuriev A.V., Vinokurova E.E. Typing of terrigenous reservoir rocks using the cumulated correlation method and individual probabilistic models on the example of field named after Sukharev. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 75–83. In Rus.
- Galkin V.I., Rezvukhina D.V. Development of statistical models for predicting losses based on the characteristics of discontinuities. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 102–108. In Rus.
- Liginkova Y.S. Study of the influence of geological and production characteristics of the Tourmeisian formation on well production watering. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 15–20. In Rus.
- Koshkin K.A. Development of probabilistic and statistical models for evaluation of oil and gas potential of T12-b and Bb reservoirs of Pozhvinskiy sector. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 4–16. In Rus.
- Galkin S.V., Lobanov D.S. Use of multidimensional statistical models for operational control of recoverable reserves for the

- Visean deposits of the Perm region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 126–136. In Rus.
13. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. *Dynamic data analysis*. Paris, Kappa Engineering, 2008. 694 p.
 14. Van Golf-Racht T.D. *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Amsterdam, Oxford, New York, Elsevier scientific publishing company, 1982. 709 p.
 15. Darling T. *Well logging and formation evaluation*. Eastbourne, Gardners Books, 2010. 336 p.
 16. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to liner regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
 17. Armstrong M. *Basic Linear Geostatistics*. Berlin, Springer, 1998. 155 p.
 18. Yarus J.M. *Stochastic modeling and geostatistics*. Tulsa, Oklahoma, AAPG, 1994. 231 p.
 19. Bartels C.P.A., Ketellapper R.H. *Exploratory and explanatory statistical analysis of spatial data*. Boston, Martinus Nijhoff Publ., 1979. 268 p.
 20. Goodwin N. Bridging the gap between deterministic and probabilistic uncertainty quantification using advanced proxy based methods. *SPE Reservoir Simulation Symposium 2015*. Houston, Richardson Publ., 2015. pp. 1796–1868.
 21. Kochnev A.A., Galkin S.V. Forecast assessment of efficiency of radial drilling technology for Tournesian operating objects of the platform part of the Perm region. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 263–274. In Rus.
 22. Tran D.T., Gabbouj M., Iosifidis A. Multilinear class-specific discriminant analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2017, vol. 100, pp. 131–136. DOI: 10.1016/j.patrec.2017.10.027.
 23. Horne R.N. *Modern well test analysis: a computer aided approach*. Palo Alto, PetrowayInc, 2006. 257 p.
 24. Maurya S.P., Singh N.P., Singh K.H. *Geostatistical inversion. Seismic inversion methods: a practical approach*. Cham, Springer International Publ., 2020. 216 p. DOI: 10.1007/978-3-030-45662-7.
 25. Devis J.S. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [The statistical analysis of data in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. B. 1, 319 p.
 26. Devis J.S. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [The statistical analysis of data in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. B. 2, 426 p.

Received: 3 February 2023.

Reviewed: 13 February 2023.

Information about the authors

Vladislav I. Galkin, Dr. Sc., professor, head of the Department of Oil and Gas Geology, Perm National Research Polytechnic University.

Anastasia S. Suvorova, senior geologist, LUKOIL-Engineering LLC PermNIPIneft branch in Perm.

УДК 504.06

РЕАБИЛИТАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ОТРАБОТАННЫХ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЛЕВИХИНСКОГО РУДНИКА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Рыбникова Людмила Сергеевна¹,
luserib@mail.ru

Рыбников Петр Андреевич¹,
ribnikoff@yandex.ru

Наволокина Вера Юрьевна¹,
vunavolokina@gmail.com

¹ Институт горного дела УрО РАН,
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность работы связана с необходимостью реабилитации отработанных медноколчеданных месторождений, испытывающих воздействие кислых шахтных вод, и обоснования мероприятий по очистке действующего пруда-осветлителя.

Цель: исследование состава шлама и обоснование мероприятий, направленных на снижение экологической нагрузки на гидросферу.

Объекты: пруд-осветлитель и шлам нейтрализации кислых шахтных вод Левихинского медноколчеданного рудника.

Методы. Лабораторные исследования вод и донных отложений выполнялись с использованием атомноэмиссионного и масс-спектрального анализа; методами пламенно-эмиссионной спектрометрии, пламенно атомно-абсорбционной, фотометрическим методом с реактивом Несслера, титриметрическим, меркуметрическим и потенциометрическим методами; масс-спектрометрией с ионизацией в индуктивно связанной плазме и гравиметрическим методом.

Результат. В пробах шлама преобладают сульфаты (гипс и бассанит), оксиды и гидроксиды железа (гётит), карбонаты (кальцит), глинистые минералы (преимущественно гидрослюда) и хлорсодержащие соли (карналлит). В химическом составе шлама существенно преобладают оксиды железа, серы и кальция. Анализ водной и кислотной вытяжки показал, что из шлама может выщелачиваться до 24 элементов, относящихся ко 2, 3 и 4 классу опасности, в концентрациях, превышающих предельно допустимые значения для водоемов рыбохозяйственного значения. Проанализировано несколько вариантов использования шлама из пруда-осветлителя: рекультивация отвалов пустых пород и некондиционных руд; закладка выработанного пространства карьеров; производство строительных материалов; извлечение ценных компонентов; складирование после обезвоживания шлама в геотубах (Geotube). Наиболее рациональным является использование шлама для производства строительных материалов на основе государственно-частного партнерства, реализация которого позволит государству и частному сектору извлекать взаимную выгоду.

Ключевые слова:

Гидросфера, медноколчеданное месторождение, загрязняющие вещества, кислые шахтные воды, шлам, пруд-осветлитель.

Введение

Горнодобывающая промышленность является значимым фактором преобразования окружающей среды и источником геохимической нагрузки на природные комплексы горнопромышленных территорий. Кислые шахтные воды представляют собой одну из наиболее распространенных и серьезных проблем в этой области. Насыщенные токсичными металлами, они образуются в результате сернокислотного выветривания сульфидных минералов как при отработке, так и после ее завершения. Продолжительность формирования кислых вод после закрытия рудника может составлять сотни или даже тысячи лет [1].

Очистка кислых шахтных вод является важной экологической задачей. Основная сложность заключается в том, что необходимо очищать большие объемы воды, которые представляют собой сложные многокомпонентные системы с низким pH и высокими концентрациями металлов и сульфатов. Во избежание неконтролируемого воздействия на окружающую среду эти воды необходимо собирать и доводить содержание загрязняющих компонентов до нормативных показателей перед сбросом в реки.

Для очистки кислых шахтных вод обычно используется два типа систем, известных как активные (с

добавлением щелочных реагентов) и пассивные (с использованием только естественных источников энергии и биологических, геохимических и гравитационных процессов) [2]. Активная система очистки эффективно используется для снижения кислотности и содержания металлов в кислых шахтных стоках, однако для полной очистки в каждом случае необходимо подбирать наиболее подходящий и экономически выгодный реагент.

Внесение нейтрализующих кислотность и осаждающих металлы химических реагентов является обычной общемировой и российской практикой [3]. На закрытых медноколчеданных рудниках Среднего Урала (Левихинский, Карпушихинский, Ломовский, Дегтярский) используется известь для приготовления известкового молока для повышения pH и осаждения растворенных металлов. В результате образуется осадок различного состава (в зависимости от вида нейтрализующего вещества и состава воды, подлежащей очистке), который накапливается в прудах-осветлителях. За период эксплуатации пруды заполняются шламами и, как следствие, снижается объем, доступный для отстаивания воды после нейтрализации. Возникает проблема периодической очистки таких прудов-осветлителей и обоснования возможности

использования шлама для его дальнейшего использования или безопасного складирования.

За годы эксплуатации (с 1959 по 2022 г.) пруд-осветлитель на Левихинском медноколчеданном месторождении заполнился шламом от нейтрализации, в настоящее время примерно треть его поверхности представляет собой пляж с высохшими шламами. Эффективность очистки воды снизилась и составляет от 32–74 % для марганца и до 90–97 % для железа. В марте–мае 2020 г. кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) варьировала от 2700 по железу до 9600 для цинка [4]. В первую очередь это связано с тем, что оставшегося объема пруда-осветлителя недостаточно для отстаивания воды после нейтрализации.

В пределах горного отвода находится несколько отработанных карьеров и отвалов некондиционных руд, для рекультивации которых потенциально могут быть использованы шламы пруда-осветлителя.

Целью работы является исследование состава шлама и обоснование направления реабилитации территории отработанного Левихинского медноколчеданного месторождения для улучшения его экологического состояния и повышения степени очистки кислых шахтных вод. Для этого был выполнен анализ вещественного, минералогического и химического

состава шлама, а также воды в пруду-осветлителе и в затопленных карьерах и оценена возможность использования шлама нейтрализации кислых шахтных вод рудника.

Объект исследования

Левихинская группа медноколчеданных месторождений расположена на территории Кировградского городского округа Свердловской области, в 30 км северо-западнее г. Кировград, на восточной окраине п. Левиха.

Рудник отрабатывался с 1927 по 2003 г. Эксплуатация проводилась как открытым, так и подземным способом. До конца 1950-х гг. кислые шахтные воды без очистки сбрасывались в болото Пороховое, расположенное на северо-западе месторождения. В 1959 г. в долине р. Левихи был создан осветлительный пруд (проектный срок эксплуатации был определен в 50 лет), который к моменту остановки рудника эксплуатировался без очистки более 40 лет.

Пруд-осветлитель расположен на склоне возвышенности, на левом берегу р. Тагил (рис. 1). Согласно паспорту гидротехнического сооружения, его площадь 142 га, общий объем 3200 тыс. м³, средняя глубина 2,4 м, максимальная 5 м [5]. В настоящее время объем накопленного шлама около 2840 тыс. м³.

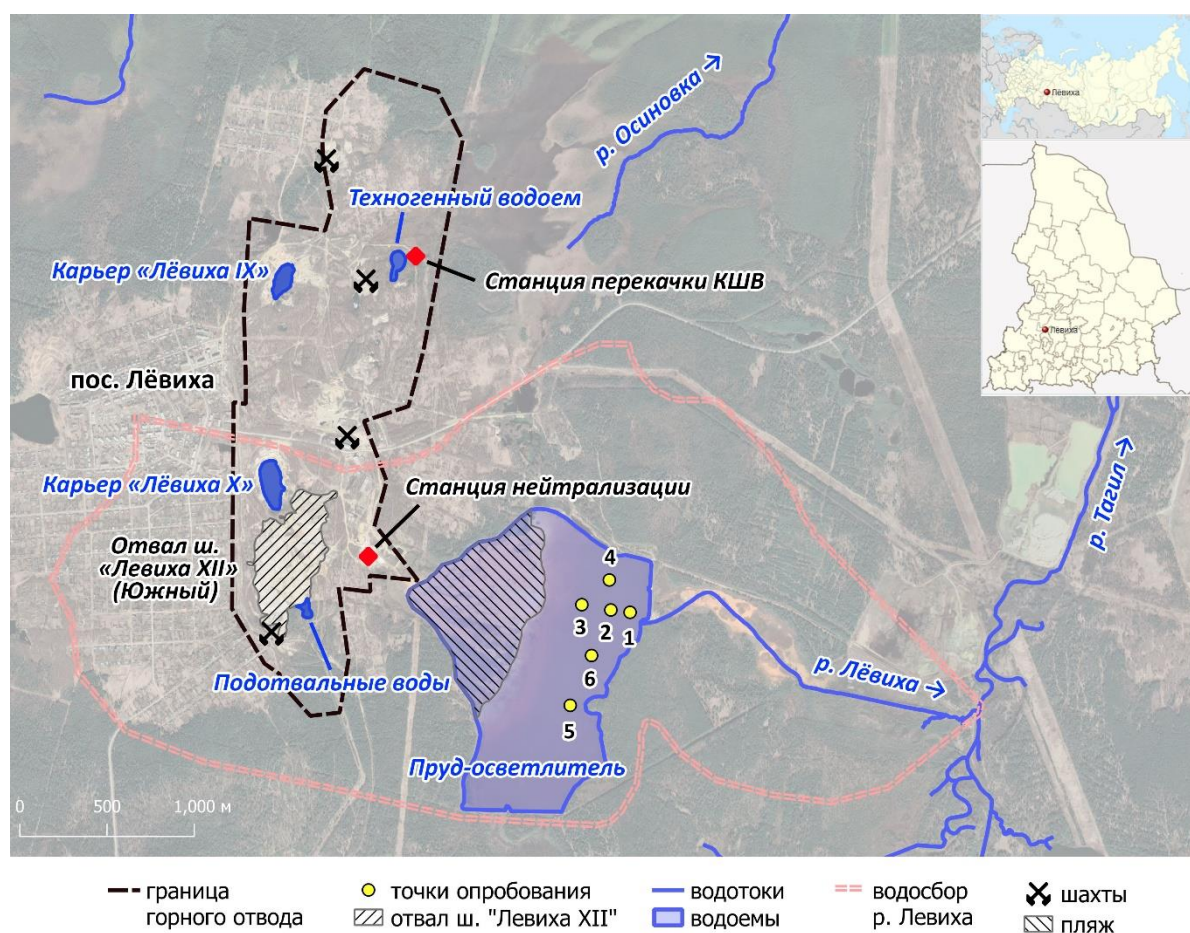


Рис. 1. Обзорная схема расположения объектов на Левихинском руднике

Fig. 1. Overview layout of objects at the Levikhinsky mine

В 2003 г. водоотлив был остановлен, депрессионная воронка заполнилась, и к 2007 г. в самой низкой точке горного отвода в провале сформировался техногенный водоем, в который происходит разгрузка кислых (рН=2,7–4,1) минерализованных (до 12 г/л) шахтных вод (КШВ) сульфатного состава с высоким содержанием Fe, Al, Mg, Zn, Cu, Mn. Расход такой разгрузки порядка 120 м³/час в 2 раза меньше, чем был водоотлив в период отработки [6, 7].

Начиная с 2007 г. нейтрализация КШВ возобновилась: из техногенного водоема шахтные воды перекачиваются на станцию нейтрализации и очищенные сточные воды поступают в пруд-осветлитель. Сброс их происходит в р. Левиху, левый приток р. Тагил (Иртышский бассейновый округ).

Химический состав воды в пруду-осветлителе

Вода имеет кислую реакцию среды (рН=3,1–4,4), минерализация изменяется от 1,5 до 4,8 г/л, Eh=218–571 мВ, что свидетельствует о высоких окислительных условиях (табл. 1).

Таблица 1. Состав воды в пруду-осветлителе

Table 1. Water composition in the clarification pond

Дата опробования Test date	Объект Object	Формула Курлова Kurlov formula
04.08.2020	Пруд-осветлитель (сброс в р. Левиху) Clarification (discharge into the Levikha river)	$M3,96 \frac{SO_4 98}{Mg 37 Ca 32 Al 21} pH 3,1$ T 20,7°C Eh 571 mV
13.10.2020		$M2,96 \frac{SO_4 93 Cl 7}{Ca 42 Mg 34 Al 16} pH 3,88$ T 7,8°C Eh 498 mV
14.04.2021		$M1,46 \frac{SO_4 98}{Ca 64 Mg 23} pH 4,44$
04.08.2021		$M3,78 \frac{SO_4 99}{Mg 42 Ca 40} pH 3,32$ T 25,7°C Eh 218 mV
16.03.2021	Пруд-осветлитель (опробование со льда) Clarification pond (testing from ice)	$M4,78 \frac{SO_4 99}{Ca 43 Mg 35 Al 16} pH 3,73$ T 0,5°C Eh 497 mV

По составу вода сульфатная (концентрация сульфат-иона до 2930 мг/л), хлор обнаружен в количестве 15–107 мг/л, гидрокарбонат-ион – не более 6 мг/л. Содержание азотистых соединений незначительно. Среди катионов на первом месте находятся магний или кальций, на третьем месте – алюминий. Состав воды, отобранной в пруду-осветлителе со льда (215 м восточнее плотины), такой же, как и в точке сброса с пруда-осветлителя.

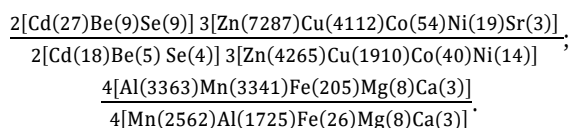
При проведении in situ анализа взвеси с глубины 2,5 м было обнаружено, что сразу же после отбора пробы рН составляет порядка 6, в течение 3–5 минут происходит снижение рН до 4. Это явление объясняется процессом гравитационной дифференциации, в результате которой осаждается шельочь и рН собственно водной части достигает тех значений, которые и фиксируются при опробовании. Показатели рН для воды в разных точках варьируют от 3,55 до 3,75 (кислая среда), для взвеси (шлам) – от 5,09 до 6,83 (слабокислая и нейтральная среда) (табл. 2).

Таблица 2. Результаты опробования in situ в пруду-осветлителе со льда (t=0,5 °C)

Table 2. Results of in situ testing in ice clarification pond (t=0,5 °C)

№ точки Point number	Eh, mV	pH, ед./units	TDS, ppt	EC, μS	Примечания Notes
1	407	3,75	2,27	4,5	Вода/Water
2	497	3,66	2,37	4,75	Вода/Water
3	220	6,7	2,0	4,0	Шлам/Sludge
4	450	3,65	2,11	4,34	Вода/Water
5	200	6,83	2,2	4,39	Шлам/Sludge
6	488	3,55	2,4	4,77	Вода/Water
	275	5,09	2,28	4,54	Шлам/Sludge

Химический состав воды на 04.08.2020 г. (числитель) и на 04.08.2021 г. (знаменатель) представлен в виде обобщенной ассоциации, где справа от наименования элемента – кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, арабскими цифрами перед квадратной скобкой показан класс опасности:



В воде в концентрациях выше ПДКх содержатся компоненты 2 (кадмий, бериллий, селен) и 3 (цинк, медь, кобальт, никель) классов опасности. Наиболее значимые превышения ПДКх зафиксированы для цинка (выше 7 тыс.), меди (выше 4 тыс.), алюминия и марганца (выше 3 тыс.).

Химический состав воды в затопленном карьере «Левиха IX»

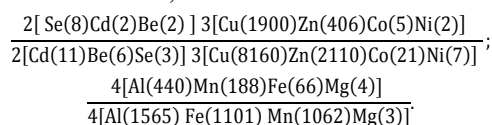
Состав подземных вод в карьере «Левиха IX» сульфатный, хлор обнаружен в количестве 11–35 мг/л, гидрокарбонат-ион – 6,1 мг/л. Среди катионов на первом месте кальций и алюминий (табл. 3). Воды кислые, водородный показатель равен 2,6–2,9. Минерализация 537–2057 мг/л. Температура подземных вод 0,5 °C, Eh=215 мВ.

Таблица 3. Состав воды в карьере IX

Table 3. Composition of water in pit IX

Дата опробования Test date	Формула Курлова Kurlov formula
28.04.2021	$M0,5 \frac{SO_4 87 Cl 12}{Ca 33 Al 25 Mg 22 NH_4 10} pH 2,9$ T 0,5°C Eh 215 mV
23.06.2021	$M2,1 \frac{SO_4 99}{Mg 27 Ca 24 Al 23 Fe^{3+} 20} pH 2,6$

Химический состав воды на 28.04.2021 г. и на 23.06.2021 г. представлен в виде обобщенной ассоциации, где справа от наименования элемента – кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, слева – класс опасности элемента:



В воде отмечается повышенное содержание компонентов 2 (кадмий, бериллий, селен), 3 (медь, цинк, кобальт, никель) класса опасности. Наиболее значи-

мые превышения ПДК_{рх} зафиксированы для меди (выше 8 тыс.) и цинка (2 тыс.).

На территории Левихинского рудника образовано 11 отвалов общей площадью 30 га, объемом 1,7 млн м³. Самый большой из них находится в южной части (отвал Южный) возле шахты «Лёвиха XII», он имеет площадь 22,6 га и объем 1,45 млн м³ [8].

В карьерных пространствах и зонах обрушения сформировано 14 водоемов площадью 10 га (4 га карьеры и 6 га провалы и зоны обрушения). Суммарный полный объем карьеров «Лёвиха IX» и «Лёвиха X» по контуру верхнего борта составляет 3753 тыс. м³, из них затопленная часть около 15 %.

Методы исследования

С целью изучения минералогического и химического состава шлама в пруду-осветлителе в мае 2021 г. были отобраны 6 проб. Опробование проводилось с лодки с помощью пробоотборника Робур-ИЛ. Максимальная мощность отложений составила 7 м в точке № 1, в остальных точках точное значение не получено из-за наличия на дне уплотненного шлама. Слой воды составляет 1–4 м (табл. 4).

Таблица 4. Глубина воды и мощность шлама

Table 4. Water depth and sludge power

Показатели, м Indicators, m	№ точки опробования Sampling point number					
	1	2	3	4	5	6
Глубина воды до дна Water depth to the bottom	4	4	1	4	1	2
Мощность шлама Sludge thickness	7	>1	>1,5	>2	>2,5	>4

Минералогический состав шлама анализировался в секторе наноминералогии и центре коллективного пользования уникальным научным оборудованием Пермского государственного национального исследовательского университета с использованием дифрактометрического анализа.

Анализ химического состава шлама пруда-осветлителя, водная и кислотная вытяжка из него (с применением азотной кислоты) выполнены в аналитическом сертификационном испытательном центре института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка) с использованием атомноэмиссионного анализа (ИСП-АЭС) и масс-спектрального анализа (ИСП-МС). В каждой вытяжке было определено по 67 компонентов, в пробах шлама по 64.

Химический состав воды в пруду-осветлителе исследовался в течение 2020–2021 гг., анализы выполнены в химико-аналитическом центре Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург) с использованием методов пламенно-эмиссионной спектрометрии, пламенно атомно-абсорбционной, масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме. В каждой пробе определено по 23 компонента.

Для работы с большим массивом данных целесообразно применять безразмерные показатели. В качестве величин, относительно которых нормируются полученные данные, используются предельно-

допустимые значения для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) [9] и для почв (ПДК_п) [10]. Коэффициент опасности определялся как $K_o = C_i / C_{пдк}$, где C_i – концентрация i -го вещества; $C_{пдк}$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества. Для детального анализа были выбраны компоненты, которые имеют превышения по ПДК.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический, минеральный и химический состав шлама

По данным гранулометрического анализа ил из пруда-осветлителя Левихинского рудника представлен алеврито-глинистыми (пробы 1, 2, 4 и 5) и глинисто-алевритовыми (3 и 6) частицами, размер которых обычно не превышает 100 мкм. Мода распределения глинистых частиц для проб 1, 4 и 5 приходится на класс 6,30–8,00 мкм и для проб 2, 3 и 6 – на класс 12,50–16,00 мкм. В пробе 2 зафиксированы частицы песка размером менее 1,6 мм, содержание которых не превышает 0,02 %.

В пробах шлама преобладает минеральная фаза сульфатов (гипс и бассанит), массовая доля которых варьирует от 65 до 72 %. Содержание оксидов и гидроксидов железа (гётит) варьирует от 12 до 20 %. В меньшем количестве содержатся карбонаты (кальцит 3,5–8,4 %), глинистые минералы (преимущественно гидрослюда 3,9–10 %) и хлорсодержащие соли (карналлит 1,7–3,5 %). В пробах 2 и 6 зафиксирован пирит, содержание которого не превышает 1 %. В пробе 1 содержится кварц, массовая доля которого также не превышает 1 %. Во всех пробах преобладает три минерала – гипс, бассанит и гётит (рис. 2).

Анализ дифрактограмм проб ила предполагает наличие рентгеноаморфной фазы, о чем свидетельствует присутствие высокого фона кривой. Среди рентгеноаморфных минералов, согласно химическому составу проб ила, можно предположить присутствие гидроксидов железа.

В химическом составе шлама существенно преобладают оксиды железа, серы, кальция, что соответствует минеральному составу (табл. 5).

Таблица 5. Химический состав проб ила из пруда-осветлителя, мас. %

Table 5. Chemical composition of silt samples from the clarification pond, wt. %

Элемент Element	Мин Min	Макс Max	Среднее значение Median value
SiO ₂	0,91	1,26	1,11
TiO ₂	0,02	0,03	0,02
Al ₂ O ₃	3,68	5,27	4,26
Fe ₂ O ₃ общ.	23,5	35	29,8
MgO	0,78	2,97	1,80
CaO	16,4	24,5	22,7
MnO	0,4	0,93	0,59
Na ₂ O	0,34	0,61	0,4
K ₂ O	0,02	0,02	0,02
SO ₃	24,7	29,1	27,9
P ₂ O ₅	0,1	0,15	0,12
ППП	11	18,1	12,1

Примечание/Note: ППП – потери при прокаливании/loss on ignition.

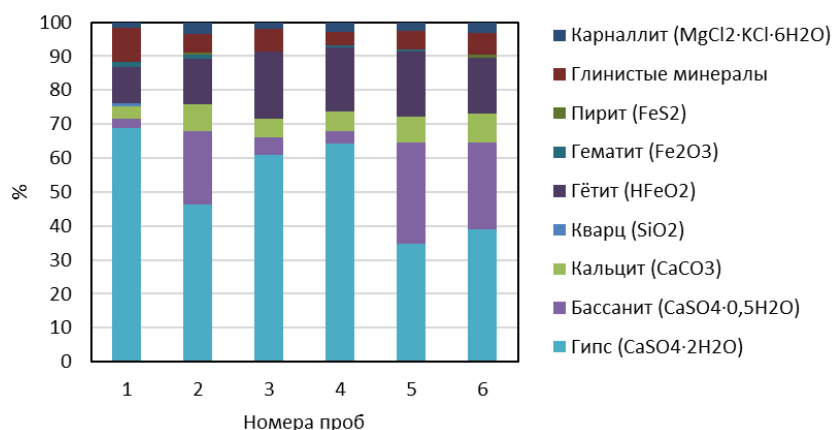


Рис. 2. Минеральный состав проб шлама, массовая доля, %

Fig 2. Mineral composition of sludge samples, mass fraction, %

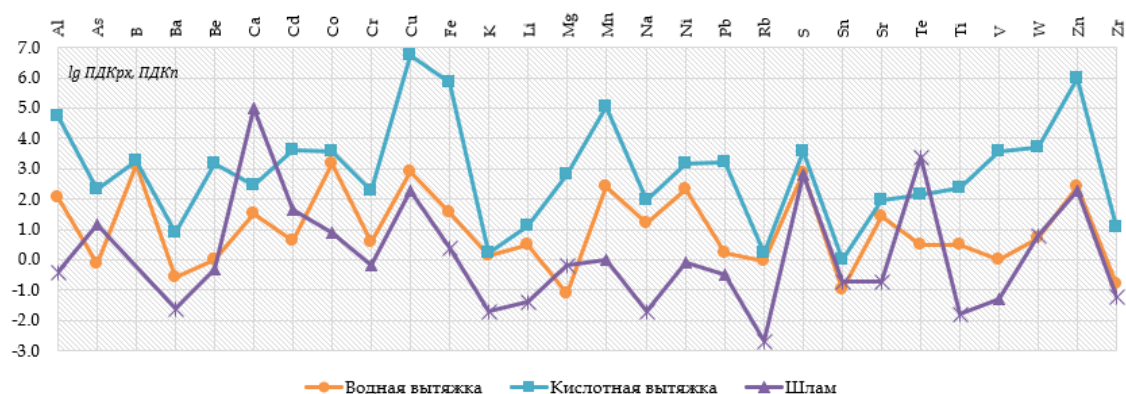


Рис. 3. Геохимический спектр элементов в шламe (lg ПДКп), водной и кислотной вытяжках (lg предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения ПДКрх); «*» – ПДКп для элементов не установлен, приведен lg для кларка концентраций в земной коре по А.П. Виноградову; В в шламe не определялся

Fig. 3. Geochemical spectrum of elements in sludge (log MACs), water and acid extracts (lg Maximum Allowable Concentration for fishery reservoirs (MACf)) «*» – maximum concentration limit for elements has not been established, lg is given for clarke concentrations in the earth's crust according to A.P. Vinogradov; B was not determined in sludge

Таблица 6. Содержание компонентов в шламe и значения коэффициентов опасности

Table 6. Content of components in the sludge and the hazard coefficient values

Элементы Element	Шлам, мкг/г Sludge, µg/g			Класс опасности Hazard class [11]	Коэффициент опасности Hazard coefficient		
	мин min	макс max	среднее значение median value		мин min	макс max	среднее значение median value
As	19	37	30	1	10	19	15
Cd	12	39	22	1	25	77	44
Co	29	56	38	2	6*	11*	8*
Cr	3,3	5,8	4,2	2	–	–	–
Cu	4422	7749	6260	2	134	235	190
Mn	955	2326	1547	3	–	1,5	–
Ni	12,2	30	16,1	2	–	1,5	–
Pb	8,4	12,8	11	1	–	–	–
Sb	0,4	0,6	0,4	2	–	–	–
V	5	12	8,5	3	–	–	–
Zn	8717	18558	10138	1	158	337	185

Примечание/Note: «*» – использовался ПДК для подвижной формы/mobile form of MAC is used; «–» – не превышает предельно допустимых концентраций в почве (ПДКп)/does not exceed Maximum Allowable Concentration in soil (MACs).

Химический состав шлама имеет значительные превышения значений коэффициента опасности по 5 элементам. В концентрациях выше ПДКп содержатся компоненты 1 (цинк, кадмий, мышьяк) и 2 (медь, кобальт) классов опасности (табл. 6, рис. 3).

Согласно действующим нормативам по расчету класса опасности отходов [12], шлам Левихинского рудника относится к 3 классу опасности (умеренно опасные).

Элементный состав водной и кислотной вытяжки

Для определения содержания легкорастворимых в воде компонентов были проанализированы водные и кислотные вытяжки из образцов шлама пруда-осветлителя Левихинского рудника.

В водной вытяжке ПДКрх превышены для 14 элементов – кобальт, бор, медь, сера, марганец, цинк, никель, алюминий, железо, кальций, стронций, натрий и кадмий; самые значительные для кобальта (1,4 тыс. раз) и бора (1,3 тыс. раз) (рис. 3). Из токсичных элементов особенно заметны повышенные концентрации по 6 элементам: кадмию, относящемуся ко 2 классу опасности, а также кобальту, меди, цинку, никелю и стронцию, относящимся к 3 классу опасности (табл. 7).

В пробах кислотной вытяжки установлены значительные превышения ПДК_{рх} по 24 элементам, самые существенные для меди ($5,4 \cdot 10^6$) и цинка (940,8 тыс.), для железа, марганца, алюминия, вольфрама, кадмия, серы, кобальта, ванадия, бора, свинца, никеля и бериллия (рис. 3). Из токсичных элементов особенно

заметны повышенные концентрации по 13 элементам – кадмий, свинец и бериллий, относящиеся ко 2 классу опасности, а также медь, цинк, вольфрам, кобальт, ванадий, никель, мышьяк, хром, теллур и стронций, относящиеся к 3 классу опасности (табл. 8).

Таблица 7. Содержание компонентов в водной вытяжке и значения коэффициента опасности

Table 7. Content of components in the water extract and the values of the hazard coefficient

Элементы Elements	Водная вытяжка, мкг/г Water extract, mg/g			Класс опасности Hazard class [11]	Коэффициент опасности Hazard coefficient		
	мин min	макс max	среднее значение median value		мин min	макс max	среднее значение median value
Al	3,3	80,1	4,4	4	84	2002	111
B	101	287	135	4	1013	2868	1354
Ca	5499	6455	6092	4	31	36	34
Cd	0,004	11,3	0,02	2	–	2258	4
Co	0,1	29	14,4	3	8	2866	1437
Cu	0,2	215	0,8	3	208	214 949	806
Fe	1,8	274,2	3,8	4	18	2742	38
Li	0,1	0,4	0,3	4	–	5	3
Mn	0,4	863	2,6	4	41	86 313	260
Na	911	3987	1874	4	8	33	16
Ni	0,1	4	2,1	3	13	405	209
S	6019	13064	7050	4	602	1306	705
Sr	7,5	11,6	10,7	3	19	29	27
Zn	0,8	5572,4	2,6	3	84	557 239	259

Примечание/Note: «–» – не превышает ПДК_{рх}/does not exceed MAC_f.

Таблица 8. Содержание компонентов в кислотной вытяжке и значения коэффициента опасности

Table 8. Content of components in the acid extract and the hazard coefficient values

Элементы Elements	Кислотная вытяжка, мкг/г Acid extract, mg/g			Класс опасности Hazard class [11]	Коэффициент опасности Hazard coefficient		
	мин min	макс max	среднее значение median value		мин min	макс max	среднее значение median value
Al	1 558	2 931	2 199	4	38 935	73 265	54 965
As	5	19	10	3	100	384	202
B	119	243	181	4	1 194	2 427	1 811
Ba	2,6	7,7	5,9	4	3	10	8
Be	0,3	0,7	0,4	2	1 029	2 221	1 418
Ca	45 383	52 152	51 025	4	252	290	283
Cd	11,4	39	20	2	2 275	7 768	4 035
Co	26,6	61,3	38,0	3	2 659	6 129	3 800
Cr	3,0	5,4	3,6	3	149	272	182
Cu	3 462	6 875	5 452	3	$3,46 \cdot 10^6$	$6,87 \cdot 10^6$	$5,45 \cdot 10^6$
Fe	49 549	106 712	68 335	4	495 487	$10,67 \cdot 10^6$	683 348
Li	0,5	1,1	1,0	4	6	14	13
Mg	17 702	27 457	26 129	4	443	686	653
Mn	808	2 062	1 120	4	80 789	206 187	111 970
Na	3 588	20 153	11 458	4	30	168	95
Ni	11,6	27,7	15,4	3	1 160	2 768	1 540
Pb	7,6	10,6	9,4	2	1 272	1 770	1 571
S	34 122	53 939	38 342	4	3 412	5 394	3 834
Sr	25	55	36	3	62	138	90
Te	0,3	0,7	0,4	3	84	236	137
Ti	11,7	15,3	14,2	4	195	255	237
V	2,7	6,0	3,8	3	2 737	6 007	3 781
W	2,6	7,1	4,0	3	3 220	8 899	5 020
Zn	7 515	18 855	9 409	3	751 513	$1,89 \cdot 10^6$	940 871

Химический состав шлама (вверху), водной (в середине) и кислотной (внизу) вытяжки представлен в виде обобщенной ассоциации, где справа от наименования элемента – кратность превышения ПДК_п (для шлама) ПДК_{рх} (для водной и кислотной вытяжки) назначения, слева – класс опасности элемента (приведены 1–3 класс опасности):

$$1[\text{Zn}(185)\text{Cd}(44)\text{As}(15)]\ 2[\text{Cu}(190)\text{Co}(8)]\ 2[\text{Cd}(4)]\ 3[\text{Co}(1437)\text{Cu}(806)\text{Zn}(259)\text{Ni}(209)\text{Sr}(27)]\ 2[\text{Cd}(4035)\text{Pb}(1571)\text{Be}(1418)] \times \\ \times 3 \left[\begin{array}{l} \text{Cu}(5 \cdot 10^6)\text{Zn}(9 \cdot 10^5)\text{W}(5020)\text{Co}(3800) \\ \text{V}(3781)\text{Ni}(1540)\text{As}(202)\text{Cr}(182)\text{Te}(137) \end{array} \right]$$

Предложения по очистке пруда-осветлителя

В результате накопления больших объемов донных отложений и высокой степени заполнения существующего пруда-осветлителя на Левихинском руднике вопрос утилизации шламов является актуальным. Направления использования шлама могут быть связаны с рекультивацией отвалов; закладкой выработанного пространства; производством цемента; извлечением ценных компонентов; складированием и обезвоживанием шлама в геотубах.

Использование шлама для рекультивации отвалов пустых пород и некондиционных руд

Лабораторные и полевые испытания, проводимые на руднике Дойон (золотодобывающая компания IAMGOLD), расположенном на северо-западе Квебека, Канада [13], показали, что покрытие отвалов смесью шлама, образованного от нейтрализации кислых шахтных вод, с грунтом препятствует образованию кислых подотвальных вод и снижает концентрацию растворенных металлов в них [14]. Для обеспечения эффективности барьера решающее значение имеет целостность покрытия. В качестве защитного слоя поверх смеси ила и грунта необходимо добавление песчано-гравийного и плодородного слоя.

Для перекрытия отвалов отработанного Шемурского карьера (Свердловская область) используется специальный изолирующий материал. Это многослойные бентонитовые маты, которые укрывают склоны, чтобы в грунт вместе с атмосферными осадками не проникала влага. Такая изоляция горной породы исключает распространение веществ, которые могли бы негативно влиять на экологию. На биологическом этапе рекультивации на бентонитовый мат будет нанесен плодородный слой [15].

На территории Левихинского рудника в основании отвала Южный в течение нескольких десятков лет разгружаются кислые ($\text{pH}=1,9$), высокоминерализованные (от 13 до 52 г/л) подотвальные воды сульфатного состава с высоким содержанием Fe, Al и расходом в паводок до 1 тыс. м³/сут. Необходимый объем материала (шлама) для рекультивации 30 га (при высоте георешетки, в которую будет укладываться шлам, 15 см) составляет 45 тыс. м³.

Таким образом, отвалы, образованные на Левихинском руднике, можно рекультивировать с помощью шлама и правильно подобранного грунта. Поскольку из шлама могут выщелачиваться элементы, относящиеся ко 2 (кадмий), к 3 (кобальт, медь, никель, стронций, цинк) и к 4 (алюминий, кальций, железо, калий, литий, марганец, натрий) классу опасности, необходимо использовать экранирующий слой (песчано-гравийный материал и плодородный слой). Использование шлама, помещенного в георешетки, грунта и экранирующего слоя позволит изолировать тело отвала от атмосферных осадков, что приведет к прекращению процесса формирования кислых подотвальных вод.

Использование шлама для рекультивации отработанных карьеров

В качестве успешного примера реализации такого подхода может служить Главный карьер Высокогорского горно-обогатительного комбината (ВГОК) в Свердловской области, в который поступают шламы фабрики мокрого обогащения, таким образом проводится техническая рекультивация нарушенных земель (рис. 4). После заполнения карьера будет проведена биологическая рекультивация [16].



Рис. 4. Чаша Главного карьера ВГОК (Фото: Юлия Григорьева)

Fig. 4. Bowl of the Main Quarry of VGOK (Photo: Yulia Grigoryeva)

В настоящее время на Шемурском медно-цинковом месторождении в чаше карьера размещают серный колчедан. Предварительно была выполнена гидроизоляция карьера. Трещины в бортах карьера были продуты и высушены компрессором. Пустоты были заполнены, на борта и дно карьера был нанесен слой торкрет-бетона и закреплен специальной базальтовой сеткой. На бортах карьера сформировался защитный слой толщиной 50 мм, который помогает предотвратить поступление воды через борта и дно карьера [15].

Объем отработанных карьеров «Левиха IX» и «Левиха X» 3753 тыс. м³. Использование шлама нейтрализации кислых шахтных вод для их закладки позволит полностью очистить пруд-осветлитель от образованного шлама объемом 2840 тыс. м³.

Использование шлама для производства строительных материалов

Исследования, которые проводились на ОАО «Гайский ГОК» и ЗАО «Бурибаевский ГОК», показали, что утилизация шлама может осуществляться несколькими путями: (1) использовать его в качестве минерального порошка в составе строительных, насыпных или асфальтобетонных смесей при строительстве дорог; (2) включать шлам в глинистую массу при производстве строительной керамики; (3) добавлять в состав сырьевой смеси для производства портландцементного клинкера [17].

Многие компоненты донных отложений аналогичны тем, которые используются в производстве цемента. Кальцит, гипс, кремнезем, алюминий, железо и магний являются обычным сырьем для цемента. Исследования показали, что шлам может заменить до 30 % портландцемента в цементной смеси [18]. Как и в большинстве вариантов повторного использования, осадок требует сушки, прежде чем его можно будет использовать [19].

Для обеспечения возможности использования шлама для производства цемента или строительных смесей необходимо выполнить большой объем земляных работ по извлечению шлама из пруда (с помощью земснаряда) с последующей сушкой на пресс-фильтре. Такие мероприятия требуют значительных финансовых затрат (по предварительным оценкам только работа земснаряда будет стоить 35 млн р.). В связи с этим утилизация шлама Левихинского рудника возможна только на основе государственно-частного партнерства, реализация которого позволит государству и частному сектору извлекать взаимную выгоду [20, 21]. Потенциальным потребителем шлама при производстве цемента может рассматриваться Невьянский цементный завод, расположенный в 35 км от п. Левиха (производительность завода составляет 85 т/час).

Использование шлама для извлечения ценных компонентов

В патенте RU 2 482 198 C1 предложен способ переработки шламов нейтрализации кислых шахтных вод с попутным извлечением цинка и меди [22]. Способ переработки шламов нейтрализации кислых шахтных вод включает его предварительное измель-

чение, после чего ведут сернокислотное выщелачивание при перемешивании путем обработки шлама кислыми шахтными водами и серной кислотой и добавление иминодиацетатного амфолита для одновременной сорбции меди и цинка. Из сернокислого раствора путем электролиза последовательно извлекают медь, а затем цинк.

В пруду-осветлителе Левихинского рудника донные отложения содержат медь (около 0,5 % сухой массы), цинк (1 %). Количество ценных компонентов в шламе пруда-осветлителя составляет около 1,1 тыс. т меди и 2,4 тыс. т цинка (расчет выполнен по данным анализа кислотной вытяжки, табл. 8). При таких содержаниях возможна промышленная переработка донных отложений. Ценность сырья в недрах [23] составляет более 728 млн р. и 550 млн р., соответственно (табл. 9). При этом содержание золота и серебра в кислотных вытяжках ниже предела обнаружения.

Таблица 9. Количество ценных компонентов в шламе пруда-осветлителя

Table 9. Number of valuable components in the clarification pond sludge

Элемент Element	Содержание элемента в сухом шламе, т Element content in dry sludge, t	Ценность сырья в недрах, млн р. Value of raw materials in the bowels, million rubles
Ag	<ПО	<ПО
Al	482	85,4
Au	<ПО	<ПО
Cu	1 162	728,3
Fe	15867	120,2
Pb	2	0,3
Zn	2424	550,0

Примечание/Note: <ПО – ниже предела обнаружения/below detection limit; для расчета использованы данные Лондонской биржи/data of the London Stock Exchange were used for the calculation.

Обезвоживание и складирование шлама

Технология геотекстильных контейнеров идеально подходит для расчистки шламохранилищ, для временного хранения обезвоженного осадка на объекте и, что особо примечательно, для захоронения отхода непосредственно на месте обезвоживания в виде высоконагружаемого полигона, устойчивого к разрушению [24].

В качестве примера может служить объект с дренажем кислотных пород возле горы Skytop, США (рис. 5) [25]. Кислотный дренаж собирается в отстойниках, затем перекачивается в осветлители и подается в установку Geotube. Сточные воды из технологического процесса выходят почти полностью прозрачными (по сравнению с грязно-коричневыми до очистки), а качество воды пригодно для отвода в местные водоемы без дополнительной очистки [26].

В дальнейшем с обезвоженным шламом можно поступить двумя способами:

- оставить на месте в геотекстильных контейнерах и рекультивировать аналогично отвалам;
- использовать при производстве строительных материалов.



Рис. 5. Общий вид сложенных геотубов (Geotube) [25]

Fig. 5. General view of folded geotubes (Geotube) [25]

Использование геотубов (Geotube) на Левихинском руднике позволит очистить пруд-осветлитель от образованного шлама, а также исключит пыление шлама при высыхании и будет способствовать формированию рекреационного ландшафта. Тем не менее у данного предложения есть ограничения: во-первых, высокая

стоимость; во-вторых, большие затраты времени на обезвоживание материала (1–3 месяца и более); в-третьих, значительное отчуждение земли (необходимая площадь 39 га, рис. 6); в-четвертых, необходимость утилизации геотубов после временного хранения обезвоженного осадка либо их рекультивация.

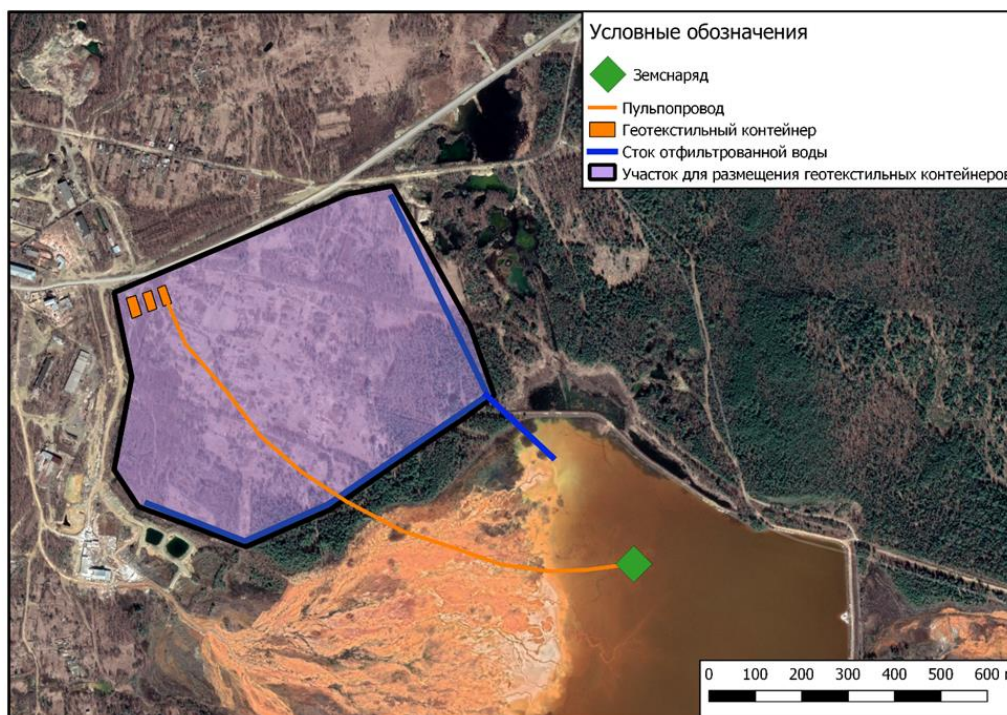


Рис. 6. Участок для размещения геотекстильных контейнеров возле пруда-осветлителя на Левихинском руднике

Fig. 6. Area for placement of geotextile containers near the clarification pond at the Levikhinsky mine

Характеристики основных рассмотренных выше направлений утилизации шлама из пруда-осветлителя Левихинского рудника, их преимуществ и недостат-

ков представлены в табл. 10. Методом балльно-рейтинговой оценки получено приоритетное направление использования донных отложений. Суть данно-

го метода заключается в следующем: определяется перечень преимуществ и ограничений; каждому фактору присваиваются соответствующие значения в баллах (от –5 до 5), к их сумме применяется весовой коэффициент – степень очистки пруда (%). Как показала балльно-рейтинговая оценка, наиболее рациональным является утилизация шлама в качестве производства строительных материалов на основе государственно-частного партнерства, реализация которо-

го позволит государству и частному сектору извлекать взаимную выгоду, при этом будет произведена 100 % очистка пруда. Наименее рациональным направлением будет извлечение ценных компонентов, основное ограничение – неполная утилизация шлама, образование отходов после извлечения ценных компонентов, необходимость подготовки и гидроизоляции площадки, а также строительство установок по извлечению.

Таблица 10. Основные направления утилизации шлама

Table 10. Main directions of sludge disposal

Приоритет (баллы) Priority (points)	Направление Direction	Объем (тыс. м ³)/ степень очистки пруда (%) Volume, (thous. m ³)/ degree of pond clean- ing (%)	Преимущества (балл) Advantages (point)	Ограничения применения (балл) Application restrictions (point)	Примеры реализации Implementation examples
I (3)	Производство строительных материалов Production of building materials	2840/100	Полная утилизация шлама, экономическая вы- года и частичная компенсация затрат Complete sludge dis- posal, economic bene- fit and partial cost re- covery 5	Необходимость организации частно-государственного парт- нерства Need to organize public-private partnership –2	ОАО «Гайский ГОК» и ЗАО «Бурибаев- ский ГОК» (Россия) Gaisky GOK OJSC and Buribaevsky GOK CJSC (Russia) [17]
II (2)	Складирование в геотубы Warehousing in geotubes	2840/100	Простота рекуль- тивации геотубов Ease of reclamation of geotubes 5	Необходимая площадь 39 га Required area 39 ha –3	Дренаж кислотных пород (США) Acid rock drainage (USA) [24] Патент RU 2 482 198 C1 Patent RU 2 482 198 C1 [19]
III (1)	Закладка выработанного пространства Worked-out space backfill	2840/100	Частичная рекуль- тивация Partial reclamation 2	Необходимость подготовки ре- культивационной смеси для снижения класса опасности Need to prepare a reclama- tion mixture to reduce the hazard class –1	Высокогорский гор- но-обогатительный комбинат (Россия) Vysokogorsky Mining and Processing Plant (Russia) [15]
IV (0,2)	Рекультивация отвалов Reclamation of dumps	45/10	Прекращение раз- грузки кислых подотвалных вод Termination of dis- charge of of acid wastewater 3	Необходимость подготовки ре- культивационной смеси для снижения класса опасности Need to prepare a reclama- tion mixture to reduce the hazard class –1	Рудник Дойон (Ка- нада) Doyon Mine (Canada) [13]
V (0,02)	Извлечение цен- ных компонентов (около 1,1 тыс. т меди и 2,4 тыс. т цинка) Extraction of valua- ble components (about 1,1 thousand tons of copper and 2,4 thousand tons of zinc)	7,7/2	Экономическая вы- года Economic benefit 5	Образование отходов после из- влечения ценных компонентов, подготовка и гидроизоляция площадки, строительство уста- новок по извлечению Waste generation after extraction of valuable components, prepara- tion and waterproofing of the site, construction of extraction facili- ties –4	Патент RU 2 482 198 C1 Patent RU 2 482 198 C1 [18]

Выводы

За 63 года работы (с 1959 по 2022 г.) пруд-осветлитель на Левихинском медноколчеданном месторождении заполнился на 95 % шламом от нейтрализованных кислых шахтных вод, в результате чего эффективность очистки воды снизилась и составляет 44–72 %. По сравнению с 2007 г. в 2020 г. превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения

увеличилась для железа в 14 раз и составляет 47 мг/л, для марганца, сульфат-иона в 2 раза и составляет 31 и 2462 мг/л, соответственно. В первую очередь это связано с тем, что оставшегося объема пруда-осветлителя недостаточно для отстаивания воды после нейтрализации.

Анализ вещественного состава шлама, образовавшегося в результате нейтрализации кислых шахтных

вод Левихинского медноколчеданного рудника, показал, что в нем преобладает минеральная фаза сульфатов (гипс и бассанит), оксидов и гидроксидов железа (гётит), карбонатов (кальцит), глинистых минералов (преимущественно гидрослюда) и хлорсодержащих солей (карналлит).

Элементный состав шлама в пруду-осветлителе имеет значительные превышения ПДК для почв по компонентам 1 (мышьяк, кадмий, цинк) и 2 (кобальт, медь) классов опасности.

Среди микрокомпонентов в пробах кислотной вытяжки значительные превышения ПДК_{рх} имеются по 24 элементам: самые существенные для меди ($5,4 \cdot 10^6$) и цинка (940,8 тыс.). Из токсичных элементов особенно заметны повышенные концентрации по 13 элементам, относящимся ко 2 и 3 классу опасности.

В водной вытяжке, в отличие от кислотной, компонентов, которые превышают ПДК_{рх}, значительно меньше – 14 элементов: существенные по кобальту (1,4 тыс. раз) и бору (1,3 тыс. раз). Из токсичных элементов особенно заметны повышенные концентрации по 6 элементам, относящимся ко 2 и 3 классу опасности.

В пределах горного отвода Левихинского рудника находится несколько отработанных карьеров (общей площадью 4 га, объем $1,45 \text{ млн м}^3$) и отвалов некондиционных руд (общей площадью 30 га, объемом $1,7 \text{ млн м}^3$), для рекультивации которых потенциально могут быть использованы шламы пруда-осветлителя.

Для повышения эффективности очистки кислых шахтных вод необходимо очистить действующий пруд-осветлитель от образованного шлама.

Были рассмотрены следующие варианты: рекультивация отвалов пустых пород и некондиционных руд, складирование в отработанных карьерах, производство строительных материалов, извлечение ценных компонентов и складирование после обезвоживания шлама в геотубах (Geotube).

Рекультивация отвала позволит изолировать тело отвала от поступления атмосферных осадков, что приведет к сокращению расхода кислых подотвальных вод, но позволит увеличить емкость пруда-осветлителя только на 10 %. Поскольку из донных отложений возможно выщелачивание элементов 2–4 классов опасности, необходимо использовать экранящий слой.

Использование шлама для закладки отработанных карьеров является привлекательным в связи с тем, что весь объем шлама из пруда-осветлителя можно разместить в карьерах, расположенных на территории Левихинского рудника. Утилизация шлама позволит устранить загрязнение поверхностных вод и улучшить экологическое состояние местности, но требуется подготовка рекультивационной смеси для снижения класса опасности шлама.

Использование шлама для производства строительных материалов является наиболее предпочтительным как с экономической, так и экологической позиции. Для реализации этого варианта необходима организация государственно-частного партнерства.

Извлечение ценных компонентов из шлама пруда-осветлителя является наименее привлекательным направлением, это связано как с экономическими затратами на строительство установок по извлечению, подготовку гидроизоляции площадки, так и с образованием попутного отхода.

Складирование шлама в геотубах (Geotube Dewatering) после обезвоживания позволит полностью очистить пруд-осветлитель от донных отложений и будет способствовать формированию рекреационного ландшафта. Основные ограничения связаны с высокой стоимостью контейнеров и необходимостью значительного отчуждения земли.

По совокупности показателей наиболее предпочтительным для очистки действующего пруда-осветлителя Левихинского рудника и решения экологических проблем представляется использование шлама в качестве производства строительных материалов. В этом случае утилизация донных отложений позволит не только продлить эксплуатацию пруда-осветлителя, повысить эффективность очистки кислых шахтных вод, значительно снизить негативное воздействие на гидросферу, но и получить выгоду при ликвидации накопленного вреда окружающей среде.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022–2024 гг.) «Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании» (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1 и за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20140, <https://rscf.ru/project/22-27-20140/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Тютков О.В. Оценка влияния затопленных медноколчеданных рудников на водные объекты Среднего Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 6. – С. 77–91.
2. Yadav H.L., Jamal A. Treatment of acid mine drainage: a general review // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. – 2016. – V. 3. – Iss. 11. – P. 116–122.
3. Gammons C.H., Icopini G.A. Improvements to the water quality of the acidic Berkeley Pit Lake due to copper recovery and sludge disposal // Mine Water and the Environment. – 2020. – V. 39. – P. 427–439.
4. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Снижение негативного влияния законсервированного медноколчеданного рудника Урала на состояние гидросферы // Физико-

- технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 3. – С. 194–201.
5. Паспорт гидротехнического сооружения закрытого Левихинского рудника. – Екатеринбург: ООО «ЭКОЛОГИЯ», ОАО «УНИПРОМЕДЬ», 2006. – 68 с.
6. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил // Проблемы недропользования. – 2019. – Т. 3 (22). – С. 155–161.
7. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // Геохимия. – 2019. – Т. 64. – № 3. – С. 282–299.
8. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Состав техногенных отходов отработанного Левихинского медноколчеданного рудника // Фундаментальные исследования и прикладные разработки

- процессов переработки и утилизации техногенных образований: Труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021». – Екатеринбург, 2021. – С. 79–81.
9. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. – М.: Изд-во ВНИРО, 2011. – 257 с. (Утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 с изменениями на 10 марта 2020 года).
10. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: введен в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2.
11. ГОСТ Р 70281-2022. Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения (приказ Росстандарта от 05.10.2022 N 1074-ст). – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 5 с.
12. Критерии отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду утверждены приказом Минприроды России от 4 декабря 2014 года N 536.
13. Preliminary geotechnical assessment of the potential use of mixtures of soil and acid mine drainage neutralization sludge as materials for the moisture retention layer of covers with capillary barrier effects / M. Mbonimpa, M. Bouda, I. Demers, M. Benzaazoua, D. Bois, M. Gagnon // Canadian Geotechnical Journal. – 2016. – V. 53. – № 5. – P. 828–838.
14. Use of acid mine drainage treatment sludge by combination with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation: Laboratory column tests and intermediate scale field tests / I. Demers, M. Mbonimpa, M. Benzaazoua, M. Bouda, S. Awoh, S. Lortie, M. Gagnon // Minerals Engineering. – 2017. – № 107. – P. 43–52.
15. На Ново-Шемурском месторождении ввели новый способ очистки сточных вод // Свердловское областное телевидение. 2019. URL: <https://www.obltv.ru/news/society/na-novo-shemurskom-mestorozhdenii-vveli-novyy-sposob-ochistki-stochnykh-vod/> (дата обращения 01.02.2023).
16. Соколова Г. Три века горы Высокой // «Областная газета» (Екатеринбург, Свердловская область). 2021. URL: <https://www.oblgazeta.ru/economics/industry/124846/> (дата обращения 08.11.2022).
17. Reutilization of neutralization sludge formed during the processing of mining enterprises acidic industrial waters / N. Medyanik, I. Shadrinova, I. Varlamova, T. Chekushina, N. Churlyayeva // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 10. – P. 61–68.
18. Hwa T., Yeow S., Yunn H. Non-conventional building & construction materials from sludge. URL: <http://www.ntu.edu.sg/Centre/www.eerc/hsy.pdf> (дата обращения 08.11.2022).
19. Zinck J. Review of disposal, reprocessing and reuse options for acidic drainage treatment sludge // MEND Report 3.42.3. – Canada: Natural resources Canada, 2005. – 68 p.
20. Федеральный закон «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 13.07.2015 N 224-ФЗ.
21. Пахальчак Г.Ю. Совершенствование экономических механизмов ликвидации ранее накопленного экологического ущерба // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: труды V Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2017. – С. 151–158.
22. Способ переработки шламов нейтрализации кислых шахтных вод: пат. Рос. Федерации, № 2 482 198 C1, заявл. 17.01.2012; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14. – 16 с.
23. Душин А.В. Теоретико-методологические основы государственного регулирования воспроизводства минерально-сырьевой базы: автореферат дис. д-ра геол.-минерал. наук. – Екатеринбург, 2014. – 46 с.
24. Аджиенко В.Е. Технология и контейнеры GEOTUBE® – новый процесс обезвоживания с известными преимуществами // «Техника и технологии ЖКХ» приложение к журналу «ЖКХ: журнал для руководителя и главного бухгалтера». – 2009. – № 1. – 1 с.
25. Geotube dewatering technology used to alleviate acid runoff problem from mine tailings – case study. – 2007. URL: <https://www.environmental-expert.com/articles/geotube-dewatering-technology-used-to-alleviate-acid-runoff-problem-from-mine-tailings-case-study-392451> (дата обращения 19.09.2022).
26. TenCate Geotube. URL: <https://www.tencategeo.eu/en/products/tencate-geotube/Dewatering-Geotube> (дата обращения 19.09.2022).

Поступила: 17.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 28.03.2023 г.

Информация об авторах

Рыбникова Л.С., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела УрО РАН.

Рыбников П.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН.

Наволокина В.Ю., научный сотрудник лаборатории геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН.

UDC 504.06

REHABILITATION OF MAN-MADE FORMATION OF ABANDONED COPPER PYRITE DEPOSITS ON THE EXAMPLE OF LEVIKHINSKY MINE (MIDDLE URALS)

Liudmila S. Rybnikova¹,
luserib@mail.ru

Petr A. Rybnikov¹,
ribnikoff@yandex.ru

Vera Yu. Navolokina¹,
vunavolokina@gmail.com

¹ Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russia.

The relevance of the research is related to the need to rehabilitate the abandoned copper pyrite deposits affected by acid mine waters and justify measures to clean up the existing clarification pond.

The main aim is to study the sludge composition and justify the measures to reduce the environmental load on the hydrosphere.

Objects: clarification pond and neutralization sludge of the Levikhinsky copper pyrite acid mine waters.

Methods. Laboratory studies of water and bottom sediments were carried out using atomic emission and mass spectral analysis; methods of flame emission spectrometry, flame atomic absorption, photometric method with Nessler's reagent, titrimetric, mercurimetric and potentiometric methods; mass spectrometry with ionization in inductively coupled plasma and gravimetric method.

Results. Sludge samples are dominated by sulfates (gypsum and bassanite), iron oxides and hydroxides (goethite), carbonates (calcite), clay minerals (mainly hydromica) and chlorine-containing salts (carnallite). The chemical composition of the sludge is dominated by oxides of iron, sulfur and calcium. The analysis of water and acid extracts showed that up to 24 elements belonging to hazard classes 2, 3 and 4 can be leached from the sludge in concentrations exceeding the maximum allowable values for fishery water bodies. Several options for the use of sludge from the clarification pond were analyzed: reclamation of waste rock dumps and substandard ores; backfilling of mined-out area of quarries; production of building materials; extraction of components; storage of sludge in geotubes (Geotube). The most rational is the disposal of sludge as the production of building materials on the basis of a public-private partnership, the implementation of which will allow the state and the private sector to derive mutual benefit.

Key words:

Hydrosphere, copper pyrite deposit, pollutants, acid mine waters, sludge, clarification pond.

The work was supported by the state task no. 075-00412-22 PR of the Institute of Mining Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Topic 2 (2022-2024) «Development of geoinformation technologies for assessing the protection of mining areas and predicting the development of negative processes in subsoil use» (FUWE-2022-0002) No. 1021062010532-7-1.5.1 and at the expense of the RSF grant no. 22-27-20140, <https://rscf.ru/project/22-27-20140/>.

REFERENCES

- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Tyutkov O.V. Otsenka vliyaniya zatoplennykh mednokolchედannyykh rudnikov na vodnye obekty Srednego Urala [Assessing the impact of flooded copper pyrite mines on water bodies in the Middle Urals]. *Water management of Russia: problems, technologies, management*, 2014, vol. 6, pp. 77–91.
- Yadav H.L., Jamal A. Treatment of acid mine drainage: a general review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2016, vol. 3, Iss. 11, pp. 116–122.
- Gammons C.H., Icopini G.A. Improvements to the water quality of the acidic Berkeley Pit Lake due to copper recovery and sludge disposal. *Mine Water and the Environment*, 2020, vol. 39, pp. 427–439.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Y. Reducing negative impacts of Dormant pyrite copper ore mine on the geosphere in the Urals. *Journal of Mining Science*, 2022, 58 (3), pp. 519–525.
- Pasport gidrotekhnicheskogo sooruzheniya zakrytogo Levikhinskogo rudnika [Passport of the hydraulic structure of the closed Levikhinsky mine]. Yekaterinburg, LLC «ECOLOGY». OAO UNIPROMED, 2006. 68 p.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Y. Otsenka vliyaniya zatoplennogo Levikhinskogo mednokolchედannogo rudnika na kachestvo poverkhnostnykh vod reki Tagil [Assessment of the impact of the flooded Levikhinsky copper pyrite mine on the quality of surface waters of the Tagil River]. *Problems of Subsoil Use*, 2019, vol. 3 (22), pp. 155–161.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Regularities in the evolution of groundwater quality at abandoned copper sulfide mines at the Levikha Ore Field, Central Urals, Russia. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 3, pp. 298–313.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Sostav tekhnogennykh otkhodov otrabotannogo Levikhinskogo mednokolchედannogo rudnika [Composition of technogenic waste from the depleted Levikha copper pyrite mine]. *Fundamentalnye issledovaniya i prikladnye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy. Trudy V Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferentsii molodykh uchenykh «TEHNOGEN_2021»* [Fundamental research and applied development of the processes of processing and utilization of technogenic formations. Proceedings of the V Congress with international participation and the Conference of young scientists «TEHNOGEN-2021»]. Ekaterinburg, 2021. pp. 79–81.
- Normativy kachestva vody vodnykh obektov rybokhozyaystvennogo znacheniya v tom chisle normativy predelno dopustimyykh kontsentratsiy vrednykh veschestv v vodakh vodnykh obektov rybokhozyaystvennogo znacheniya. Utverzhdeny prikazom Ministerstva selskogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13 dekabrya 2016 goda № 552 s izmeneniyami na 10 marta 2020 goda [Water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance. Approved by the order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 no. 552, as amended on March 10, 2020]. Moscow, VNIRO Pub. House, 2011. 257 p.

10. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti I (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Put into effect by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021, No. 2.
11. GOST R 70281-2022. *Okhrana okruzhayushchey sredy. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya* [SS 70281-2022. Environmental protection. Soils. Classification of chemicals for pollution control]. Moscow, Russian Institute for Standardization Publ., 2022. 5 p.
12. *Kriterii otneseniya otkhodov k I–V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu* [The criteria for assigning waste to hazard classes I–V in terms of the degree of negative impact on the environment were approved]. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 4, 2014 N 536.
13. Mbonimpa M., Bouda M., Demers I., Benzaazoua M., Bois D., Gagnon M. Preliminary geotechnical assessment of the potential use of mixtures of soil and acid mine drainage neutralization sludge as materials for the moisture retention layer of covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, vol. 53, no. 5, pp. 828–838.
14. Demers I., Mbonimpa M., Benzaazoua M., Bouda M., Awoh S., Lortie S., Gagnon M. Use of acid mine drainage treatment sludge by combination with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation: laboratory column tests and intermediate scale field tests. *Minerals Engineering*, 2017, no. 107, pp. 43–52.
15. *Na Novo-Shemurskom mestorozhdenii vveli novy sposob ochestki stochnykh vod* [A new method of wastewater treatment was introduced at the Novo-Shemurskoye field]. Available at: <https://www.obltv.ru/news/society/na-novo-shemurskom-mestorozhdenii-vveli-novy-sposob-ochistki-stochnykh-vod/> (accessed 2 January 2023).
16. *Tri veka gory Vysokoy* [Three centuries of High Mountain]. Available at: <https://www.oblgazeta.ru/economics/industry/124846/> (accessed 8 November 2022).
17. Medyanik N., Shadrinova I., Varlamova I., Chekushina T., Churlyayeva N. Reutilization of neutralization sludge formed during the processing of mining enterprises acidic industrial waters. *Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 10, pp. 61–68. In Rus.
18. Hwa T., Yeow S., Yunn H. *Non-conventional building & construction materials from sludge*. Available at: <http://www.ntu.edu.sg/Centre/www/wwerc/hsy.pdf> (accessed 8 November 2022).
19. Zinck J. Review of disposal, reprocessing and reuse options for acidic drainage treatment sludge. *MEND Report 3.42.3*. Canada, Natural resources, 2005. 68 p.
20. Federalny zakon № 224 ot 13.07.2015. *O gosudarstvenno-chastnom partnerstve, munitsipalno chastnom partnerstve v Rossiyskoy Federatsii i vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii* [Federal Law N 224 dated July 13, 2015. On Public-Private Partnership, Municipal-Private Partnership in the Russian Federation and Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation]. 2015.
21. Pakhalchak G.Yu. Sovershenstvovanie ekonomicheskikh mekhanizmov likvidatsii ranee nakoplennoy ekologicheskoy ushcherba [Improving the economic mechanisms for eliminating previously accumulated environmental damage]. *Ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost gornopromyshlennykh regionov. Trudy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecological and technospheric safety of mining regions. Proc. of the V International Scientific and Practical Conference]. Ekaterinburg, 2017. pp. 151–158.
22. Cherny M.L., Mashkin A.E., Pastukhov A.M., Kirillov E.V. *Sposob pererabotki shlamov neutralizatsii kislykh shahitnykh vod* [Processing method for neutralizing acid mine water sludge]. Patent RF, no. 2 482 198 C1, 2013.
23. Dushin A.V. *Teoretiko-metodologicheskie osnovy gosudarstvennogo regulirovaniya vosproizvodstva mineralno-sirevoy bazy*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Theoretical and methodological foundations of state regulation of the reproduction of the mineral resource base. Dr. Diss. abstract]. Yekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin Publ., 2014. 46 p.
24. Adzhienko V.E. *Tekhnologiya i konteynery GEOTUBE – novy protsess obezvozhivaniya s izvestnymi preimushchestvami* [Technology and containers GEOTUBE – new dehydration process with well-known advantages]. *Technique and technologies of housing and communal services supplement to the journal Housing and communal services: a magazine for the head and chief accountant*, 2009, no. 1, 1 p.
25. *Geotube dewatering technology used to alleviate acid runoff problem from mine tailings – case study. 2007*. Available at: <https://www.environmental-expert.com/articles/geotube-dewatering-technology-used-to-alleviate-acid-runoff-problem-from-mine-tailings-case-study-392451> (accessed 19 September 2022).
26. *TenCate Geotube*. Available at: <https://www.tencategeo.eu/en/products/tencate-geotube/Dewatering-Geotube> (accessed 19 September 2022).

Received: 17 February 2023.

Reviewed: 28 March 2023.

Information about the authors

Liudmila S. Rybnikova, Dr. Sc., chief researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Petr A. Rybnikov, Cand. Sc., head of the laboratory of geoinformation and digital technologies in subsoil use, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Vera Y. Navolokina, researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 622.248.5:004.85

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С УЧИТЕЛЕМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИТОКОВ ПЛАСТОВОГО ФЛЮИДА ПРИ БУРЕНИИ С УПРАВЛЯЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Щербаков Роман Эдуардович^{1,2},
res718@bk.ru

Ковалев Артем Владимирович¹,
Kovalevav@tpu.ru

Ильин Андрей Валерьевич³,
Allin@fr-intl.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² «Nedra Digital»,
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, ул. Уральская, 4.

³ Frontier International LLC,
USA, TX 77040, Houston, Suite 708, 7600 W Tidwell.

Актуальность. С каждым годом истощение легкодоступных запасов углеводородов определяет необходимость разработки месторождений, характеризующихся сложными горно-геологическими условиями. Бурение с управляемым давлением ознаменовало эпоху высокоточного контроля давления в скважине в процессе бурения. Данная технология обеспечила доступ к залежам, которые ранее считались практически «непригодными для использования». Основная задача применения технологии бурения с управляемым давлением заключается в контроле забойного давления в заданных пределах с целью предотвращения потери жидкости, разрыва пласта, а также нежелательного притока пластовых флюидов в ствол скважины. Однако если в течение некоторого периода времени наблюдается приток пластовой жидкости из открытого ствола скважины или присутствуют потери бурового раствора, то осуществлять контроль забойного давления в заданных пределах не представляется возможным. В данном случае требуется использование дополнительного метода или алгоритма, отмечающего такие периоды и сигнализирующего оператору или контролирующей системе о наличии притока или поглощения бурового раствора. Описанная ранее проблематика предопределила задачу настоящей работы. Утверждается, что интеллектуальная система может автоматически отслеживать и анализировать тенденции параметров, обнаруживать аномалии в изменении параметров бурения в реальном времени, заблаговременно прогнозировать вероятность возникновения притока пластового флюида и предупреждать инженера по бурению на ранней стадии, что позволит реализовать превентивные мероприятия с целью поддержания требуемого профиля забойного давления.

Цель: разработка алгоритма, позволяющего прогнозировать вероятность возникновения притока пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением на основании данных геолого-технологических исследований.

Методы: оценка и анализ современных достижений в задаче определения притока пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением во временных рядах данных геолого-технологических исследований при помощи алгоритмов машинного обучения.

Результаты. Авторами проведен обзор и анализ текущих подходов к определению притока пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением при помощи алгоритмов машинного обучения. Проведены исследования по оценке эффективности классических алгоритмов машинного обучения в задаче выявления притока пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением. Представлены результаты работы модели градиентного бустинга на тестовых скважинах. Определены перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова:

Прогнозирование притока пластового флюида, машинное обучение, многомерные временные ряды, распознавание аномалий, бурение с управляемым давлением.

Введение

Современные системы MPD не только могут работать в сложных геолого-технических условиях, но и, что более важно, обеспечивают динамическое управление скважинным давлением в режиме реального времени.

Одной из основных причин успеха данной технологии является автоматизация процесса бурения скважин. Развитие технологии бурения с управляемым давлением не только способствовало внедрению инновационных решений по управлению давлением в скважине, но и стимулировало разработку автоматизированных систем, контролирующих процессы в ре-

жиме реального времени, предвещающая эпоху высокоточного контроля давления в скважине. Автоматизация позволила обеспечить такие уровни функционального контроля, которые трудно обеспечивать оператору. Присущая MPD система замкнутого цикла циркуляции бурового раствора в сочетании с традиционными методами сооружения скважин естественным образом подходит для автоматизированного использования.

Основная задача применения технологии бурения с управляемым давлением заключается в контроле забойного давления (ВНР) в заданных пределах с целью

предотвращения потери жидкости, разрыва пласта, а также нежелательного притока пластовых флюидов в ствол скважины. Наличие притока пластового флюида не позволяет осуществлять контроль забойного давления с требуемой точностью, поэтому необходимо использовать дополнительный метод или алгоритм, отмечающий такие периоды и сигнализирующий оператору или контролирующей системе о наличии притока или поглощения.

Обзор литературы

В отечественной литературе подробно описаны причины возникновения газонефтеводопроявлений (ГНВП) и их первичные признаки [1], а также мероприятия по недопущению возникновения подобных осложнений в условиях традиционного бурения на репрессии [2, 3].

Помимо теоретической базы в работах [4–6] отражены результаты применения современных методов машинного обучения для выявления различных осложнений и аварий в процессе бурения, в том числе ГНВП. В работах отражена статистика по метрикам качества выявления описанных инцидентов, что немаловажно, результаты получены на основании данных с реально пробуренных скважин, что позволяет с большей уверенностью полагаться на них. Однако стоит заметить, что описанные в данных работах подходы применялись в условиях традиционного бурения на репрессии, поэтому в случае бурения с управляемым давлением эффективность представленных методов необходимо оценить.

В отечественной практике бурения метод управления забойным давлением уже нашел свое применение при строительстве скважин в карбонатных и трещиноватых пластах [6–10]. Однако в научной литературе еще пока не поднимался вопрос предотвращения притока пластового флюида при бурении с управляемым давлением. Достаточно широко эта тема освещена в зарубежной научной литературе.

В следующей работе описаны основные методы выявления притока пластового флюида как на устье, так и на забое скважины при бурении с управляемым давлением, а также приведено краткое описание промышленных систем, поставляемых Weatherford, Schlumberger и другими нефтесервисными компаниями [11]. Кроме того, в работе отражены результаты лабораторного эксперимента по имитации притока пластового флюида и его определению различными датчиками. Практическая значимость работы заключается в описании поведения показаний датчиков в момент притока и в процессе его вымыва по затрубному пространству. Однако в данном эксперименте не имитировалось разрушение горной породы на забое скважины, поэтому лабораторный стенд может только отчасти воспроизвести процесс бурения и его физические и гидродинамические процессы.

В работах [12–15] приведено описание методов определения притока пластового флюида, поглощения бурового раствора, закупорки долота и промыва буровой колонны посредством контроля изменения давления на стояке и устьевого затрубного противо-

давления при бурении с управляемым давлением. В работе отражены практические методы по выявлению данных случаев оператором на месторождении. Кроме того, приведен анализ скорости и точности выявления случаев в процессе бурения при помощи дополнительных датчиков.

В работе [16] приведено описание метода выявления притока посредством сравнения фактического и расчетного расхода раствора на выходе, вычисляемого упрощенной гидравлической моделью. Кроме того, приведено детальное описание поведения основных параметров бурения в процессе возникновения притока, поглощения, свабирования и поршневания. В работе [17] приведено описание метода выявления притока посредством сравнения фактического и расчетного объема емкостей, вычисляемого упрощенной гидравлической моделью. Однако в данных работах не отражена статистика по метрикам качества выявления описанных случаев.

В работе [18] приведено описание методов выявления притока посредством разработанной модели, использующей закон сохранения массы. Также дополнительно приведено описание алгоритма автоматической калибровки вычислений алгоритма. В работе [19] описаны основные методы выявления притока пластового флюида при помощи алгоритмов машинного обучения, а также их краткое описание. Также в работе приведены результаты определения притока при помощи LSTM модели машинного обучения на искусственно сгенерированных данных. В вышеобозначенных работах результаты получены на синтетических данных и не подкреплены результатами с фактически пробуренных скважин.

В работах [19–22] приведены методы предобработки, параметры и архитектура LSTM модели машинного обучения, а также результаты применения алгоритмов на реальных данных со скважин. В статье [23] предложена совокупность алгоритмов для обнаружения подобных событий, в данном подходе для обнаружения обозначенных ранее событий используется глубокая нейронная сеть совместно с «elliptic envelope» алгоритмом.

В статье [24] приведено описание алгоритма определения притока на забое скважины при помощи забойной телеметрии и анализа свойств бурового раствора. В работе не отражена статистика по метрикам качества выявления описанных случаев. Кроме того, в работе не отражены метрики качества, подтверждающие применимость данного метода.

В работе [25] приведен алгоритм определения притока при помощи математической модели, однако данный метод использует ряд допущений и является вычислительно сложным. В работах [26–29] приведены результаты применения классических алгоритмов машинного обучения для выявления притоков в процессе бурения и спуско-подъемных операций.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что в отечественной научной литературе тема прогнозирования и автоматического определения притока пластового флюида при бурении с управляемым давлением не рассмотрена. Есть ряд работ по автоматическому выявлению ГНВП при бурении на репрессии, однако требуется оценить эффективность

данных методов применительно к условиям бурения с управляемым давлением.

В зарубежной научной литературе рассматриваемая тема отражена в большем количестве работ, однако существенный их недостаток – проверка эффективности предлагаемых методов на синтетических данных, что не позволяет уверенно заявлять о достоверности полученных результатов. Кроме того, не проведен комплексный анализ эффективности использования различных методов машинного обучения в рамках решаемой задачи, зачастую используются вычислительно сложные методы без должного обоснования причины их использования.

Описание исходных данных

Основным фактором безаварийного процесса строительства скважин является непрерывный контроль тенденции изменения параметров бурения с целью раннего обнаружения аномалий в их поведении. В анализе тенденций важно не столько абсолютное значение какого-либо из параметров, сколько направление изменения одного из этих параметров по отношению к другим.

При бурении с управляемым давлением ключевыми параметрами являются:

- расход промывочной жидкости на входе (mud flowrate input – MFI);
- расход промывочной жидкости на выходе (mud flowrate output – MFO);
- давление на стояке (standpipe pressure – SPP);
- устьевое противодавление на вращающемся превенторе (surface back pressure – SBP);
- плотность промывочной жидкости на выходе (DENSITY_OUT);
- газосодержание промывочной жидкости (TOTAL_GAS).

Понимание ожидаемой тенденции изменения этих параметров имеет большое значение для раннего обнаружения и, следовательно, для снижения последствий притока пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением.

Приток пластового флюида может быть обусловлен:

- снижением гидростатического давления, обеспечиваемого плотностью промывочной жидкости;
- снижением гидродинамического давления ввиду изменения свойств промывочной жидкости и геометрии ствола;
- снижением устьевого противодавления.

Приток пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением, регистрируемый на забое, характеризуется повышением расхода промывочной жидкости на выходе, при этом необходимым условием является постоянство расхода промывочной жидкости на входе, неподвижность буровой колонны и отсутствие изменения положения управляющего устьевого дросселя. В противном случае повышение расхода промывочной жидкости на выходе может быть обусловлено изменением режима течения жидкости в затрубном пространстве, вызванным воздействием с устья скважины.

Приток пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением, достигший устья скважины, характеризуется повышением расхода промывочной жидкости на выходе и одновременным снижением плотности промывочной жидкости, также возможно повышение газосодержания в зависимости от типа поступившего из пласта флюида. Кроме того, выход притока на устье может сопровождаться резким изменением давления на стояке и устьевого противодавления на вращающемся превенторе.

Непрерывный автоматический анализ изменения ключевых параметров бурения позволяет заблаговременно распознать описанные ранее паттерны, что дает возможность реализовать превентивные мероприятия с целью предотвращения отклонения от забойного профиля давления и сокращения негативного воздействия на продуктивный пласт.

Необходимым условием обеспечения автоматического анализа входных данных параметров бурения является соответствие потока данных следующим критериям [30]:

- полнота (степень, в которой каждая точка данных датчика содержит ожидаемые показания);
- чувствительность (степень, в которой значения показаний датчика соответствуют определенным пороговым значениям качества);
- однородность (степень, в которой потоковый объем точек данных датчиков согласован с течением времени);
- структура (степень, в которой точки потоковых данных соответствуют согласованной структуре).

В соответствии с приведенными критериями, в данном исследовании использовались следующие параметры бурения:

- Входные данные: параметры, непосредственно контролируемые бурильщиком на поверхности при проводке скважины:
 - расход бурового раствора на входе (л/с);
 - частота вращения буровой колонны (об/мин);
 - высота талевого блока (м);
 - положение управляющего дросселя (%).
- Выходные данные – измерения, которые показывают реакцию скважины на входные параметры бурения:
 - давление на стояке (атм);
 - устьевое противодавление (атм);
 - расход бурового раствора на выходе (л/с);
 - плотность промывочной жидкости на выходе (кг/м³);
 - момент при вращении на поверхности (Н*м);
 - нагрузка на крюке (т);
 - вес на долоте (т);
 - глубина долота, глубина скважины (м).

На рис. 1 приведен пример исходных данных, представленных временными рядами параметров бурения со скважины, на которой произошел приток пластового флюида, зарегистрированный на устье. На рисунке отмечено несколько зон, в которых отмечался выход пластового флюида на устье.

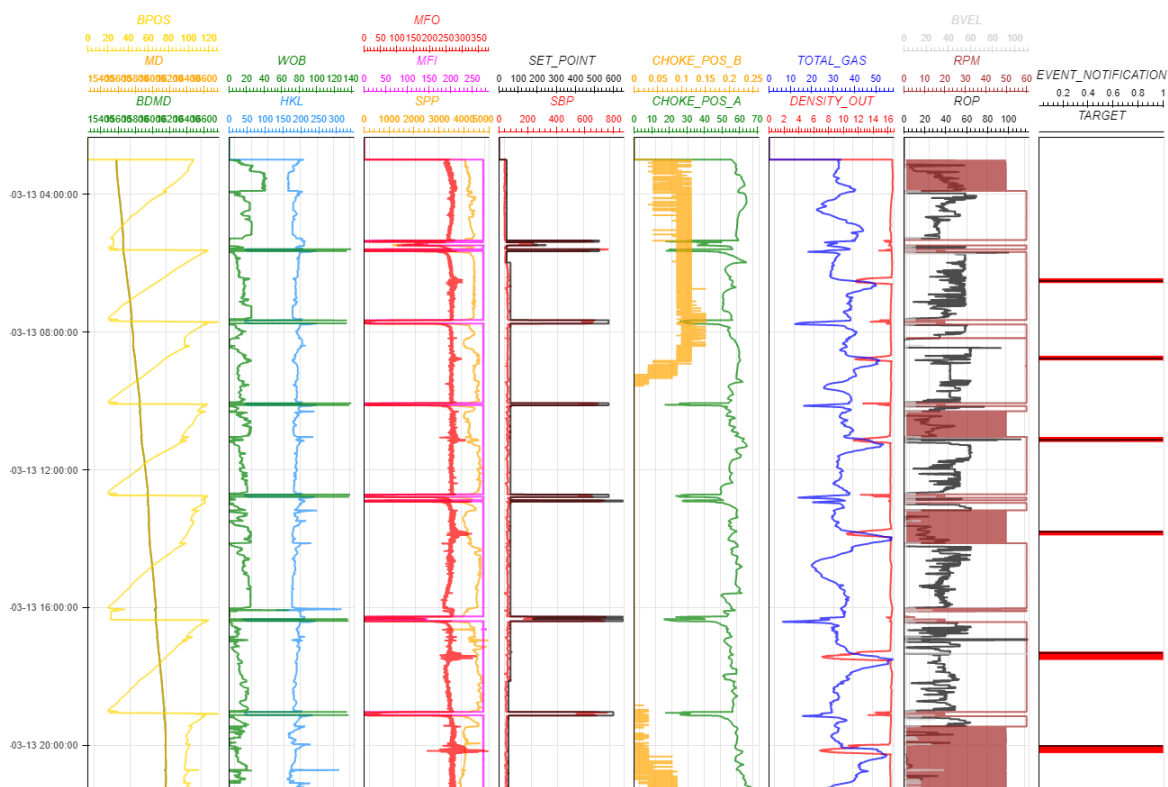


Рис. 1. Исходные данные параметров бурения обучающей выборки

Fig. 1. Time series drilling parameters of training dataset

Методика проведения исследования

Как отмечалось ранее, применение алгоритмов машинного обучения позволяет исключить человеческий фактор при обнаружении осложнений и аварий, тем самым сократить непроизводительное время и повысить эффективность бурения скважин.

Для корректной оценки эффективности использования различных алгоритмов машинного обучения предлагается разделить исходный набор данных в соответствии со схемой на рис. 2.



Рис. 2. Схема разделения исходного набора данных

Fig. 2. Input data splitting

Обучающий массив используется для проверки гипотез, различных комбинаций входных независимых переменных, архитектур алгоритмов и их гиперпараметров. В результате получаются обученные модели, качество работы которых оценивается на валидационном массиве данных. Когда дополнительные улучшения больше не приводят к улучшению качества, эта версия модели считается окончательной, наиболее эффективной обученной моделью.

Затем для получения количественных оценок качества работы алгоритма обученная модель применяется на тестовом массиве данных. Стоит отметить, что на данном этапе тестовый массив данных используется впервые и единожды за весь цикл проведения исследования. Такой подход гарантирует, что итоговые показатели оценки качества работы алгоритма будут объективным отражением того, насколько хорошо окончательная обученная модель будет работать как часть программного обеспечения непосредственно в процессе бурения скважины.

Основная цель использования различных подходов – найти наилучшую конфигурацию алгоритмов машинного обучения для их дальнейшего использования. Чтобы выбрать наилучшую конфигурацию алгоритмов машинного обучения, необходимо сконфигурировать каждую модель и оценить ее эффективность. На рис. 3 показана схема процесса обучения модели и оценки ее эффективности.

Для выявления аномалий во временных рядах используется огромное множество различных алгоритмов, классификация которых представлена на рис. 4 [19].

Аномалии – это наблюдения, которые значительно отличаются от других наблюдений, что, возможно, обусловлено другим механизмом работы системы. Аномалии бывают точечными и контекстуальными.

В соответствии с классификацией, приведенной на рис. 4, алгоритм может использовать схему обучения «с учителем», «с частичным привлечением учителя» (полуавтоматическое обучение) или обучаться «без учителя» [30–32].

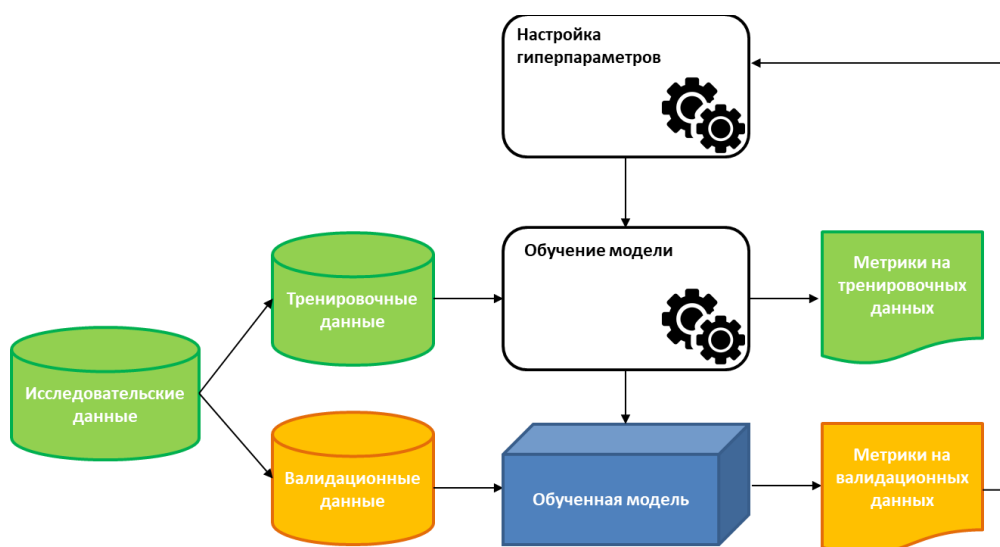


Рис. 3. Схема процесса обучения модели и оценки ее эффективности
Fig. 3. Model configuring workflow

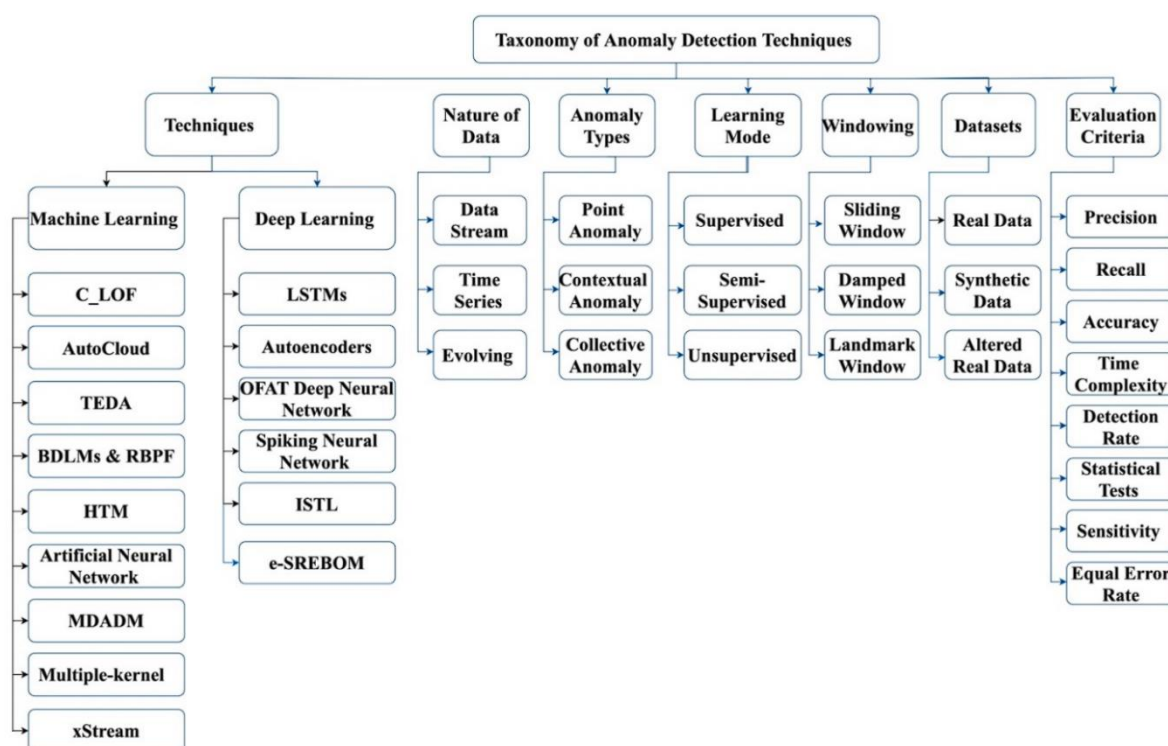


Рис. 4. Классификация алгоритмов машинного обучения, методов и критериев оценки качества выявления аномалий во временных рядах
Fig. 4. Taxonomy of anomaly detection techniques using machine learning

Подход к обнаружению аномалий при работе алгоритма «с учителем» предполагает обнаружение аномалий путем создания набора правил, выявленных в процессе обучения алгоритма на размеченных наборах данных, которые помогают прогнозировать будущие данные [33].

Подход к обнаружению аномалий при работе алгоритма «с частичным привлечением учителя» предполагает обнаружение аномалий путем создания первоначального набора правил, выявленных на небольшой размеченной выборке данных, в дальнейшем ал-

горитм корректирует первоначальные правила путем обработки поступающих неразмеченных данных [33].

Подход к обнаружению аномалий при работе алгоритма «без учителя» предполагает обнаружение аномалий на основе неразмеченного потока данных, таким образом алгоритм автоматически определяет, какие данные считать нормальными и аномальными. Данный подход не требует отдельных этапов обучения и тестирования [33].

Как уже упоминалось ранее, при обучении «с учителем» существует проблема сбора и разметки обу-

чающей выборки, однако данный подход позволяет получить наилучшее качество [34].

Обнаружение ранних признаков осложнения или аварии в процессе бурения позволяет заблаговременно проводить превентивные мероприятия, поэтому требуется, чтобы эта информация была достаточно преждевременной для ее использования. Существует компромисс между ранним обнаружением и ложными срабатываниями, поскольку алгоритм, который часто делает неточные обнаружения, скорее всего, будет проигнорирован.

Для оценки эффективности различных алгоритмов машинного обучения в задаче автоматического определения притока пластового флюида существуют метрики, которые позволяют выявить лучший метод или алгоритм. Определение притока пластового флюида является задачей классификации временного ряда. Кроме того, в процессе бурения времени, в течение которого приток отсутствует, несомненно, больше, чем когда происходит поступление пластового флюида в ствол скважины или отмечается его выход на устье. При такой постановке задачи целесообразнее использовать метрики классификации несбалансированных классов.

Далее метки положительного класса будут представляться для измерений, при которых произошел приток, метки отрицательного класса – для всех остальных измерений.

Точность (Precision, Positive Predictive Value) – это отношение истинноположительных результатов (TP) к общему количеству положительных результатов (TP + FP), предсказанных классификатором, то есть это доля объектов, действительно принадлежащих данному классу относительно всех объектов, которые система отнесла к этому классу. Данная метрика рассчитывается следующим образом в терминах матрицы ошибок [35]:

$$\text{Точность} = \frac{TP}{TP + FP}.$$

Значения точности изменяются от 0 до 1. Поскольку она не учитывает ложнонегативные (FN) предсказания и стремится свести к минимуму количество ложных срабатываний, точность не является полностью репрезентативной метрикой.

Полнота (Sensitivity, True Positive Rate, Recall, Hit Rate) отражает, какой процент объектов положительного класса был правильно классифицирован. Полнота демонстрирует способность алгоритма обнаруживать данный класс вообще. Данная метрика рассчитывается следующим образом в терминах матрицы ошибок:

$$\text{Полнота} = \frac{TP}{TP + FN}.$$

Полнота изменяется от 0 до 1. Точность и полноту можно называть ортогональными критериями качества. Точность используется в том случае, когда необходимо минимизировать количество ложных классификаций, в то время как полнота используется в том случае, когда необходимо выявить как можно больше объектов представленных классов [35].

Точность и полнота не зависят от соотношения классов и потому применимы в условиях несбалансированных выборок. Однако в том случае, если требуется найти оптимальный баланс между этими двумя показателями, необходимо иметь некую метрику, которая объединяла бы в себе информацию о точности и полноте анализируемого алгоритма. Именно такой метрикой является F-мера.

F-мера (F-Score) является единым показателем для измерения точности и полноты, представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой и широко используется для задач классификации несбалансированных классов. Значения F-меры изменяются от 0 до 1.

$$F\text{-мера} = \frac{2 \cdot \text{Точность} \cdot \text{Полнота}}{\text{Точность} + \text{Полнота}}.$$

Однако F-мера может показывать чрезмерно оптимистичные завышенные результаты. В этом случае статистика Каппа Козна (Cohen's Kappa) является хорошим показателем для задач классификации несбалансированных классов [35]. В терминах матрицы ошибок формула Каппа Козна может быть записана как:

$$Kappa = \frac{2 \times (TP \times TN - FN \times FP)}{(TP + FP) \times (FP + TN) \times (TP + FN) \times (FN + TN)}.$$

Кроме того, коэффициент корреляции Мэттьюса (MCC) является надежным статистическим показателем, который дает высокий балл только в том случае, если прогноз получил хорошие результаты во всех четырех категориях матрицы ошибок, пропорционально как размеру положительных элементов, так и размеру отрицательных элементов в наборе данных [35]. В терминах матрицы ошибок коэффициент корреляции Мэттьюса может быть записан как:

$$MCC = \frac{TP \times TN - FN \times FP}{\sqrt{(TP + FP) \times (FP + TN) \times (TP + FN) \times (FN + TN)}}.$$

Таким образом, наиболее эффективным алгоритмом будет считаться тот, который имеет наибольшее значение вышеобозначенных метрик, то есть позволяет выявить большое количество притоков в процессе бурения, при этом имея небольшое количество ложных срабатываний.

Кроме того, эффективность разрабатываемого алгоритма или метода необходимо оценивать не только на исторических данных, но и непосредственно в процессе бурения. Это позволит достоверно оценить эффективность разрабатываемой системы с учетом качества входной информации, а также динамики изменений основных параметров бурения в зависимости от выполняемой технологической операции и этапа сооружения скважины [36].

Результаты исследования

Для выполнения данной исследовательской работы компанией ООО «НьюТек Сервисез» был предоставлен исходный набор данных временных рядов параметров бурения с 20 скважин, на которых были отмечены случаи получения притока пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением.

Для оценки качества работы алгоритма использовались метрики, описанные выше.

Для оценки эффективности и вычислительной сложности, выраженной временем обучения, различных подходов машинного обучения была проведена серия экс-

периментов. В качестве тренировочного набора данных использовались исторические данные с 15 скважин, оставшиеся 5 были использованы как отложенная тестовая выборка. Результаты применения предобученной модели на тестовой выборке приведены в таблице.

Таблица. Результаты применения различных моделей машинного обучения на тестовой выборке

Table. Classification result of test dataset with main machine learning algorithms

Модель машинного обучения Machine learning model	Точность Accuracy	Площадь под кривой ошибок AUC-ROC	Полнота Recall	Точность Prec.	F-мера F1-Score	Статистика Каппа Коэна Кappa	Коэф. Мэттьюса MCC	Время обучения ТТ (sec)
Random Forest Classifier	0,9	0,9	0,898	0,8987	0,8984	0,8984	0,8984	1310,99
Catboost Classifier	0,8999	0,9	0,8971	0,8971	0,8971	0,8971	0,8971	667,27
Extreme Gradient Boosting	0,8999	0,9	0,896	0,8976	0,8968	0,8967	0,8967	916,85
Decision Tree Classifier	0,8999	0,8975	0,8948	0,8972	0,896	0,896	0,896	93,34
Light Gradient Boosting Machine	0,8995	0,8996	0,878	0,8824	0,8802	0,88	0,88	31,98
K Neighbors Classifier	0,8995	0,8988	0,8774	0,8822	0,8798	0,8795	0,8795	8715,58
Gradient Boosting Classifier	0,8968	0,8974	0,7069	0,8399	0,7683	0,7667	0,7693	1081,67
Ada Boost Classifier	0,8943	0,8964	0,5697	0,7688	0,6564	0,6535	0,6601	404,57
SVM - Linear Kernel	0,8903	0,5631	0,2271	0,7293	0,3691	0,3652	0,4173	1086,13
Linear Discriminant Analysis	0,884	0,8064	0,3945	0,3101	0,3484	0,3404	0,3423	9,32
Logistic Regression	0,8898	0,7951	0,1709	0,7576	0,3118	0,308	0,3788	529,20
Quadratic Discriminant Analysis	0,8172	0,856	0,7337	0,0198	0,1095	0,0909	0,1971	6,26
Naive Bayes	0,8461	0,7649	0,3896	0,02	0,0928	0,0754	0,1233	1,42
Ridge Classifier	0,8869	0,5005	0,001	1	0,0021	0,002	0,032	3,68

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наилучшее качество выявления притоков пластового флюида получено при помощи алгоритмов случайного леса (Random Forest Classifier) [37] и градиентного бустинга (Catboost Classifier, Extreme Gradient Boosting) [38, 39]. Кроме того, стоит

отметить, что обучение модели выполняется быстрее при использовании библиотеки машинного обучения Catboost.

Результаты работы градиентного бустинга (Catboost) на тестовой выборке представлены на рис. 5, 6.

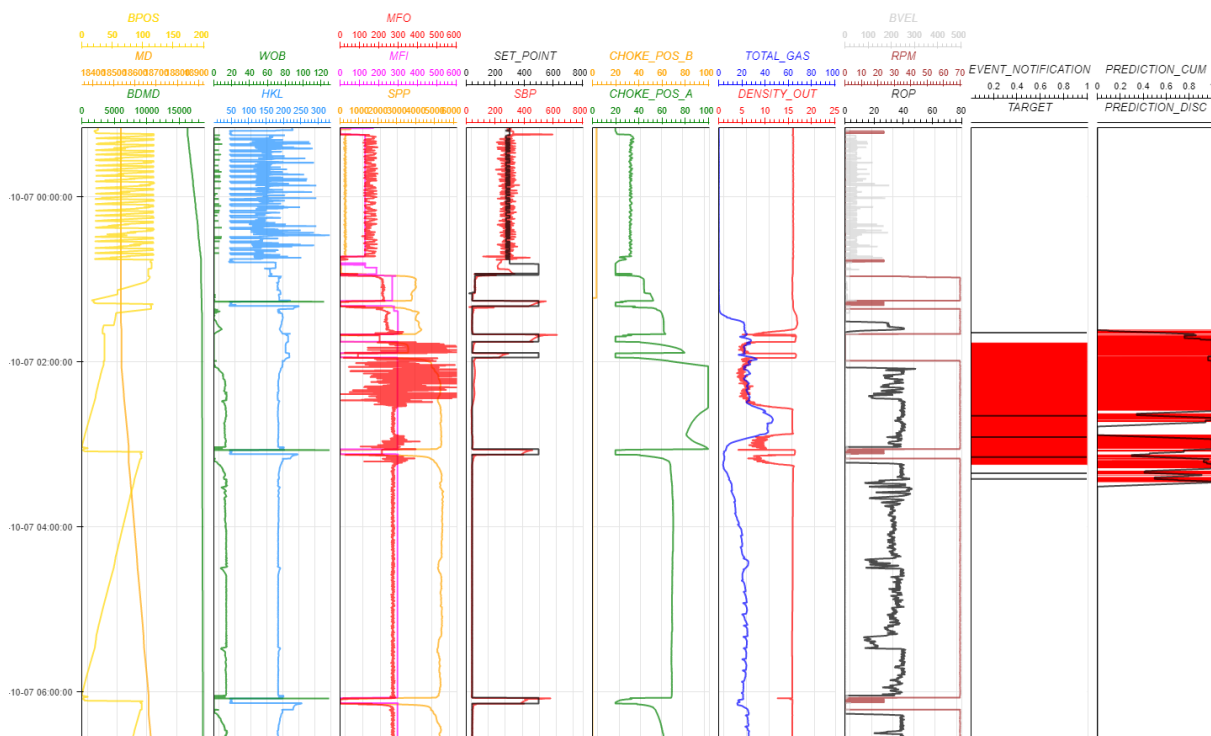


Рис. 5. Результаты работы модели градиентного бустинга (Catboost) на тестовой скважине № 1

Fig. 5. Catboost model prediction for test well no. 1

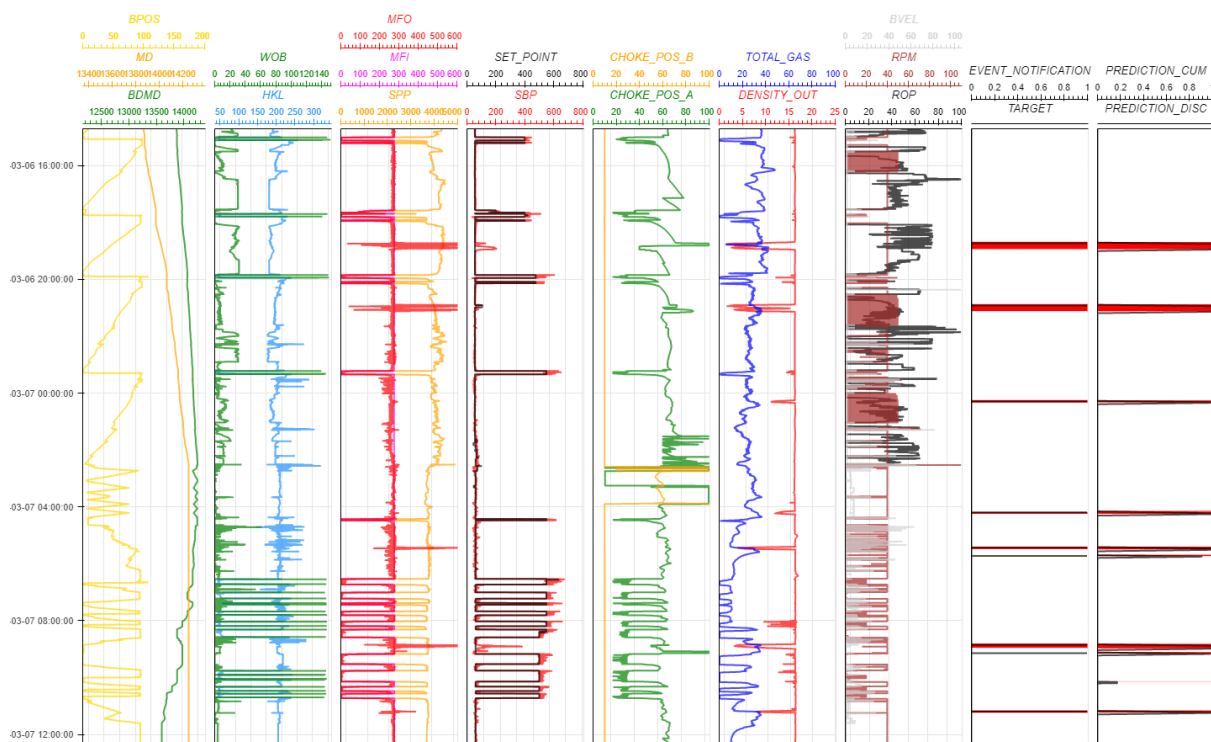


Рис. 6. Результаты работы модели градиентного бустинга (Catboost) на тестовой скважине № 2

Fig. 6. Catboost model prediction for test well no. 2

Предобученная модель позволяет получать уведомление о наличии признаков притока с минимальной задержкой, при этом обеспечивать минимальное количество ложных уведомлений и незафиксированных случа-

ев. Кроме того, необходимо отметить, что модель успешно справляется с зашумленностью данных. Однако при крайне низком качестве входных данных требуется дополнительная предобработка (рис. 7).

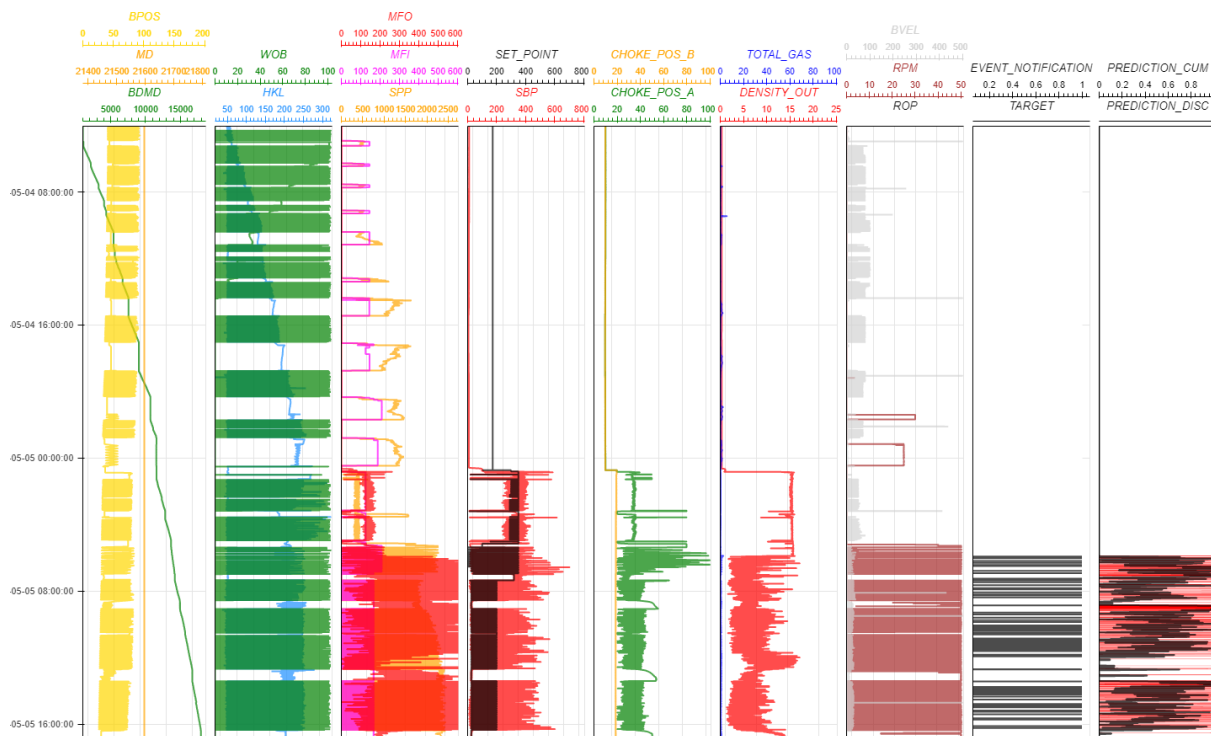


Рис. 7. Результаты работы модели градиентного бустинга (Catboost) на тестовой скважине № 3 с низким качеством исходных данных

Fig. 7. Catboost model prediction for test well no. 3 with low quality of input data

Заключение

В данной работе были приведены результаты исследования по обнаружению притока пластового флюида в процессе бурения с управляемым давлением при помощи различных алгоритмов машинного обучения. На основании полученных результатов можно утверждать, что применение градиентного бустинга позволяет выявлять приток пластового флюида с минимальной задержкой, при этом обеспечивая минимальное количество ложных уведомлений и незафиксированных случаев. Кроме того, была показана устойчивость алгоритма к зашумленности входного набора данных,

что отвечает требованиям непрерывного обнаружения осложнения в режиме реального времени.

В соответствии с полученными результатами определены направления дальнейших исследований:

- 1) повышение качества выявления притоков пластового флюида при помощи градиентного бустинга путем добавления дополнительных расчетных параметров в обучающий набор данных и подбора оптимальных гиперпараметров алгоритма;
- 2) разработка методов автоматической оценки качества входных данных в реальном времени;
- 3) проведение опытно-промышленных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафтин Д.Ю. Газонефтеводопроявления: признаки и причины возникновения ГНВП // Трибуна ученого. – 2020. – № 12. – С. 157–162.
2. Велиев Р.А., Савельева Н.Н. Предприятия по предупреждению и ликвидации ГНВП // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: Материалы X Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых. – Нижневартовск: Тюменский индустриальный университет, 2020. – С. 103–106.
3. Нурутдинов А.А., Ирниченко О.А., Тухватуллин М.Ф. Предупреждение проявления ГНВП на скважинах // Научные технологии в решении проблем нефтегазового комплекса в год экологии в России: материалы VII Международной научной конференции. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2017. – С. 37–42.
4. Дмитриевский А.Н., Сбоев А.Г., Еремин Н.А. Об увеличении продуктивного времени бурения нефтегазовых скважин с использованием методов машинного обучения // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 79–85. URL: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.79-85> (дата обращения 12.03.2023).
5. Failures detection at directional drilling using real-time analogues search / E. Gurina, N. Klyuchnikov, A. Zaytsev, E. Romanenkova, K. Antipova, I. Simon, V. Makarov, D. Koroteev // arXiv. – 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1906.02667v1> (дата обращения 12.03.2023).
6. Gurina E., Klyuchnikov N., Antipova K. Forecasting the abnormal events at well drilling with machine learning // Applied Intelligence. – 2022. – V. 52. – P. 9980–9995. URL: <https://doi.org/10.1007/s10489-021-03013-x> (дата обращения 12.03.2023).
7. Анализ применения технологии бурения с управляемым давлением на забое при проводке ствола скважины в карбонатных отложениях / В.А. Рябчук, Ю.П. Сердобинцев, В.А. Шмелев, Н.Н. Кривошеева // Молодой ученый. – 2019. – № 22 (260). – С. 138–139.
8. Сахновский И.В., Лубяный Д.А. Совершенствование технологии бурения с управляемым давлением на месторождениях Юрубчено-Тохомской группы // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2022. – № 1. – С. 2–6.
9. Доброхлеб П.Ю., Сорока Т.Б., Гусев А.В. Новые решения – новые возможности: технология бурения с регулируемым давлением как эффективное решение для трещиноватых коллекторов Восточной Сибири // Управление техносферой. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 138–160.
10. Успешное внедрение технологий бурения с управляемым давлением (МРД) и цементирования с управляемым давлением (МРС) в трещиноватых пластах, склонных к полной потере циркуляции / Ж.Н. Казакбаева, А.М. Кайдаров, А.В. Магда и др. // Форум СНИПИ: Сборник тезисов докладов научно-технического форума ООО «СамараНИПИнефть». – Самара: ООО «Портал инноваций», 2021. – С. 64–65.
11. Nayeem A.A. Monitoring of down-hole parameters for early kick detection. Master's Thesis. – Newfoundland, 2016. – 111 p.
12. Fjetland A.K. Kick detection during offshore drilling using artificial intelligence. Master's Thesis. – Agder, 2019. – 86 p.
13. Reitsma D. Development of an automated system for the rapid detection of drilling anomalies using standpipe and discharge pressure // SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. – 2011. URL: <https://doi.org/10.2118/140255-MS> (дата обращения 15.03.2023).
14. Reitsma D. A simplified and highly effective method to identify influx and losses during Managed Pressure Drilling without the use of a Coriolis flow meter // SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. – 2010. URL: <https://doi.org/10.2118/130312-MS> (дата обращения 15.03.2023).
15. Simulator and the first field test results of an automated early kick detection system that uses standpipe pressure and annular discharge pressure / I. Mills, D. Reitsma, J. Hardt, Z. Tarique // SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. – 2012. URL: <https://doi.org/10.2118/156902-MS> (дата обращения 15.03.2023).
16. A new generation of well surveillance for early detection of gains and losses when drilling very high profile U-tube deepwater wells, improving safety, and optimizing operating procedures / F. Le Blay, E. Villard, S.C. Hilliard, T. Gronas // SPETT 2012 Energy Conference and Exhibition. – 2012. URL: <https://doi.org/10.2118/158374-MS> (дата обращения 15.03.2023).
17. Cayeux E., Daireaux B. Precise gain and loss detection using a transient hydraulic model of the return flow to the pit // SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition. – 2013. URL: <https://doi.org/10.2118/166801-MS> (дата обращения 15.03.2023).
18. Simplified hydraulics model used for intelligent estimation of downhole pressure for a managed-pressure-drilling control system / G.-O. Kaasa, Ø.N. Stamnes, O.M. Aamo, L.S. Imsland // SPE Drilling & Completion. – 2012. – V. 27. – № 01 – P. 127–138. URL: <https://doi.org/10.2118/143097-PA> (дата обращения 15.03.2023).
19. A review of machine learning and deep learning techniques for anomaly detection in IoT data / R. Al-amri, R.K. Murugesan, M. Man, A.F. Abdulateef, M.A. Al-Sharafi, A.A. Alkahtani // Applied Sciences. – 2021. – V. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/app11125320> (дата обращения 15.03.2023).
20. A new methodology for kick detection during petroleum drilling using long short-term memory recurrent neural network / A. Osarogiagbon, S. Muojeke, R. Venkatesan, F. Khan, P. Gillard // Process Safety and Environmental Protection. – 2020. – V. 142. – P. 126–137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.046> (дата обращения 15.03.2023).
21. Field data analysis and risk assessment of gas kick during industrial deepwater drilling process based on supervised learning algorithm / Q. Yin, J. Yang, M. Tyagi, X. Zhou, X. Hou, B. Cao // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – V. 146 – P. 312–328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.012> (дата обращения 15.03.2023).
22. Downhole quantitative evaluation of gas kick during deepwater drilling with deep learning using pilot-scale rig data / Q. Yin, J. Yang, M. Tyagi, X. Zhou, X. Hou, N. Wang, G. Tong, R. Xie, H. Liu, B. Cao // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 208. – Part A. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109136> (дата обращения 15.03.2023).
23. Saeed S., Lovorn R., Kjetil A.K. Automated drilling systems for MPD – the reality // IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. – 2012. URL: <https://doi.org/10.2118/151416-MS> (дата обращения 15.03.2023).

24. Early kick detection from downhole measurements: a novel method for reducing the frequency and magnitude of loss-of-well-control events / B. Tost, R. Carney, J. Fred, A. Suhag // Offshore Technology Conference. – 2020. URL: <https://doi.org/10.4043/30831-MS> (дата обращения 15.03.2023).
25. Yuqiang X., Zhichuan G., Chen W. Methods of early gas kick detection and well control risk assessment in deepwater drilling // SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Security, Environment, and Social Responsibility. – 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/190510-MS> (дата обращения 15.03.2023).
26. Automatic gas influxes detection in offshore drilling based on machine learning technology / X. Hou, J. Yang, Q. Yin, L. Chen, B. Cao, J. Xu, X. Zhao // SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference. – 2020. URL: <https://doi.org/10.2118/198534-ms> (дата обращения 15.03.2023).
27. Muojeke S., Venkatesan R., Khan F. Supervised data-driven approach to early kick detection during drilling operation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107324> (дата обращения 15.03.2023).
28. Enhanced kick detection with low-cost rig sensors through automated pattern recognition and real-time sensor calibration / P. Pournazari, P. Ashok, E. van Oort, S. Unrau, S. Lai // SPE Middle East Intelligent Oil and Gas Conference and Exhibition. – 2015. URL: <https://doi.org/10.2118/176790-MS> (дата обращения 15.03.2023).
29. Vajargah A.K., Van Oort E. Early kick detection and well control decision-making for managed pressure drilling automation // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – V. 27. – P. 354–366. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.067> (дата обращения 15.03.2023).
30. Stuck pipe early warning system utilizing moving window machine learning approach / A.S. Omogbolahan, A.M. Beshir, Z.A. Majed, F.I. Ajikobi // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – 2019. URL: <https://doi.org/10.2118/197674-MS> (дата обращения 15.03.2023).
31. Arghad A.M. Distributed multi-sensor fusion system for drilling rig state detection: Doctoral Thesis. – Leoben, 2014. – 132 p.
32. Машинное обучение / Б. Хенрик, Д. Ричардс, М. Февеолф, И. Рузмайкина. – СПб: Изд-во «Питер», 2021. – 336 с.
33. Щербаков Р.Э., Ковалев А.В. Использование методов машинного обучения «без учителя» для предупреждения прихватов буровой и обсадной колонн // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 66–78.
34. Adbench: anomaly detection benchmark / H. Songqiao, H. Xiyang, H. Hailiang, J. Mingqi, Z. Yue // arXiv. – 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2206.09426> (дата обращения 15.03.2023).
35. Hossin M., Sulaiman M.N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations // International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process. – 2015. – V. 5. – P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201> (дата обращения 15.03.2023).
36. Искусственный интеллект для сопровождения бурения: как оценить эффективность и стоит ли доверять / К.А. Антипова, Е.В. Гурина, А.С. Ольховиков, Д.А. Коротева // Сборник тезисов докладов научно-технического форума ООО «СамараНИ-Пинефть». – Самара: Портал Инноваций, 2022. – С. 52–53.
37. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. – 2001. – V. 45. – P. 5–32. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324> (дата обращения 15.03.2023).
38. CatBoost: unbiased boosting with categorical features / L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A. Dorogush, A. Gulin // arXiv. – 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.09516> (дата обращения 15.03.2023).
39. Tianqi C., Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system // 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794. URL: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785> (дата обращения 15.03.2023).

Поступила: 15.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 27.03.2023 г.

Информация об авторах

Щербаков Р.Э., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; главный инженер-программист «Nedra Digital».

Ковалев А.В., кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ильин А.В., кандидат физико-математических наук, менеджер новых проектов, Frontier International LLC.

UDC 622.248.5:004.85

USING SUPERVISED MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR KICK DETECTION DURING MANAGED PRESSURE DRILLING

Roman E. Shcherbakov^{1,2},
res718@bk.ru

Artem V. Kovalev¹,
Kovalevav@tpu.ru

Andrey V. Ilin³,
Allin@fr-intl.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia

² «Nedra Digital»,
4, Uralskaya street, St Petersburg, 199178, Russia.

³ Frontier International LLC,
7600 W Tidwell, Suite 708, Houston, TX 77040, USA.

The relevance. The depletion of readily available hydrocarbon reserves determines development of fields with complex geological environment. Managed Pressure Drilling marked the era of high-precision well parameters monitoring during drilling. This technology has provided access to deposits that were previously considered practically «unusable». The main goal of using managed pressure drilling technology is to control downhole pressure within specified limits in order to prevent fluid loss, fracturing, as well as unwanted kick of reservoir fluids into the wellbore. However, if for a certain period of time there is a kick of reservoir fluid from an open borehole or there are losses of drilling fluid, then it is not possible to control the downhole pressure within the specified limits. In this case, it is necessary to use an additional method or algorithm that marks such periods and indicates to the operator or the monitoring system about the presence of kick or absorption of drilling mud. The problems described earlier predetermined the aim of this work. It is claimed that the intelligent system can automatically monitor and analyze parameter trends, detect anomalies in the change of drilling parameters in real time, predict in advance the probability of formation fluid kick and warn the drilling engineer at an early stage, which will allow implementing preventive activity to maintain the required downhole pressure profile.

The main aim: create the kick detection machine learning model which predicts kick probability during the managed pressure well drilling using mud logging service data.

Objects: multivariate-sensing time-series data of mud logging and measured pressure drilling service.

Methods: analysis and evaluation of anomaly detection techniques of determining kick during managed pressure well drilling using machine learning.

Results. The authors have performed the overview of anomaly detection techniques of determining kick during managed pressure well drilling using machine learning. Classical machine learning algorithms were tested with labeled test data in order to evaluate its performance. The authors have developed kick detection model with gradient boosting algorithm, evaluated its performance with labeled test dataset. Promising areas of further research were identified.

Key words:

Kick detection, machine learning, multivariate-sensing time-series, anomaly detection, managed pressure drilling.

REFERENCES

1. Kaftin D.Y. Gazoneftevodoproyavleniya: priznaki i prichiny vozniknoveniya GNVP [Oil, gas and water shows: signs and causes of kick]. *Tribune of the scientist*, 2020, no. 12, pp. 157–162.
2. Veliev R.A., Saveleva N.N. Predpriyatiya po preduprezhdeniyu i likvidatsii GNVP [Measures for the prevention and elimination of oil, gas and water shows]. *Opyt, aktualnye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa. Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya, aspirantov i uchenykh* [Experience, current problems and prospects for the development of the oil and gas complex. Materials of the X International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Scientists]. Nizhnevartovsk, TyumIU, 2020. pp. 103–106.
3. Nurutdinov A.A., Irnichenko O.A., Tuhvatullin M.F. Preduprezhdenie proyavleniya GNVP na skvazhinakh [Prevention of oil, gas and water shows at wells]. *Naukoemkie tekhnologii v reshenii problem neftegazovogo kompleksa v god ekologii v Rossii. Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [High-tech technologies in solving the problems of the oil and gas complex in the year of Ecology in Russia. Materials of the VII International Scientific Conference]. Ufa, BashGU Publ., 2017. pp. 37–42.
4. Dmitrievsky A.N., Sboev A.G., Eremin N.A., Chernikov A.D., Naumov A.V., Gryaznov A.V., Moloshnikov I.A., Borozdin S.O., Safarova E.A. On increasing the productive time of drilling oil and gas wells using machine learning methods. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 79–85. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.79-85> (accessed 15 March 2023).
5. Gurina E., Klyuchnikov N., Zaytsev A., Romanenkova E., Antipova K., Simon I., Makarov V., Koroteev D. *Failures detection at directional drilling using real-time analogues search*. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1906.02667v1> (accessed 15 March 2023).
6. Gurina E., Klyuchnikov N., Antipova K. Forecasting the abnormal events at well drilling with machine learning. *Applied Intelligence*, 2022, vol. 52, pp. 9980–9995. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10489-021-03013-x> (accessed 15 March 2023).
7. Ryabchuk V.A., Serdobintsev Y.P., Shmelev V.A., Krivosheeva N.N. Analiz primeneniya tekhnologii bureniya s upravlyayemym davleniem na zaboe pri provodke stvola skvazhiny v karbonatnykh otlozheniyakh [Analysis of the application of the technology of managed pressure at the carbonate deposits]. *Molodoy ucheny*, 2019, no. 22 (260), pp. 138–139.

8. Sahnovskiy I.V., Lubyany D.A. Sovershennstvovanie tekhnologii bureniya s upravlyayemym davleniem na mestorozhdeniyah Yurubcheno-Tokhomskoy gruppy [Improving the technology of managed pressure drilling at the fields of the Yurubchen-Tokhom group]. *Vestnik Assotsiatsii burovyykh podryadchikov*, 2022, no. 1, pp. 2–6.
9. Dobrokhleb P.Y., Soroka T.B., Gusev A.V. Novye resheniya – novye vozmozhnosti: tekhnologiya bureniya s reguliruemym davleniem kak effektivnoe reshenie dlya treshchinovatykh kollektorov Vostochnoy Sibiri [New solutions – new opportunities: technology of drilling with adjustable pressure as an effective solution for fractured reservoirs of Eastern Siberia]. *Upravlenie tekhnosferoy*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 138–160.
10. Kazakbaeva Z.N., Kajdarov A.M., Magda A.V. Uspeshnoe vnedrenie tekhnologii bureniya s upravlyayemym davleniem (MPD) i tsementirovaniya s upravlyayemym davleniem (MPC) v treshchinovatykh plastakh, sklonnykh k polnoy potere tsirkulyatsii [Successful implementation of managed pressure drilling and managed pressure cementing technologies in fractured formations prone to complete loss of circulation]. *SNIPi: Sbornik tezisev dokladov nauchno-tekhnicheskogo foruma OOO «SamaraNIPIneft»* [SNIPi Forum: Collection of abstracts of reports of the scientific and technical forum of SamaraNIPIneft LLC]. Samara, Portal innovatsy Publ., 2021, pp. 64–65.
11. Nayeem A.A. *Monitoring of down-hole parameters for early kick detection*. Master's Thesis. Newfoundland, 2016. 111 p.
12. Fjetland A.K. *Kick detection during offshore drilling using artificial intelligence*. Master's Thesis. Agder, 2019. 86 p.
13. Reitsma D. Development of an automated system for the rapid detection of drilling anomalies using standpipe and discharge pressure. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Amsterdam, The Netherlands, 2011. Available at: <https://doi.org/10.2118/140255-MS> (accessed 15 March 2023).
14. Reitsma D. A simplified and highly effective method to identify influx and losses during Managed Pressure Drilling without the use of a Coriolis flow meter. *SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010. Available at: <https://doi.org/10.2118/130312-MS> (accessed 15 March 2023).
15. Mills I., Reitsma D., Hardt J., Tarique Z. Simulator and the first field test results of an automated early kick detection system that uses standpipe pressure and annular discharge pressure. *SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition*. Milan, Italy, 2012. Available at: <https://doi.org/10.2118/156902-MS> (accessed 15 March 2023).
16. Le Blay F., Villard E., Hilliard S.C., Gronas T. A new generation of well surveillance for early detection of gains and losses when drilling very high profile UL-tradeepwater wells, improving safety, and optimizing operating procedures. *SPETT 2012 Energy Conference and Exhibition*. Port-of-Spain, Trinidad, 2012. Available at: <https://doi.org/10.2118/158374-MS> (accessed 15 March 2023).
17. Cayeux E., Daireaux B. Precise gain and loss detection using a transient hydraulic model of the return flow to the pit. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition*. Dubai, UAE, 2013. Available at: <https://doi.org/10.2118/166801-MS> (accessed 15 March 2023).
18. Kaasa G.-O., Stamnes Ø.N., Aamo O.M., Imsland L.S. Simplified hydraulics model used for intelligent estimation of downhole pressure for a managed-pressure-drilling control system. *SPE Drilling & Completion*, 2012, vol. 27, no. 01, pp. 127–138. Available at: <https://doi.org/10.2118/143097-PA> (accessed 15 March 2023).
19. Al-amri R., Munugesan R.K., Man M., Abdulateef A.F., Al-Sharafi M.A., Alkahtani A.A. A review of machine learning and deep learning techniques for anomaly detection in IoT data. *Applied Sciences*, 2021, vol. 12. Available at: <https://doi.org/10.3390/app11125320> (accessed 15 March 2023).
20. Osarogiagbon A., Muojeke S., Venkatesan R., Khan F., Gillard P. A new methodology for kick detection during petroleum drilling using long short-term memory recurrent neural network. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, vol. 142, pp. 126–137. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.046> (accessed 15 March 2023).
21. Yin Q., Yang J., Tyagi M., Zhou X., Hou X., Cao B. Field data analysis and risk assessment of gas kick during industrial deepwater drilling process based on supervised learning algorithm. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 146, pp. 312–328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.012> (accessed 15 March 2023).
22. Yin Q., Yang J., Tyagi M., Zhou X., Hou X., Wang N., Tong G., Xie R., Liu H., Cao B. Downhole quantitative evaluation of gas kick during deepwater drilling with deep learning using pilot-scale rig data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, part A. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109136> (accessed 15 March 2023).
23. Saeed S., Lovorn R., Kjetil A.K. Automated drilling systems for MPD – the reality. *SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, USA, 2012. Available at: <https://doi.org/10.2118/151416-MS> (accessed 15 March 2023).
24. Tost B., Carney R., Fred J., Suhag A. Early kick detection from downhole measurements: a novel method for reducing the frequency and magnitude of loss-of-well-control events. *Offshore Technology Conference*. Houston, USA, 2020. Available at: <https://doi.org/10.4043/30831-MS> (accessed 15 March 2023).
25. Yuqiang X., Zhichuan G., Chen W. Methods of early gas kick detection and well control risk assessment in deepwater drilling. *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Security, Environment, and Social Responsibility*. Abu Dhabi, UAE, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/190510-MS> (accessed 15 March 2023).
26. Hou X., Yang J., Yin Q., Chen L., Cao B., Xu J., Zhao X. Automatic gas influxes detection in offshore drilling based on machine learning technology. *SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference*. Abu Dhabi, UAE, 2020. Available at: <https://doi.org/10.2118/198534-MS> (accessed 15 March 2023).
27. Muojeke S., Venkatesan R., Khan F. Supervised data-driven approach to early kick detection during drilling operation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 192. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107324> (accessed 15 March 2023).
28. Pourmazari P., Ashok P., Van Oort E., Unrau S., Lai S. Enhanced kick detection with low-cost rig sensors through automated pattern recognition and real-time sensor calibration. *SPE Middle East Intelligent Oil and Gas Conference and Exhibition*. Abu Dhabi, UAE, 2015. Available at: <https://doi.org/10.2118/176790-MS> (accessed 15 March 2023).
29. Vajargah A. K., Van Oort E. Early kick detection and well control decision-making for managed pressure drilling automation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 27, pp. 354–366. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.067> (accessed 15 March 2023).
30. Omogbolahan A.S., Beshir A.M., Majed Z.A., Ajikobi F.I. Stuck pipe early warning system utilizing moving window machine learning approach. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, 2019. Available at: <https://doi.org/10.2118/197674-MS> (accessed 15 March 2023).
31. Arghad A.M. *Distributed multi-sensor fusion system for drilling rig state detection*. Doctoral Thesis. Leoben, 2014. 132 p.
32. Brink H., Richards J.W., Fetherolf M. *Real-world machine learning*. New York, Manning, 2017. 264 p.
33. Shcherbakov R., Kovalev A. Using unsupervised machine learning algorithm to prevent the sticking of drilling and casing strings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 66–78. In Rus.
34. Songqiao H., Xiyang H., Hailiang H., Mingqi J., Yue Z. *Adbench: anomaly detection benchmark*. 2022. Available at: <https://arxiv.org/abs/2206.09426> (accessed 15 March 2023).
35. Hossin M., Sulaiman M.N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*, 2015, vol. 5, pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201> (accessed 15 March 2023).
36. Antipova K.A., Gurina E.V., Olkhovikov A.S., Koroteev D.A. Iskustvenny intellekt dlya soprovozhdeniya bureniya: kak otsenit effektivnost i stoit li doveryat [Artificial intelligence for drilling support: how to evaluate the effectiveness and should we trust it]. *Sbornik tezisev dokladov nauchno-tekhnicheskogo foruma OOO «SamaraNIPIneft»* [SNIPi Forum: Collection of abstracts of reports of the scientific and technical forum of SamaraNIPIneft LLC]. Samara, Portal Innovatsy Publ., 2022, pp. 52–53.
37. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, pp. 5–32. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324> (accessed 15 March 2023).

38. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A., Gulin A. *CatBoost: unbiased boosting with categorical features*. 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1706.09516> (accessed 15 March 2023).
39. Tianqi C., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. 22nd *ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016. pp. 785–794. Available at: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785> (accessed 15 March 2023).

Received: 15 March 2023.
Reviewed: 27 March 2023.

Information about the authors

Roman E. Shcherbakov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; principal engineer, «Nedra Digital».

Artem V. Kovalev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey V. Ilin, new project manager, Frontier International LLC.

УДК 551.435.627

ВЛИЯНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА КАРТИРОВАНИЕ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ К РАЗВИТИЮ ОПОЛЗНЕЙ

Зыонг Ван Бинь^{1,2},
duongvanbinh@humg.edu.vn

Фоменко Игорь Константинович²,
ifolga@gmail.com

Та Дык Тинь^{1,3},
taducthinh@humg.edu.vn

Нгуен Чунг Киен⁴,
kien.mgri@gmail.com

Зеркаль Олег Владимирович⁵,
igzov@mail.ru

Горобцов Денис Николаевич²,
dngorobtsov@mail.ru

Ву Хонг Данг⁶,
hongdangbg@gmail.com

¹ Ханойский горно-геологический университет,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Вьен, 18.

² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

³ Вьетнамская ассоциация инженерной геологии и окружающей среды,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Фунгхынг, 91.

⁴ Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Чуаланг, 84.

⁵ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1.

⁶ Вьетнамский институт геонаук и минеральных ресурсов,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Тьентханг, 67.

Актуальность. Оползни являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий в мире. Во Вьетнаме оползни также приводили к значительным человеческим жертвам и материальным потерям. Системная оценка оползневой опасности является важнейшим компонентом стратегии Вьетнама по предотвращению стихийных бедствий.

Целью исследования являлась оценка оползневой восприимчивости района Батсат провинции Лаокай (Вьетнам) с использованием четырех разрешений цифровой модели рельефа (10, 30, 40 и 60 м) и девяти факторов оползнеобразования: экспозиция склонов, высота над уровнем моря, крутизна склонов, расстояние до дорог, расстояние от разломов, расстояние до эрозионной сети, среднемесячное количество осадков, землепользование и тип коры выветривания.

Объектом исследования является оползневая восприимчивость в районе Батхат провинции Лаокай Вьетнама. Качество имеющихся исходных данных играет важную роль в достоверности результатов моделирования оползневой восприимчивости территорий к оползневому процессу. Одним из наиболее значимых параметров для выполнения анализа является информация о рельефе местности, на основе которой строятся карты экспозиции и крутизны склонов, горизонтальной и вертикальной расчлененности рельефа и т. д. Качество цифровой модели рельефа может быть оценено на основе ее пространственного разрешения.

Методы: метод фактора достоверности, фрактальный метод.

Результаты. Выполненные исследования показали статистически значимую взаимосвязь между распределением оползней и факторами оползнеобразования в районе изучения. В результате территория была разделена на пять зон по восприимчивости к оползневому процессу: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая. Зона с очень низкой оползневой восприимчивости составляет менее 10 % района исследования, в то время как зона с очень высокой восприимчивостью изменяется от 14,95 до 18,32 % в зависимости от пространственного разрешения цифровой модели рельефа. Анализ кривой ошибок показал, что все модели, вне зависимости от разрешения цифровой модели рельефа обладают хорошей эффективностью прогнозирования, площадь под кривой ошибок – $AUC > 70$ %. Одновременно на основе результатов анализа с использованием метода кривой ошибок и фрактального метода было получено, что модель с пространственным разрешением 60 м имеет наибольшую достоверность. Этот нетривиальный вывод может быть объяснен тем фактом, что надежность результатов оценки оползневой восприимчивости зависит не столько от разрешения цифровой модели рельефа, сколько от соотношения разрешения цифровой модели рельефа и средней площади оползней в районе исследования. Этот вывод доказывает необходимость отображать на картах инвентаризации оползней не только их местоположения, но и подробные морфологические характеристики.

Ключевые слова:

Оползневая восприимчивость территории, разрешение цифровой модели рельефа, метод фактора достоверности, фрактальный метод, ГИС, площадь под кривой ошибок, Батсат, Вьетнам.

Введение

Оползни являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий в мире, приводящих к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам. Согласно исследованию У. Хака (2019), выполненному на основе данных из 128 стран за два десятилетия (1995–2014 гг.), в результате 3876 оползней во всем мире погибло 163658 человек и 11689 человек получили ранения [1]. Общее число оползней со смертельным исходом в период с 2004 по 2016 гг. (включительно) составило 4862 человек, исключая случаи, вызванные землетрясениями, большинство оползней произошло в Азии (75 %) [2]. Во Вьетнаме оползни также приводили к значительным человеческим жертвам, а ежегодный ущерб от оползневых процессов оценивается в 100 миллионов долларов США [3–6]. Согласно данным Управления по борьбе со стихийными бедствиями (Ханой, октябрь 2019 г.), в период с 2000 по 2015 гг. во Вьетнаме произошло 250 ливневых паводков и вызванных ими оползней. Эти события стали причиной значительного социально-экономического ущерба: 779 человек погибли, 426 человек получили ранения, было разрушено 9700 домов, пострадало около 75000 гектаров сельскохозяйственных земель.

Расположенная в северном горном регионе Вьетнама провинция Лаокай особенно подвержена оползням из-за сочетания неблагоприятных факторов, включая обильные осадки, контрастный рельеф и обезлесение [7, 8]. С 2005 по 2015 гг. в этом районе был выявлен 641 активный оползень. На основе исследования Ч.Й. Нгуен [9] с 1965 по 2006 гг. в данном регионе от схода оползней погибло 150 человек и был разрушен 361 дом. Существенные экономические и социальные потери, связанные с активизацией оползневых процессов, привели к пониманию необходимости их систематического изучения. Увеличение ущерба от стихийных бедствий было связано со следующими основными причинами [10]: (1) неточностью прогнозирования; (2) низкой эффективностью мероприятий по их предотвращению. Таким образом, повышение достоверности прогнозирования является одним из важнейших компонентов национальной стратегии предотвращения и уменьшения последствий от стихийных бедствий.

Предрасположенность территории к развитию оползней, или оползневая восприимчивость, – это возможность развития оползневых процессов в исследуемом районе на основе одновременной оценки различных факторов оползнеобразования [11, 12]. Картирование оползневой восприимчивости (Landslide Susceptibility Mapping – LSM) – это процесс определения пространственного распределения оползней и специальная инженерно-геологическая типизация местности на основе оценки ее устойчивости к развитию оползневого процесса [13, 14].

На настоящий момент в инженерной геологии разработано множество подходов для картирования оползневой восприимчивости территорий в различных масштабах. Их можно разделить на три группы: качественные, полуколичественные и количественные [15–17].

Качественные подходы основаны на эвристических методах оценки, анализе карт инвентаризации оползней, анализе геоморфологических условий. Они, как правило, находят применение при региональной оценке оползневой опасности на больших территориях или при недостатке исходных данных.

Количественные подходы включают: статистические методы; методы, основанные на искусственном интеллекте и машинном обучении; методы математического моделирования [18].

Кроме того, сочетание качественного и количественного подходов известно как полуколичественный, или гибридный, подход. К полуколичественным подходам могут быть отнесены методы анализа решений по нескольким критериям.

Количественные подходы рассматриваются как наиболее объективные. Они зависят главным образом от используемых математических моделей и значительно меньше от человеческих суждений и опыта. Качественные подходы более субъективны [17, 19, 20].

Помимо используемых подходов, важную роль в достоверности результатов моделирования оползневой восприимчивости территорий к оползневому процессу играет качество имеющихся исходных данных. Важным условием для получения надёжных результатов является объективность информации по инвентаризации оползней [21]. Разработка карт оползневой восприимчивости зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и факторами оползнеобразования, которые должны быть учтены при выполнении анализа. Одним из наиболее значимых параметров является информация о рельефе местности, на основе которой строятся карты экспозиции и крутизны склонов, горизонтальной и вертикальной расчлененности рельефа и т. д. [22, 23]. Качество цифровой модели рельефа (ЦМР) может быть оценено на основе ее пространственного разрешения. Пространственное разрешение – величина, определяющая количество точек (элементов растрового изображения) на единицу площади (или единицу длины). Разрешение растровой структуры данных может быть охарактеризовано в терминах размера ячеек сетки.

Другим критерием качества ЦМР является детальность исходных данных, использованных для построения цифровой модели рельефа. Очевидно, что ЦМР, построенная с использованием топооснов масштаба 1:100000 (с соответствующим шагом изолиний рельефа), будет менее качественной, чем ЦМР, построенная с использованием топооснов масштаба 1:10000 (с соответствующим шагом изолиний рельефа), даже при условии сходного пространственного разрешения итогового раstra. Те же требования применимы и к данным дистанционного зондирования.

В этом исследовании анализировалось влияние разрешения ЦМР на достоверность оценки оползневой восприимчивости в Батсате, северном горном районе провинции Лаокай (Вьетнам). Для построения статистических количественных моделей (CF10, CF30, CF40 и CF60) на основе ГИС были выбраны четыре значения разрешения ЦМР (10, 30, 40 и 60 м).

Характеристика района исследования

Батсат – район площадью 1050,2 км² (рис. 1), расположенный в зоне поднятия Фансипан, имеющий сложную геологическую структуру со множеством активных разломов [24]. Более 70 % его территории занимают горы. Как следствие, в геоморфологическом отношении он характеризуется высоким вертикальным расчленением рельефа (минимальная отметка рельефа 75 м, максимальная более 3000 м над уровнем моря), а 40 % склонов имеют уклоны порядка 20–30 градусов. В геологическом строении района принимают участие магматические (47 % площади сложено гранодиоритами и гранитами) и метаморфические (53 % площади сложено кварц-биотитовыми и графитовыми сланцами, песчаниками, алевролитами и амфиболитами) породы [25].

Климат в районе Батсат тропический муссонный. Результатом этого является наличие двух сезонов: влажного (май–октябрь) и сухого (ноябрь–апрель). Область исследования находится в центре обильных осадков Хоанг Лиен Шон. Среднегодовое суммарное количество осадков составляет более 2000 мм [8]. Наибольшее количество осадков приходится на летний период, составляя 70–85 % от общего годового количества осадков.

В последние годы вследствие активного хозяйственного освоения район Батсат столкнулся с проблемой активизации оползневых процессов, увеличении их частоты и масштабов проявления.

Сильные дожди являются основным триггером активизации и развития оползней на рассматриваемой территории. На рис. 2 показаны последствия активизации оползней в районе Батсат, которые сопровождались повреждениями жилых домов, разрушениями объектов инфраструктуры, выводом из оборота сельскохозяйственных угодий. 13 сентября 2004 г. в коммуне Финнган произошел оползень, ставший причиной разрушения четырех домов и приведший к гибели 23 человек (Рис. 2, а). В том же году образовался крупный оползень вблизи здания Народного комитета района Батсат (Рис. 2, b). В июле 2013 г. произошел оползень в коммуне Мыонгхум (Рис. 2, c), ставший причиной изменения русла р. Мыонгхум и нанесший ущерб сельскохозяйственным угодьям.

Исходные данные и методы исследования

Карта инвентаризации оползней

Для разработки эффективных прогнозных моделей оценки оползневой восприимчивости, опасности и риска необходимо создать достоверные карты инвентаризации оползней в районе исследований [26, 27]. Наряду с отображением пространственного распределения оползней карта инвентаризации может включать другие виды данных, такие как: геометрические характеристики оползня (размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневыми деформациями), особенности геологического строения (литология, структура, свойства грунтов) и гидрогеологические условия.

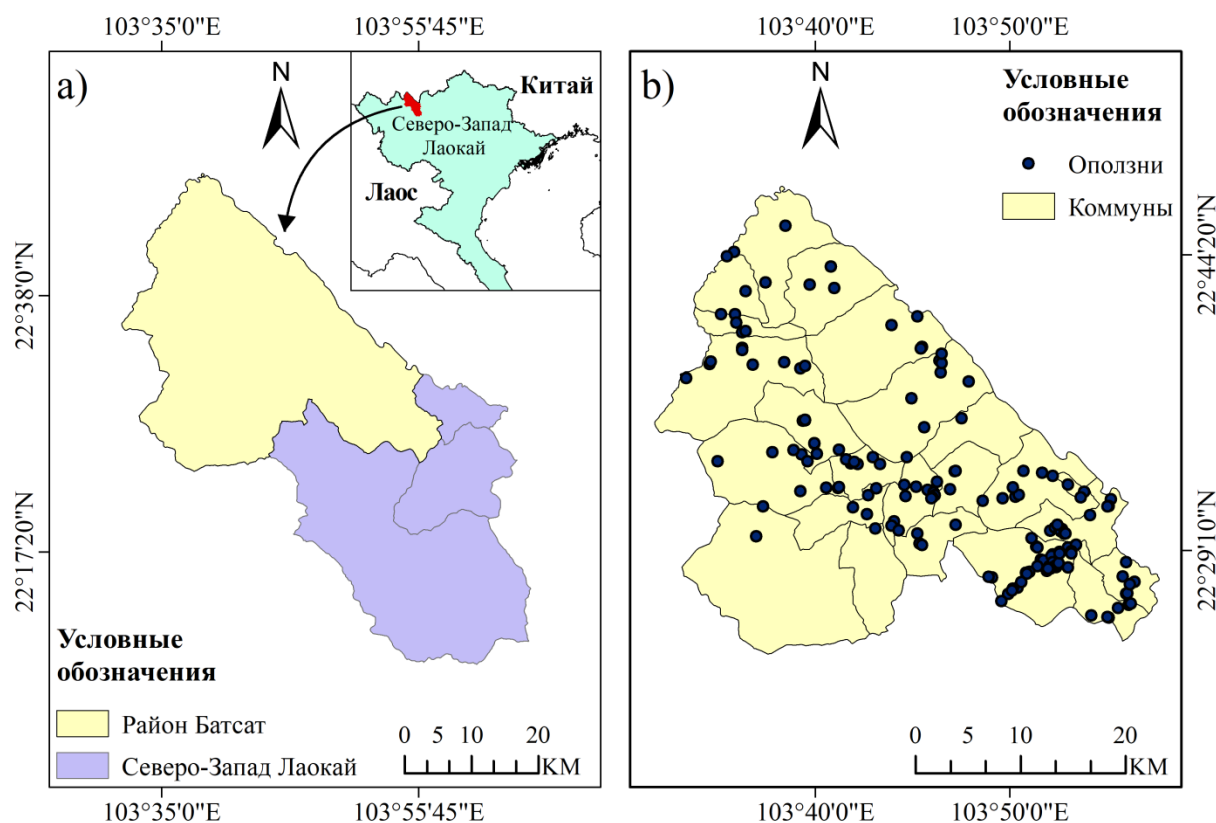


Рис. 1. Расположение района исследования

Fig. 1. Location of study area

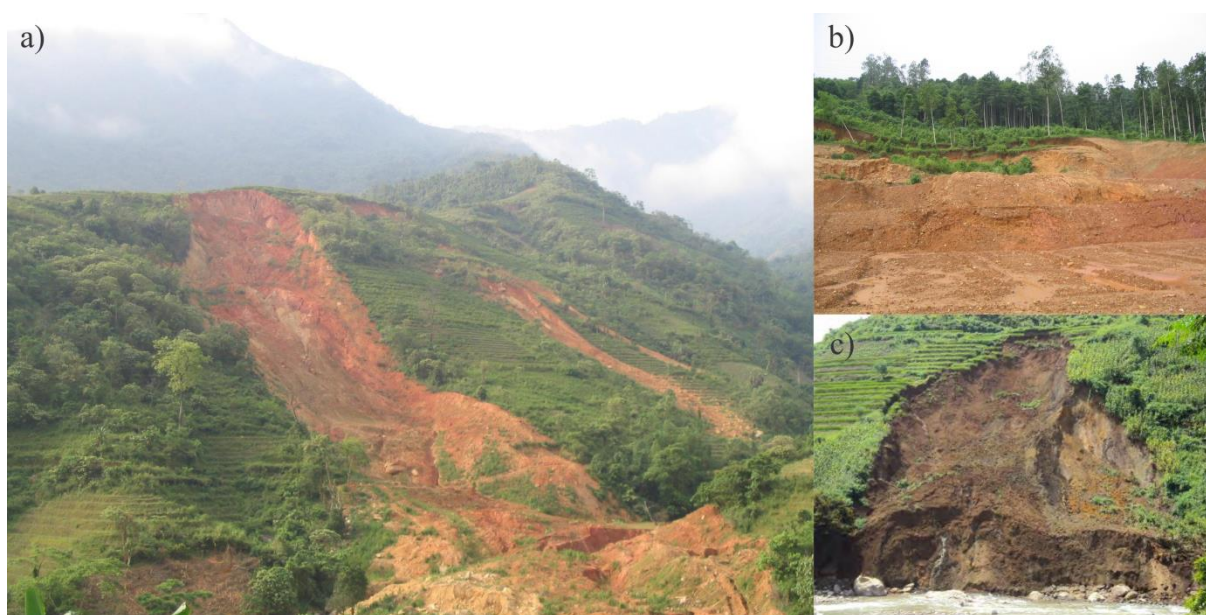


Рис. 2. Фотографии оползней: в коммуне Финнган (а), в центре района Батсат (б), в коммуне Мыонгхум (с). Фото Ч.К. Нгуена

Fig. 2. Photo of landslide sites: in Phin Ngan commune (a), in the center of Bat Xat district (b), in Muong Hum commune (c). Photo by T.K. Nguyen

При построении карт инвентаризации могут быть использованы различные подходы [28], основными из которых являются: сбор исторических данных о появлении оползней; полевые исследования (оползневая съемка); анализ данных дистанционного зондирования, в том числе и путем их сравнения с результатами оползневой съемки. Выбор того или иного подхода определяется целью и масштабом исследований, а также доступностью необходимых исходных данных (масштаба базовых карт, разрешающей способности

данных дистанционного зондирования, детальности оползневой съемки и т. д.). Современные методы картирования основаны на многоспектральной съемке, спутниковых, воздушных и наземных технологиях дистанционного зондирования, в том числе с использованием LIDAR (Light Detection and Ranging) картографирования [29]. Использование геоинформационных систем (ГИС) значительно упрощает составление и обновление карт инвентаризации оползней, а также повышает их достоверность [17].

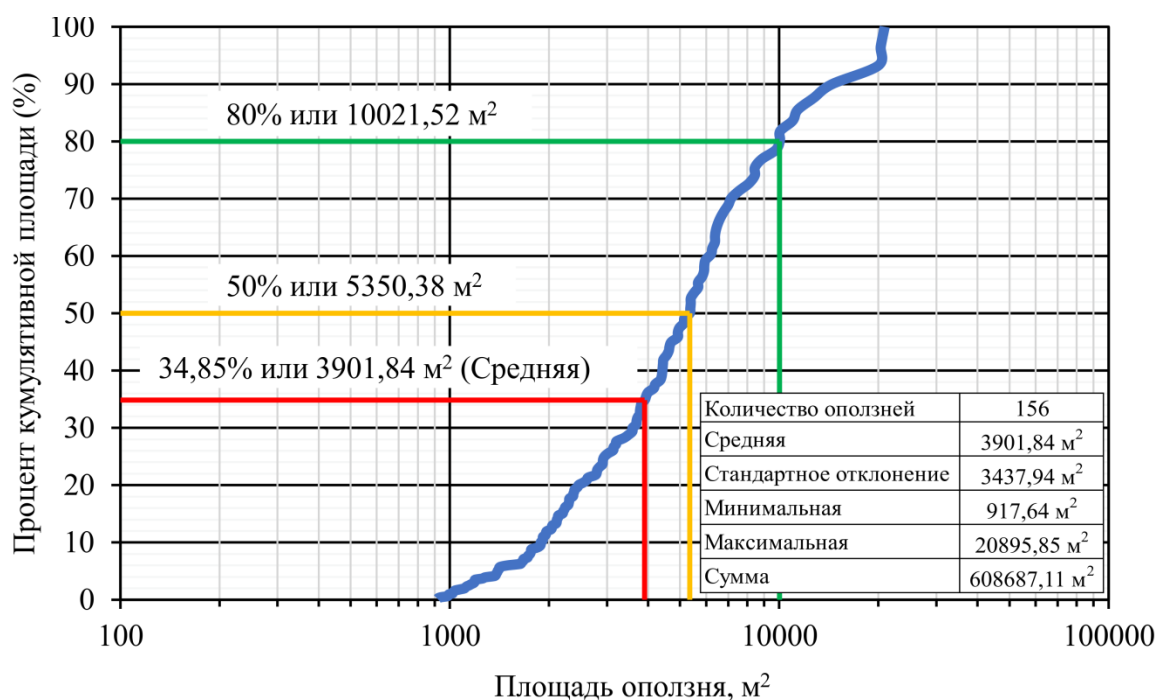


Рис. 3. Статистика оползней в районе исследования

Fig. 3. Landslide statistics in the study area

После создания карта инвентаризации оползней может быть разделена на обучающую выборку и данные для проверки. Обучающая выборка используется для построения модели анализа взаимосвязи между распределением исторических оползней и выбранными факторами оползнеобразования. Данные для проверки используются для оценки достоверности полученной модели предрасположенности территории к развитию оползней.

В данном исследовании карта инвентаризации оползней района Батсат была построена с использованием аэрофотосъемки и результатов полевых работ. В итоге было выявлено в общей сложности 156 оползней. Наименьшая площадь оползня составила 917,64 м², а самый крупный оползень имел размер 20895,85 м².

Несмотря на тот факт, что на итоговой карте инвентаризации оползни отображались в виде точек, указывающих их местоположение (геометрические характеристики оползня не учитывались), выполненный статистический анализ (рис. 3) показал следующее распределение оползней по размерам: 6 оползневых тел имеют площадь менее 1000 м² и суммарно занимают 0,9 % (5748,15 м²) от площади исследования; 112 оползневых тел имеют площадь от 1000 до 5000 м², что составляет 46,5 % (282946,80 м²) от площади исследования; 29 оползневых тел имеют площадь от 5000 до 10000 м², что составляет 31,1 % (189155,35 м²) от площади исследования, и 9 оползневых тел имеют площадь более 10000 м², что составляет 21,5 % (130836,81 м²) от площади исследования. Наибольшее количество оползней зарегистрировано в коммунах: Финнган (35 оползней); Куангким (14 оползней); Бансео (12 оползней).

Для оценки достоверности модели оползневой восприимчивости в районе исследования выявленные в процессе инвентаризации оползни были случайно разделены на две группы: 75 % (117 оползней) использовались для обучающей модели, а 25 % (39 оползней) – для оценки достоверности модели.

Факторы оползнеобразования

Разработка карт оползневой восприимчивости зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и оползневыми факторами. Для каждой территории набор таких факторов может существенно различаться. В качестве «основных» для района Батсат на основе опыта региональных оценок оползневой опасности территории Вьетнама были выбраны следующие девять факторов: высота над уровнем моря, крутизна склонов, экспозиция склонов, расстояние до дорог, расстояние до эрозионной сети, расстояние от разломов, землепользование, количество осадков и тип коры выветривания (рис. 4).

Карта землепользования была подготовлена в рамках специального национального научно-технического проекта (номер гранта ĐТĐL.CN-81/21). Карта количества осадков была подготовлена с использованием данных метеорологических станций в провинции Лаокай.

Для выявления взаимосвязи между факторами и распределением оползней каждый фактор был разделен на классы (Таблица). На пять классов были разделены следующие факторы: высота над уровнем моря, крутизна склонов, расстояние до дорог, расстояние до эрозионной сети, расстояние от разломов и землепользование. Экспозиция склонов была разделена на девять классов, а тип коры выветривания – на четыре класса.

Таблица. Классы факторов оползнеобразования
Table. Landslide causative factor categories

Факторы оползнеобразования Landslide causative factors	Классы Classes
Высота над уровнем моря, м Elevation, m	(1) <500; (2) 500–1000; (3) 1000–1500; (4) 1500–2000; (5) >2000
Крутизна склонов, град. Slope, deg.	(1) 0–10; (2) 10–20; (3) 20–30; (4) 30–40; (5) >40
Экспозиция склона Slope aspect	(1) Плоский/Flat (П); (2) Северный/North (С); (3) Северо-восточный/Northeast (С-В); (4) Восточный/East (В); (5) Юго-восточный/Southeast (Ю-В); (6) Южный/South (Ю); (7) Юго-западный/Southwest (Ю-З); (8) Западный/West (З); (9) Северо-западный/Northwest (С-З)
Расстояние до дорог, м Distance to roads, m	(1) 0–100; (2) 100–200; (3) 200–300; (4) 300–400; (5) >400
Расстояние до эрозионной сети, м Distance to drainage, m	(1) 0–100; (2) 100–200; (3) 200–300; (4) 300–400; (5) >400
Расстояние от разломов, м Distance to faults, m	(1) 0–500; (2) 500–1000; (3) 1000–1500 м; (4) 1500–2000; (5) >2000
Землепользование Land use	(1) Голая земля и скалистые горы Bare land and rock mountain (ГЗ); (2) Естественный лес Natural forest (ЕЛ); (3) Искусственный лес Artificial forest (ИЛ); (4) Сельскохозяйственные угодья Agricultural land (СУ); (5) Городские районы Urban areas (ГР)
Количество осадков, мм Precipitation, mm	(1) 196–240; (2) 240–290; (3) 290–340; (4) 340–390; (5) 390–445
Кора выветривания Weathering crust	(1) Сиалферит/Sialferite (Сф); (2) Сапролит/Saprolite (Са); (3) Сиалит/Sialite (Си); (4) Феросиалит/Ferosialite (Фс)

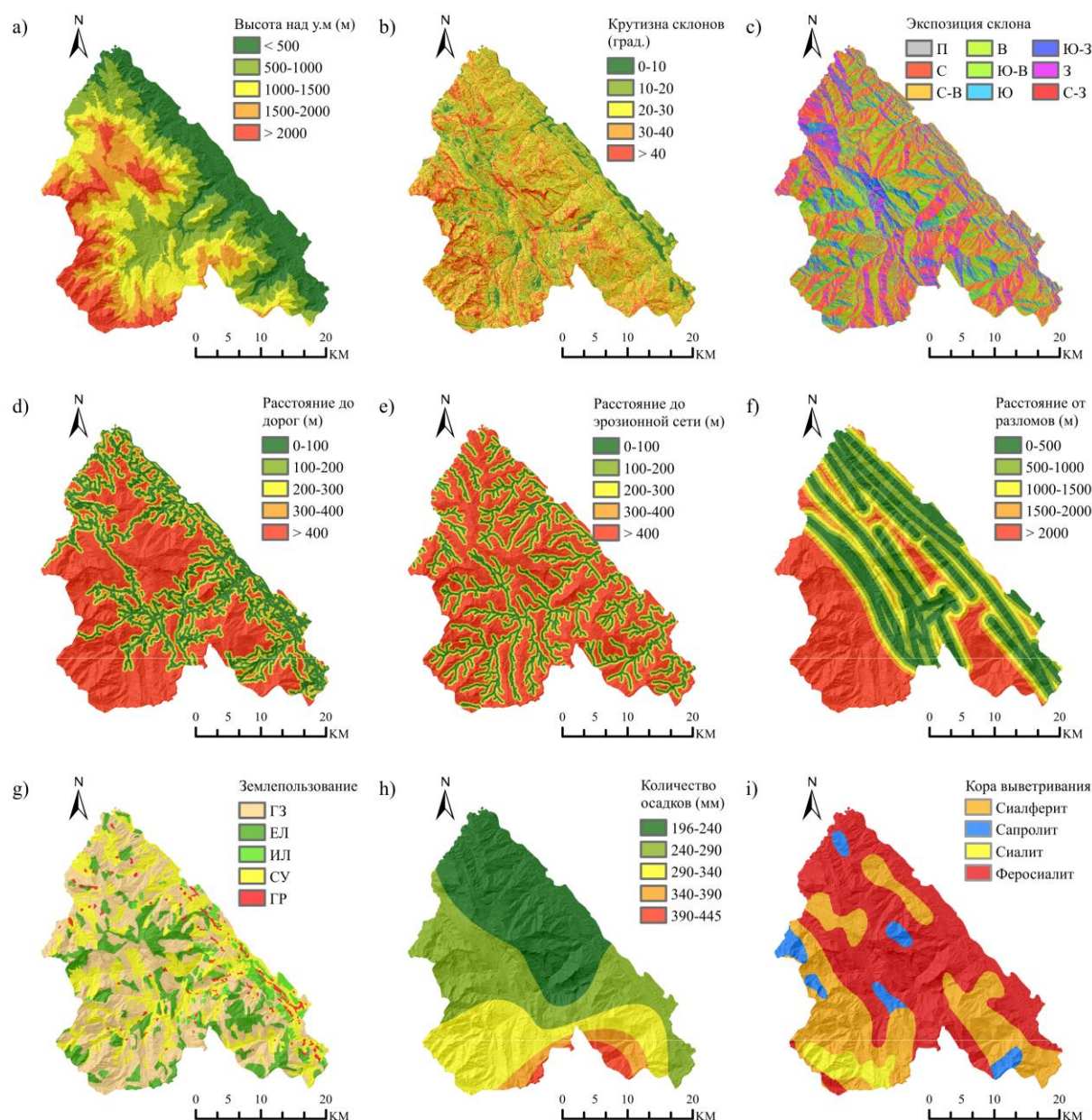


Рис. 4. Карты факторов: а) высота над уровнем моря; б) крутизна склонов; в) экспозиция склонов; д) расстояние до дорог; е) расстояние до эрозионной сети; ф) расстояние от разломов; г) землепользование; х) количество осадков; и) тип коры выветривания.

Fig. 4. Map of factors: a) elevation; b) slope; c) slope aspect; d) distance to roads; e) distance to drainage; f) distance to faults; g) land use; h) precipitation; i) weathering crust

Методы исследования и валидация модели

Метод фактора достоверности (англ. Certainty Factor (CF)), предложенный Е.Х. Шортлиффом в 1975 г. [30], позволяет оценить оползневую восприимчивость путем изучения статистической взаимосвязи между оползневыми факторами и произошедшими оползнями [31–33]. Он основан на байесовской интерпретации условной вероятности, в которой степень доверия к событию основывается на априорных знаниях, таких как результаты предыдущих экспериментов или личное доверие. Байесовский подход позволяет «переставить причину и следствие», т. е. по известному факту события вычислить вероятность того, что оно было вызвано данной причиной. События, отражаю-

щие действие «причин», в данном случае называют гипотезами. Безусловную вероятность справедливости гипотезы называют априорной (изначальная степень уверенности субъекта в её истинности), а условную – с учетом факта произошедшего события – апостериорной (степень уверенности субъекта после получения новых опытных данных). В данном исследовании значения CF, присвоенные классам факторов оползнеобразования, определялись на основе уравнения (1):

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{если } PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & \text{если } PP_s \geq PP_a \end{cases}, \quad (1)$$

где PPa – условная вероятность возникновения оползня в классе фактора (например, класс фактора крутизны склонов от 0 до 10 градусов), определяемая отношением площади оползня к площади класса фактора; PPs – априорная вероятность общего количества оползневых событий в районе исследования, определяемая отношением общей площади произошедших оползней к площади исследования. Значение CF могут изменяться от -1 до $+1$, причем отрицательные значения указывают на низкую вероятность, а положительные – на высокую вероятность активации оползневого процесса в каждом классе факторов. Если значение CF близко к нулю, информации недостаточно, чтобы сделать какие-либо выводы о вероятности возникновения оползня [34, 35]. При использовании модели линейной регрессии, значения CF классов факторов в диапазоне от -1 до $+1$ нормируются к весам классов (NCF), которые могут изменяться от 0 до 1 [33] и определяются на основе уравнения (2):

$$NCF = \frac{CF_i + 1}{1 - (-1)} / \sum_{i=1}^n \frac{CF_i + 1}{1 - (-1)}. \quad (2)$$

Наконец, индекс LSI рассчитывается по следующему уравнению (3):

$$LSI = \sum NCF_i \quad (3)$$

где LSI – индекс оползневой восприимчивости, а NCF_i – значение NCF класса фактора i .

Валидация модели

Важным этапом подготовки карт оползневой восприимчивости является определение степени соответствия полученных моделей реальным фактическим данным (валидация моделей). Эта задача может быть решена путем сравнения полученных карт устойчивости территории с картой инвентаризации оползней. В данном исследовании валидация моделей осуществлялась с использованием метода анализа кривой ошибок ROC (англ. Receiver Operating Characteristic) [36, 37] и фрактального метода [38, 39].

ROC-анализ – это метод оптимального разграничения двух классов, сформированных с помощью диагностического теста. Кривая ROC представляет собой графическое отображение взаимосвязи между вероятностью наличия истинно положительных значений, или чувствительности (правильно предсказанного события), на оси X и ложноположительной вероятностью, или специфичностью (неправильно предсказанным событием), по оси Y. Кривая ROC показывает связь между вероятностью истинно положительных идентифицированных оползней и вероятностью ложно положительных идентифицированных оползней по мере изменения вероятности предельного значения. Чем ближе кривая ROC приближается к левому краю графика и верхней его границе, тем точнее будут результаты анализа. Так как чувствительность стремится к 1, а специфичность стремится к 0, то мерой адекватности модели может служить площадь под кривой ошибок [40] – чем больше площадь, тем точнее классификация. Значение AUC могут изменяться от 0,5 для моделей с нулевой точностью прогнозирования до 1 для моделей с идеальной точностью прогнозирования [37]. Значения AUC были рассчитаны с использованием 75 % оползней

(обучающая выборка) и 25 % (данные для проверки) от общего количества оползней соответственно.

Фрактальный метод, впервые предложенный Бенуа Мандельбротом [38, 39], в последние годы эффективно используется в исследованиях по оползневой восприимчивости территорий [41, 42]. Он может быть охарактеризован как степенной закон, описываемый уравнением (4):

$$p(r) = \frac{C}{r^D}, \text{ или } \ln(p(r)) = -D \ln(r) + \ln C, \quad (4)$$

где r – характеристика измеряемой шкалы; p – измеренное значение по соответствующей шкале; C – постоянное значение; D – фрактальная размерность [43].

В этом исследовании фрактальная размерность использовалась для сравнения достоверности четырех моделей оползневой восприимчивости (CF_{10} , CF_{30} , CF_{40} и CF_{60}) с различным пространственным разрешением ЦМР (10, 30, 40 и 60 м). Оценка проводилась с использованием обучающей выборки и данных для проверки. Модели с большими значениями D будут более точно прогнозировать оползневую восприимчивость в районе исследования. Фрактальный метод включает в себя следующие шаги [44]:

- 1) вычисление относительной плотности оползней (P);
- 2) ранжирование классов в порядке убывания значения P в соответствии со шкалой характеристик r (пространственное разрешение ЦМР);
- 3) построение фрактальной модели путем линейной подгонки данных, нанесенных на двойные логарифмические координаты (S , r), где (r) – характеристика измеряемой шкалы, а (S) – кумулятивная сумма значений P , определяемая на основе уравнения (5):

$$\begin{aligned} \{P\} &= \{P_1, P_2, \dots, P_n\}, \\ \{S_1\} &= \{P_1, P_1 + P_2, \dots, P_1 + P_2 + \dots + P_n\}, \\ \{S_2\} &= \{S_{11}, S_{11} + S_{12}, \dots, S_{11} + S_{12} + \dots + S_{1n}\}. \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (5)$$

В этом исследовании мы использовали коэффициент корреляции линейной подгонки ($R^2 > 0,999$) в качестве критерия для приостановки преобразования кумулятивной суммы.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе моделей CF была проанализирована взаимосвязь между факторами, вызывающими оползни, и фактическим возникновением оползней в районе проводимых исследований с учетом пространственного разрешения ЦМР.

Интерпретация полученных результатов (рис. 5) показала, что в исследуемом районе оползни преимущественно развиваются на сиаферитовом типе коры выветривания. Наибольшую восприимчивостью к оползневому процессу имеют территории с абсолютными отметками менее 500 м над уровнем моря и крутизной склонов до 30 градусов. Наблюдается повышенная концентрация оползней вблизи городских районов, сельскохозяйственных угодий и «голых земель», а также в радиусе 100 м от дорог. Выполненный анализ доказал наличие корреляции между количеством осадков и проявлениями оползневого процесса.

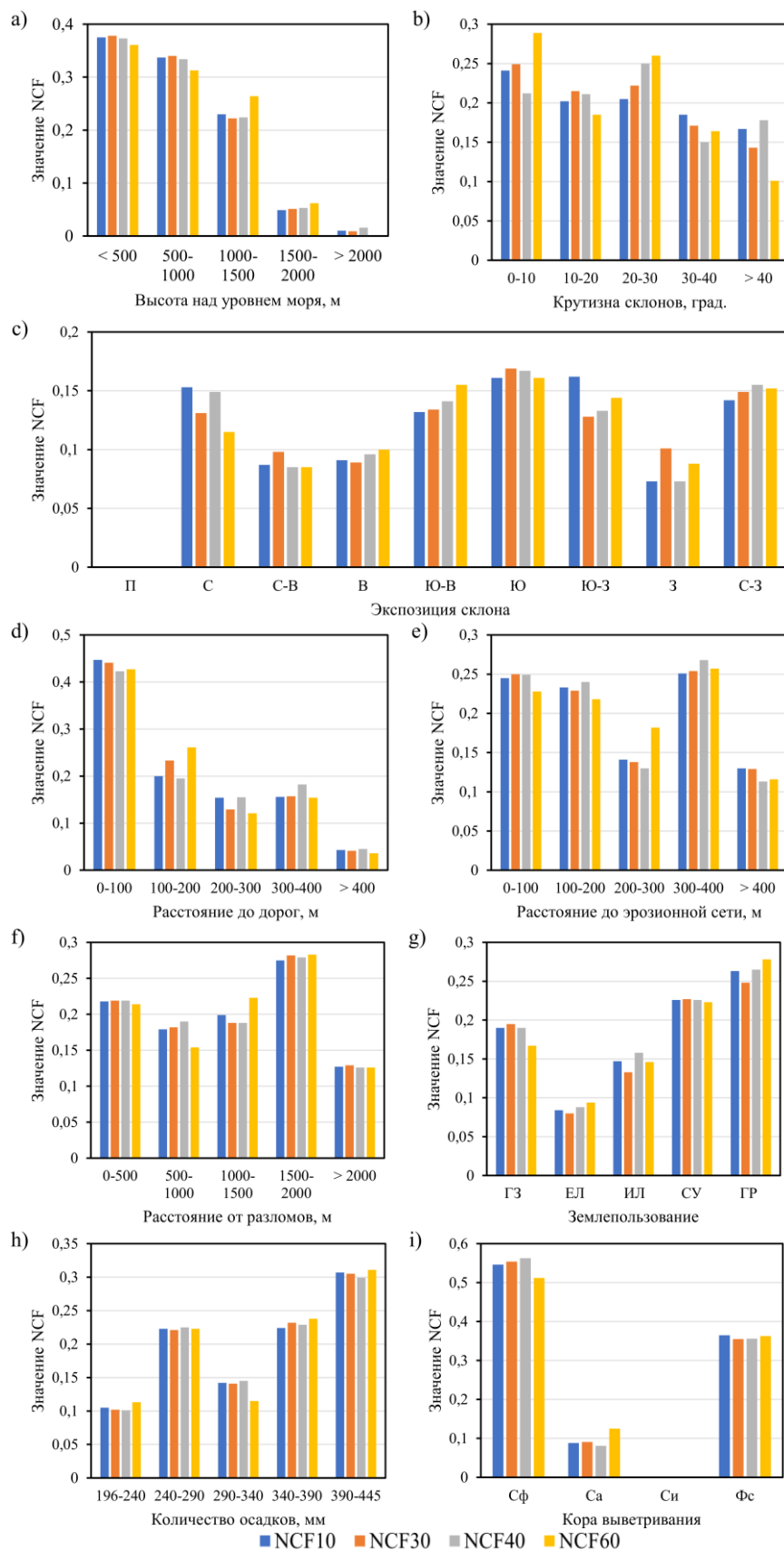


Рис. 5. Статистическая взаимосвязь между историческими оползнями и классами факторов: а) высота над уровнем моря; б) крутизна склонов; в) экспозиция склонов; д) расстояние до дорог; е) расстояние до эрозионной сети; ф) расстояние от разломов; г) землепользование; з) количество осадков; и) тип коры выветривания

Fig. 5. Statistical relationship between historical landslides and classes of factors, including а) elevation; б) slope; в) slope aspect; д) distance to roads; е) distance to drainage; ф) distance to faults; г) land use; з) precipitation; и) weathering crust

При составлении карт индекса оползневой восприимчивости его значения были рассчитаны с использованием уравнения (3). Их анализ позволил установить незначительную зависимость LSI от пространственного разрешения ЦМР: для модели CF10 значения LSI изменяются от 0,776 до 2,777 (рис. 6, а); для модели CF30 значения LSI изменяются от 0,761 до 2,792 (рис. 7, а); для модели CF40 значения LSI изменяются от 0,756 до 2,785 (рис. 8, а); для модели CF60 значения LSI изменяются от 0,673 до 2,762 (рис. 9, а).

При использовании метода классификации естественных границ Дженкса в ArcGIS, на основе карт LSI были созданы карты районирования территории по оползневой восприимчивости (LSZ map) с учетом пространственного разрешения ЦМР 10, 30, 40 и 60 м (рис. 6, б; 7, б; 8, б; 9, б соответственно). В результате

область исследования была разделена на пять зон по оползневой восприимчивости: с очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой восприимчивостью.

Влияние пространственного разрешения ЦМР на размеры зон с различной оползневой восприимчивостью приведено на Рис. 10. Размер зоны со средней оползневой восприимчивостью оценивается всеми моделями (CF10, CF30, CF40 и CF60) практически одинаково. Однако размер зоны с очень высокой оползневой восприимчивостью (порядка 15 % от площади территории), спрогнозированный на основе моделей CF10, CF30, CF40, имеет значимое отличие от размера (18,3 % от площади территории), полученного на основе модели CF60. Таким образом, полученные результаты могут привести к потенциальной переоценке оползневой опасности в исследуемом районе.

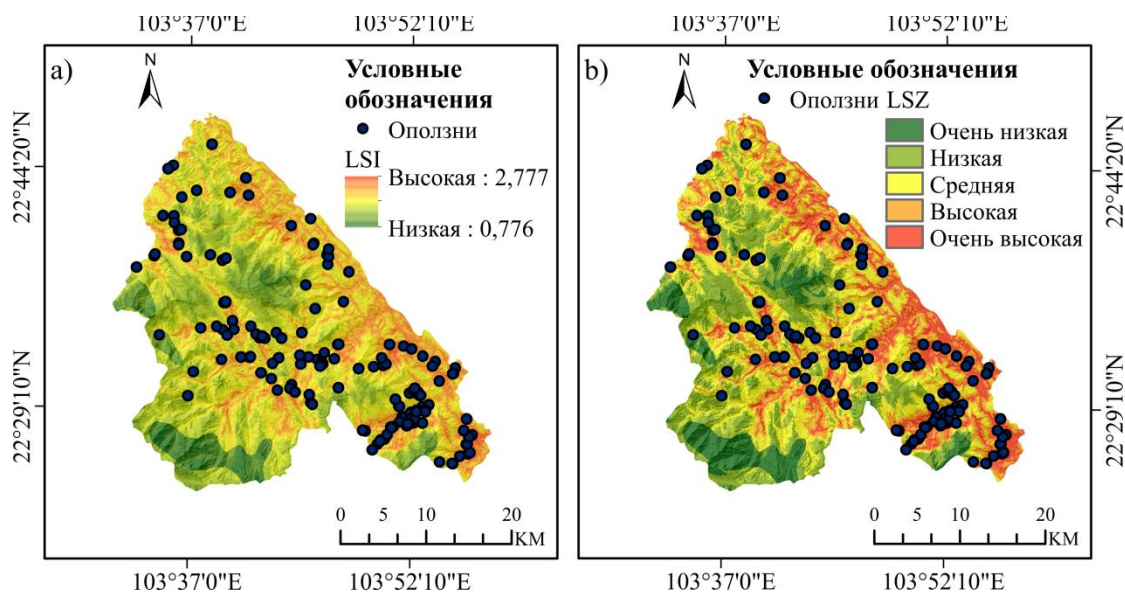


Рис. 6. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования территории по оползневой восприимчивости (б) с применением 10 м ЦМР

Fig. 6. LSI map (a), landslide susceptibility zonation (LSZ) map (b) using 10 m DEM

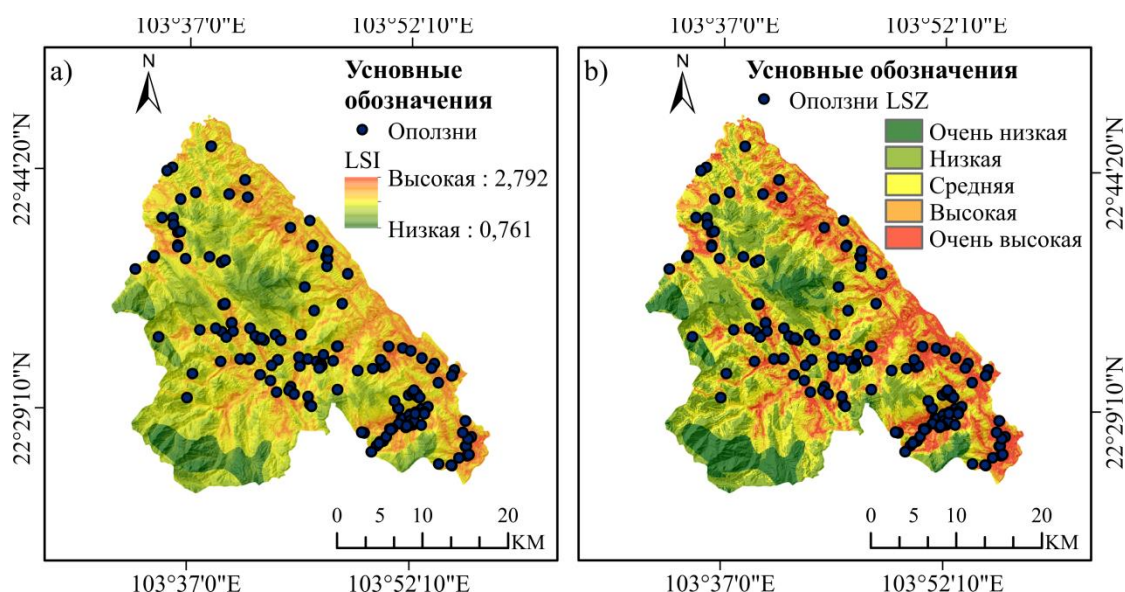


Рис. 7. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования оползневой восприимчивости с применением 30 м ЦМР

Fig. 7. LSI map (a), LSZ map (b) using 30 m DEM

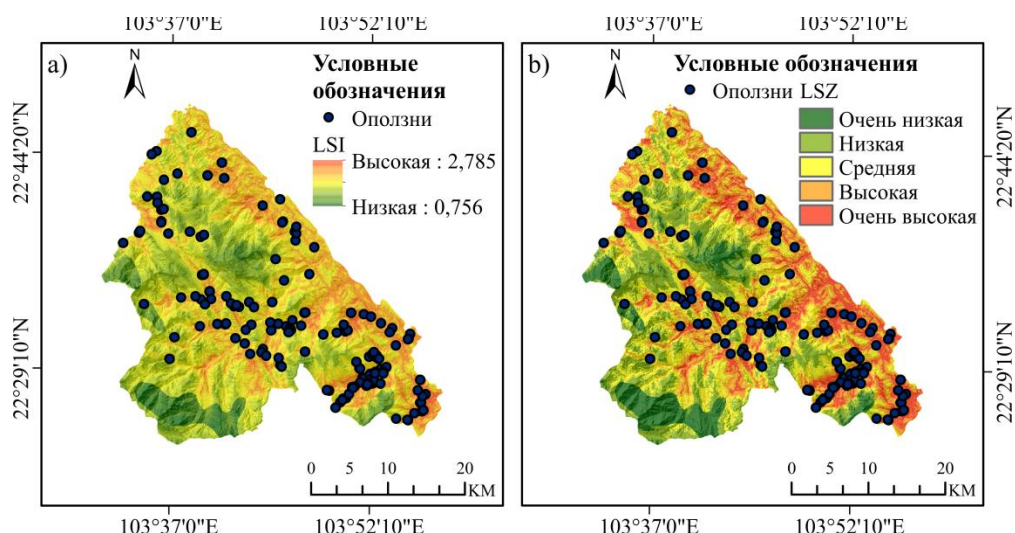


Рис. 8. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования оползневой восприимчивости с применением 40 м ЦМР
Fig. 8. LSI map (a), LSZ map (b) using 40 m DEM

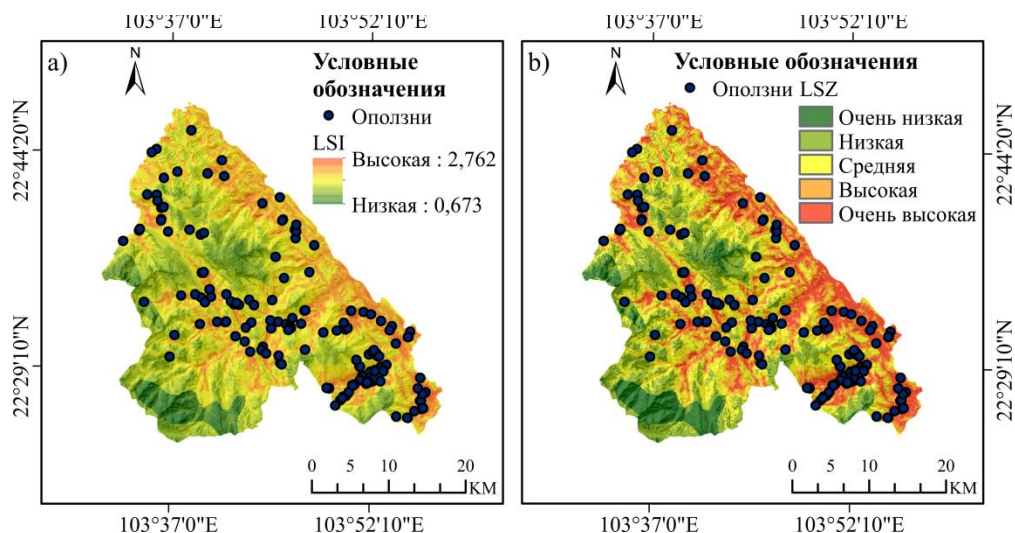


Рис. 9. Карта индекса восприимчивости (а), карта районирования оползневой восприимчивости с применением 60 м ЦМР
Fig. 9. LSI map (a), LSZ map (b) using 60 m DEM

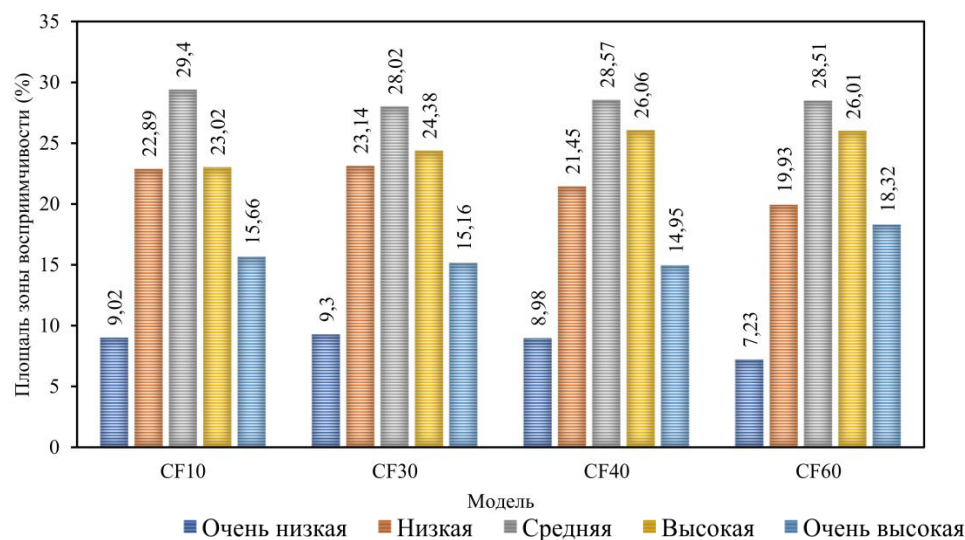


Рис. 10. Размеры зон с различной оползневой восприимчивостью с учетом пространственного разрешения ЦМР 10, 30, 40 и 60 м

Fig. 10. Sizes of zones with varying landslide susceptibility, considering the DEM spatial resolution of 10, 30, 40, and 60 m

Валидация моделей CF10, CF30, CF40 и CF60, полученная на основе ROC анализа (рис. 11), показала их высокую достоверность и точность прогнозирования ($AUC > 70\%$).

Для моделей CF10, CF30 и CF40 практически одинаковая достоверность (для обучающей выборки значение AUC порядка 74%). Максимальное значение AUC – $76,04\%$ – было получено для модели CF60, что доказывает ее наибольшую достоверность (рис. 11, а). Следует отметить, что именно размер пространственного элемента модели CF60 (3600 м^2) сопоставим с площадью наибольшего числа оползней на изучаемой территории (рис. 3).

Аналогичные результаты получены и при оценке точности прогнозирования (рис. 11, б).

Зависимость достоверности моделей и точности прогнозирования от пространственного разрешения моделей показана на рис. 12.

Дополнительно, на основе анализа плотности распределения оползней в выделенных на картах районирования (LSZ) зонах, для моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 была выполнена оценка достоверности и точности прогнозирования с использованием фрактального метода. Полученные модели с целью определения фрактальной размерности D для оценки достоверности (на основе обучающей выборки) приведены на рис. 13, для оценки точности прогнозирования (на основе данных для проверки) – на рис. 14.

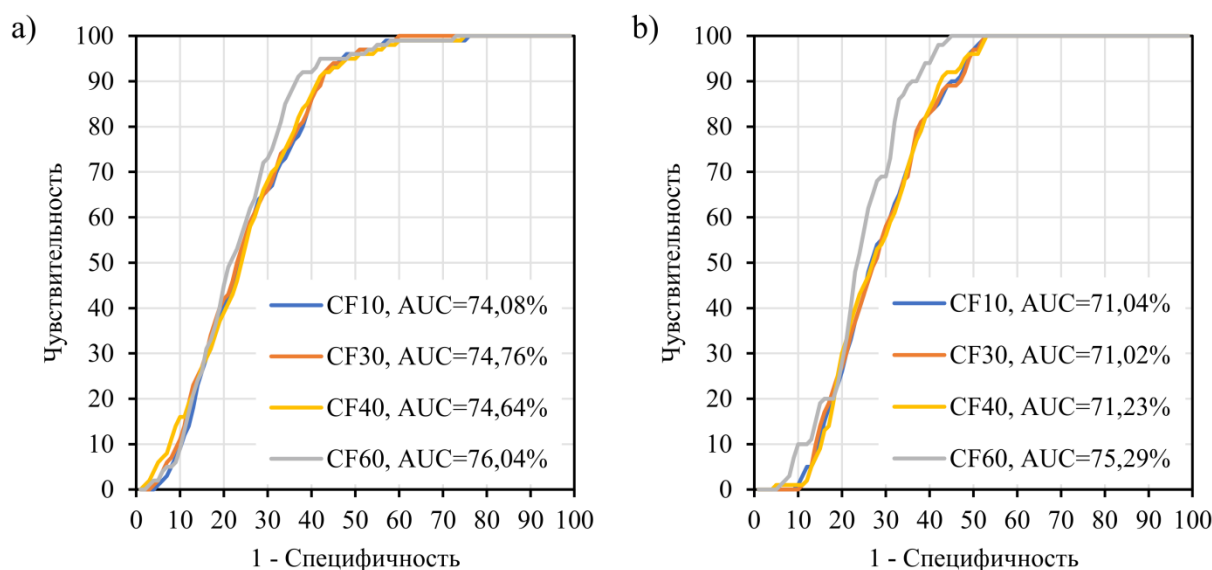


Рис. 11. Результаты валидации моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 на основе ROC анализа: а) оценка достоверности (обучающая выборка); б) оценка точности прогноза (данные для проверки)

Fig. 11. ROC-based validation outcomes for the CF10, CF30, CF40, and CF60 models: а) assessment of accuracy (training data); б) assessment of prediction performance (testing data)

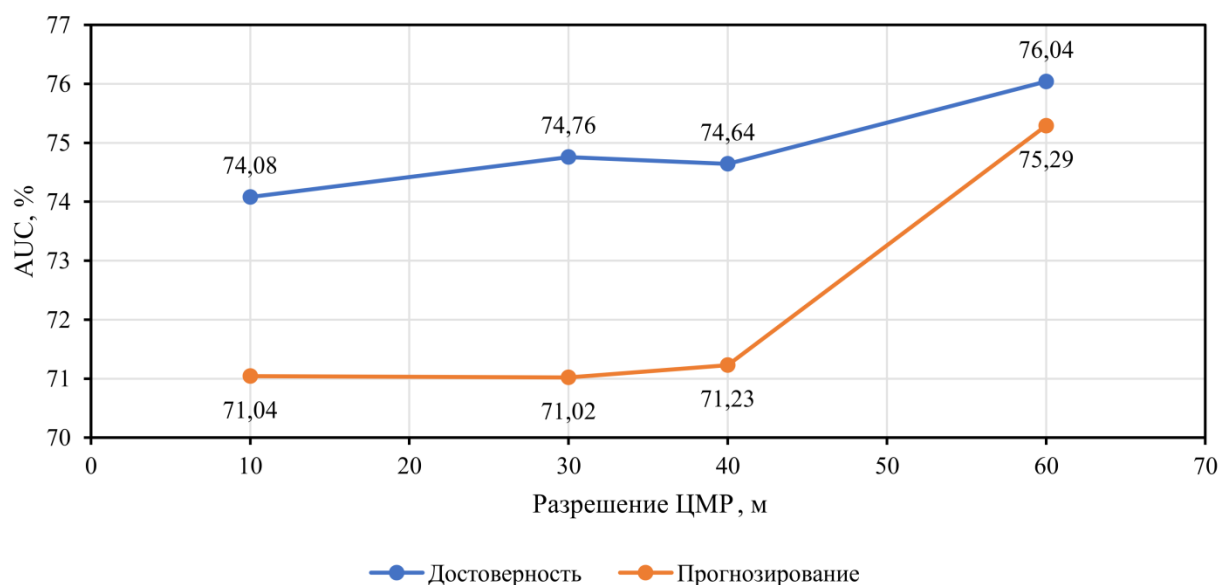


Рис. 12. График зависимости значения AUC от пространственного разрешения ЦМР

Fig. 12. Graph showing the relationship between the AUC value and the DEM spatial resolution

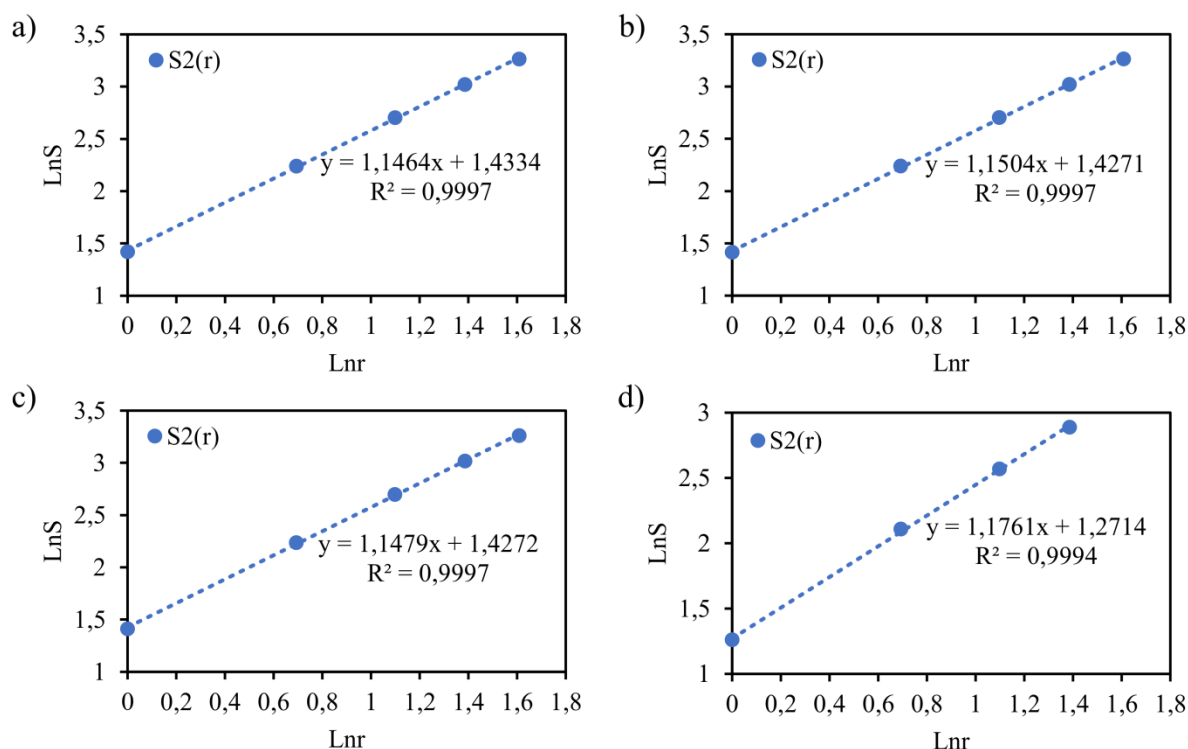


Рис. 13. Анализ фрактальной размерности моделей CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c) и CF60 (d) с использованием обучающей выборки

Fig. 13. Fractal dimension analysis of models CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c), and CF60 (d) using training data

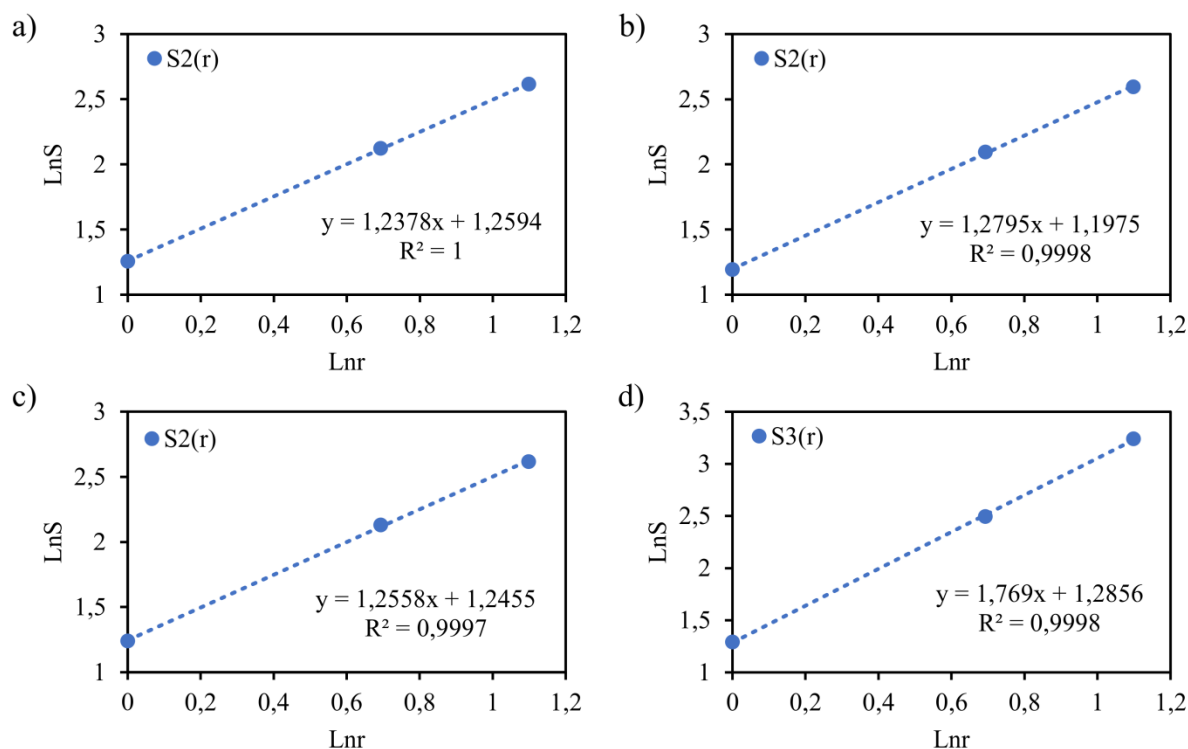


Рис. 14. Анализ фрактальной размерности моделей CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c) и CF60 (d) с использованием данных для проверки

Fig. 14. Fractal dimension analysis of models CF10 (a), CF30 (b), CF40 (c), and CF60 (d) using testing data

При оценке достоверности фрактальные размерности для моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 равны 1,1464, 1,1504, 1,1479 и 1,1761 соответственно, что подтверждает результаты, полученные

на основе ROC анализа, и вывод о том, что модель CF60 является наиболее достоверной при составлении карт оползневой восприимчивости в районе исследований.

При оценке точности прогнозирования фрактальные размерности для моделей CF10, CF30, CF40 и CF60 равны 1,2378, 1,2795, 1,2558 и 1,769 соответственно, что также полностью согласуется с ранее полученными результатами. Графики зависимости

фрактальной размерности D от пространственного разрешения ЦМР приведены на рис. 15.

Полученные результаты позволяют рекомендовать фрактальный метод для валидации моделей по оползневой восприимчивости территорий.

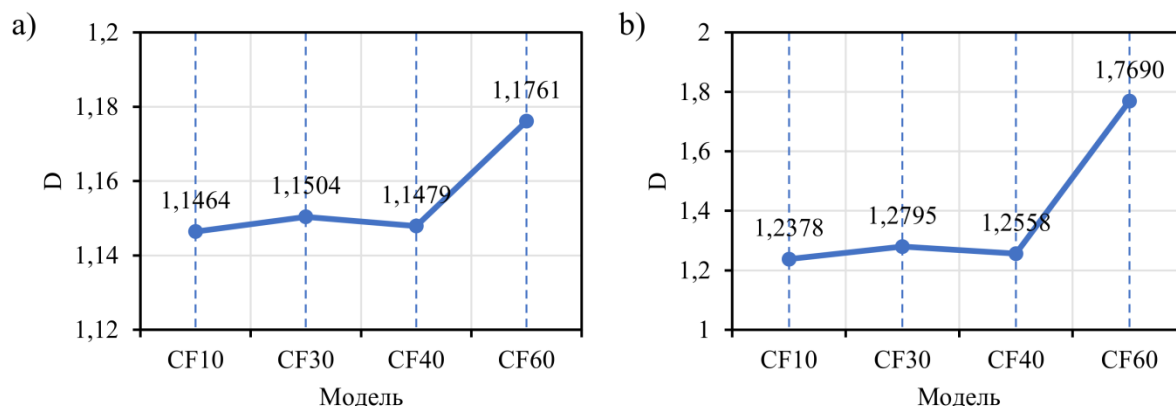


Рис. 15. Результаты расчета значений D для четырех моделей с использованием обучающей выборки (а) и данных для проверки данных (б)

Fig. 15. Calculation results of D values for four models using training (a) and testing data (b)

Заключение

Вывод о том, что использование 60-метровой цифровой модели рельефа обеспечивает наилучшую достоверность и точность прогнозирования при оценке оползневой восприимчивости территории, не является тривиальным. Однако аналогичные результаты были получены и в других исследованиях оползней [23, 45], которые также показали, что использование самого высокого доступного разрешения не всегда приводит к наиболее точной оценке оползневой восприимчивости. Этот интересный результат, вероятно, связан со средним размером оползней в исследуемом районе. Как было сказано ранее, на карте инвентаризации оползней отображались в виде точек, указывающих их местоположение (геометрические характеристики оползня не учитывались). При этом в используемом для оценки оползневой восприимчивости методе фактора достоверности его значения рассчитывались с учетом площади оползней. На Рис. 3 был приведен кумулятивный график распределения оползней по размеру, согласно которому средняя площадь оползней на исследуемой территории равна $3901,84 \text{ м}^2$ (т. е. пиксель оползня составляет около 62,46 м) и на крупные оползни приходится более 65 % общей площади оползней. Таким образом, при использовании 60-метровой цифровой модели рельефа

учитывалось не только местоположение оползней, но и косвенно (так как размер пикселя близок к среднему размеру оползней на исследуемой территории) их размер, что и обеспечило ей наилучшую достоверность и точность прогнозирования.

Выполненное исследование позволяет сформулировать важное заключение: для повышения достоверности карт восприимчивости территории к оползневому процессу, в тех случаях, когда на карте инвентаризации геометрические характеристики оползней не учитываются, необходимо определение оптимального разрешения цифровой модели рельефа, при котором размер пикселя близок к среднему размеру оползней. Иными словами, использование цифровой модели рельефа, в которой размер пространственного элемента сопоставим с геометрическими размерами наиболее часто встречающихся оползней, может обеспечить наибольшую достоверность и точность прогнозирования при оценке оползневой восприимчивости. Проверка этого вывода является дальнейшим направлением проводимых исследований, в т. ч. в регионах с крупномасштабными оползнями.

Исследование было профинансировано Институтом геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий в рамках национального научно-технического проекта под номером гранта ĐТĐL.CN-81/21.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014) / U. Haque, P.F. da Silva, G. Devoli, J. Pilz, B. Zhao, A. Khaloua, W. Wilopo, P. Andersen, P. Lu, J. Lee, T. Yamamoto, D. Keellings, J.-H. Wu, G.E. Glass // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 682. – P. 673–684. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415> (дата обращения 15.01.2023).
2. Froude M.J., Petley D.N. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016 // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2018. – V. 18. – Iss. 8. – P. 2161–2181. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018> (дата обращения 15.01.2023).
3. Kieu L.Q., Ngo G.V. Landslide susceptibility assessment for warning of dangerous areas in Tan Uyen district, Lai Chau province, Vietnam // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. – 2022. – V. 104. – Iss. 3. – P. 183–200. URL: <https://doi.org/10.1080/04353676.2022.2091915> (дата обращения 15.01.2023).
4. Using landslide statistical index technique for landslide susceptibility mapping: Case study: Ban Khoang Commune, Lao Cai Province, Vietnam / L.N. Thanh, Y.-M. Fang, T.-Y. Chou, T.-V. Hoang, Q.D. Nguyen, C.-Y. Lee, C.-L. Wang, H.-Y. Yin, Y.-C. Lin // Water. – 2022. – V. 14. – Iss. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/w14182814> (дата обращения 15.01.2023).

5. Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам / В.Б. Зыонг, И.К. Фоменко, Ч.К. Нгуен, Т.Х.Л. Ви, О.В. Зеркаль, Х.Д. Ву // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 126–140. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473> (дата обращения 15.01.2023).
6. Tam D.M. Flooding and landslides at the highways of Vietnam // Proceedings of the International Workshop on «Saving Our Water and Protecting Our Land». – Hanoi, 2001. – P. 18–27.
7. UNICEF Viet Nam, 2019. Viet Nam child centred risk assessment. Hanoi, Vietnam. URL: <https://www.unicef.org/vietnam/reports/vietnam-child-centred-risk-assessment> (дата обращения 15.01.2023).
8. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization / D. Tien Bui, T.A. Tuan, N.-D. Hoang, N.Q. Thanh, D.B. Nguyen, N. Van Liem, B. Pradhan // Landslides. – 2017. – V. 14. – Iss. 2. – P. 447–458. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9> (дата обращения 15.01.2023).
9. Нгуен Ч.Й. Оценка оползней и селей в некоторых горных районах Вьетнама и рекомендации по мерам борьбы и уменьшения ущерба. Отчёт о НИР. – Ханой: Институт геологии (Вьетнамская академия наук и технологий), 2006. – 134 с. (на вьетнамском языке)
10. ARC, VNRC, ADPC. Manual on Early Warning System in Vietnam. – Hanoi: Vietnam Red Cross, 2011. URL: <https://www.rcrc-resilience-southeastasia.org/document/manual-on-early-warning-system-in-vietnam/> (дата обращения 15.01.2023).
11. Landslide susceptibility modeling using a hybrid bivariate statistical and expert consultation approach in Canada Hill, Sarawak, Malaysia / M.T. Daniel, T.F. Ng, M.F. Abdul Kadir, J.J. Pereira // Frontiers in Earth Science. – 2021. – V. 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.616225> (дата обращения 15.01.2023).
12. Landslide susceptibility mapping with GIS in high mountain area of Nepal: a comparison of four methods / P. Gautam, T. Kubota, L.M. Sapkota, Y. Shinohara // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – Iss. 9. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09650-2> (дата обращения 15.01.2023).
13. Mersha T., Meten M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia // Geoenvironmental Disasters. – 2020. – V. 7. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x> (дата обращения 15.01.2023).
14. Landslide susceptibility research combining qualitative analysis and quantitative evaluation: a case study of Yungang County in Chongqing, China / W. Zhang, S. Liu, L. Wang, P. Samui, M. Chwala, Y. He // Forests. – 2022. – V. 13. – Iss. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/f13071055> (дата обращения 15.01.2023).
15. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review // Geoenvironmental Disasters. – 2020. – V. 7. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0> (дата обращения 15.01.2023).
16. Quantitative assessment of landslide risk based on susceptibility mapping using Random Forest and GeoDetector / Y. Wang, H. Wen, D. Sun, Y. Li // Remote Sensing. – 2021. – V. 13. – Iss. 13. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13132625> (дата обращения 15.01.2023).
17. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 320 с.
18. Gaidzik K., Ramirez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping // Scientific Reports. – 2021. – V. 11. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y> (дата обращения 15.01.2023).
19. A review of statistically-based landslide susceptibility models / P. Reichenbach, M. Rossi, B.D. Malamud, M. Mihir, F. Guzzetti // Earth-Science Reviews. – 2018. – V. 180. – P. 60–91. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001> (дата обращения 15.01.2023).
20. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey / A. Yalcin, S. Reis, A.C. Aydinoglu, T. Yomralioglu // CATENA. – 2011. – V. 85. – Iss. 3. – P. 274–287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014> (дата обращения 15.01.2023).
21. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy / F. Guzzetti, A. Carrara, M. Cardinali, P. Reichenbach // Geomorphology. – 1999. – V. 31. – Iss. 1. – P. 181–216. URL: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1) (дата обращения 15.01.2023).
22. The performance of landslide susceptibility models critically depends on the quality of digital elevation models / J. Brock, P. Schratz, H. Petschko, J. Muenchow, M. Micu, A. Brenning // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – V. 11. – Iss. 1. – P. 1075–1092. URL: <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1776403> (дата обращения 15.01.2023).
23. Wubalem A. The impact of DEM resolution on landslide susceptibility modeling // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – V. 15. – Iss. 10. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10241-z> (дата обращения 15.01.2023).
24. Petrogenesis of Eocene to early Oligocene granitic rocks in Phan Si Pan uplift area, northwestern Vietnam: geochemical implications for the Cenozoic crustal evolution of the South China Block / T.T. Pham, J.G. Shellnutt, T.-A. Tran, H.-Y. Lee // Lithos. – 2020. – V. 372–373. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105640> (дата обращения 15.01.2023).
25. Landslide hazard assessment for Batxat area of Vietnam using GIS-based spatial prediction models / Binh Van Duong, I.K. Fomenko, Ha Viet Nhu, Phuong Huy Nguyen, O.N. Sirotkina, Kien Trung Nguyen, Ha Ngoc Thi Pham // Journal of Mining and Earth Sciences. – 2022. – V. 63. – Iss. 5a. – P. 70–82.
26. Landslide inventory maps: new tools for an old problem / F. Guzzetti, A.C. Mondini, M. Cardinali, F. Fiorucci, M. Santangelo, K.-T. Chang // Earth-Science Reviews. – 2012. – V. 112. – Iss. 1. – P. 42–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001> (дата обращения 15.01.2023).
27. How robust are landslide susceptibility estimates? / U. Ozturk, M. Pittore, R. Behling, S. Roessner, L. Andreani, O. Korup // Landslides. – 2021. – V. 18. – Iss. 2. – P. 681–695. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01485-5> (дата обращения 15.01.2023).
28. Perera E.N.C., Gunaratne A.M.C.T., Samarasinghe S.B.D. Participatory Landslide Inventory (PLI): an online tool for the development of a landslide inventory // Complexity. – 2022. – V. 2022. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/2659203> (дата обращения 15.01.2023).
29. Wubalem A. Landslide inventory, susceptibility, hazard and risk mapping // Landslides / Eds. Y. Zhang, Q. Cheng. – London: IntechOpen, 2021. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100504> (дата обращения 15.01.2023).
30. Shortliffe E.H., Buchanan B.G. A model of inexact reasoning in medicine // Mathematical Biosciences. – 1975. – V. 23. – Iss. 3. – P. 351–379. URL: [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90047-4) (дата обращения 15.01.2023).
31. Zhao Z., Liu Z.Y., Xu C. Slope unit-based landslide susceptibility mapping using Certainty Factor, Support Vector Machine, Random Forest, CF-SVM and CF-RF models // Frontiers in Earth Science. – 2021. – V. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.589630> (дата обращения 15.01.2023).
32. GIS-based assessment of landslide susceptibility using certainty factor and index of entropy models for the Qianyang County of Baoji city, China / Q. Wang, W. Li, W. Chen., H. Bai // Journal of Earth System Science. – 2015. – V. 124. – Iss. 7. – P. 1399–1415. URL: <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0624-3> (дата обращения 15.01.2023).
33. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and analytic hierarchy process / W. Fan, X.-S. Wei, Y.-B. Cao, B. Zheng // Journal of Mountain Science. – 2017. – V. 14. – Iss. 5. – P. 906–925. URL: <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4068-2> (дата обращения 15.01.2023).
34. A comparative analysis of certainty factor-based machine learning methods for collapse and landslide susceptibility mapping in Wenchuan County, China / X. Yuan, C. Liu, R. Nie, Z. Yang, W. Li, X. Dai, J. Cheng, J. Zhang, L. Ma, X. Fu, M. Tang, Y. Xu, H. Lu // Remote Sensing. – 2022. – V. 14. – Iss. 14. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14143259> (дата обращения 15.01.2023).
35. Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata,

- Japan / J. Dou, D. Tien Bui, P.A. Yunus, K. Jia, X. Song, I. Revhaug, H. Xia, Z. Zhu // PLOS ONE. – 2015. – V. 10. – Iss. 7. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262> (дата обращения 15.01.2023).
36. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps / I. Cantarino, M.A. Carrion, F. Goerlich, V. Martinez Ibañez // Landslides. – 2019. – V. 16. – Iss. 2. – P. 265–282. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4> (дата обращения 15.01.2023).
37. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems // Science. – 1988. – V. 240. – Iss. 4857. – P. 1285–1293. URL: <http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615> (дата обращения 15.01.2023).
38. Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension // Science. – 1967. – V. 156. – Iss. 3775. – P. 636–638. URL: <http://www.jstor.org/stable/1721427> (дата обращения 15.01.2023).
39. Mandelbrot B.B. Fractal analysis and synthesis of fracture surface roughness and related forms of complexity and disorder // International Journal of Fracture. – 2006. – V. 138. – Iss. 1. – P. 13–17. URL: <https://doi.org/10.1007/s10704-006-0037-z> (дата обращения 15.01.2023).
40. Zhang Y., Yan Q. Landslide susceptibility prediction based on high-trust non-landslide point selection // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2022. – V. 11. – Iss. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi11070398> (дата обращения 15.01.2023).
41. Kornejady A., Pourghasemi H.R. Producing a Spatially focused landslide susceptibility map using an ensemble of Shannon's entropy and fractal dimension (case study: Ziarat Watershed, Iran) // Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences / Eds. H.R. Pourghasemi, C. Gokceoglu. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – P. 689–732. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00032-6> (дата обращения 15.01.2023).
42. Assessment of landslide susceptibility using integrated ensemble fractal dimension with kernel logistic regression model / T. Zhang, L. Han, J. Han, X. Li, H. Zhang, H. Wang // Entropy. – 2019. – V. 21. – Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/e21020218> (дата обращения 15.01.2023).
43. Fractal-based spatial distribution analysis of geological hazards and measurement of spatial association with hazard-related predisposing factors / Q. Hu, Y. Zhou, S.X. Wang, F.T. Wang, H.J. Wang // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2020. – V. XLII-3/W10. – P. 125–131. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-125-2020> (дата обращения 15.01.2023).
44. Machine learning and fractal theory models for landslide susceptibility mapping: Case study from the Jinsha River Basin / Q. Hu, Y. Zhou, S. Wang, F. Wang // Geomorphology. – 2020. – V. 351. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106975> (дата обращения 15.01.2023).
45. The influence of DEM spatial resolution on landslide susceptibility mapping in the Baxie River basin, NW China / Z. Chen, F. Ye, W. Fu, Y. Ke, H. Hong // Natural Hazards. – 2020. – V. 101. – Iss. 3. – P. 853–877. URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03899-9> (дата обращения 15.01.2023).

Поступила: 20.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 06.02.2023 г.

Информация об авторах

Зыонг В.Б., преподаватель кафедры инженерной геологии факультета наук о Земле и геологической инженерии Ханойского горно-геологического университета; аспирант кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Фоменко И.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Та Д.Т., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инфраструктурного строительства факультета гражданского строительства Ханойского горно-геологического университета; председатель Вьетнамской ассоциации инженерной геологии и окружающей среды.

Нгуен Ч.К., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела развития технологий и экологической инженерии Института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

Зеркаль О.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Горобцов Д.Н., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

Ву Х.Д., научный сотрудник отдела гидрогеологии и инженерной геологии Вьетнамского института геонаук и минеральных ресурсов.

UDC 551.435.627

INFLUENCE OF DIGITAL ELEVATION MODEL RESOLUTION ON MAPPING TERRITORY SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDE DEVELOPMENT

Van B. Duong^{1,2},
duongvanbinh@humg.edu.vn

Igor K. Fomenko²,
ifolga@gmail.com

Duc T. Ta^{1,3},
taducthinh@humg.edu.vn

Trung K. Nguyen⁴,
kien.mgri@gmail.com

Oleg V. Zerkal⁵,
igzov@mail.ru

Denis N. Gorobtsov²,
dngorobtsov@mail.ru

Hong D. Vu⁶,
hongdangbg@gmail.com

¹ Hanoi University of Mining and Geology,
18, Vien street, Hanoi, 100000, Vietnam.

² Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University,
23, Miklukho-Maklay street, 117997, Moscow, Russia.

³ Vietnam Association of Engineering Geology and Environment,
91, Phung Hung street, Hanoi, 100000, Vietnam.

⁴ Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology,
84, Chua Lang street, Hanoi, 100000, Vietnam.

⁵ Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia.

⁶ Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources,
67, Chien Thang street, Hanoi, 100000, Vietnam.

The relevance. Landslides are one of the most hazardous natural disasters in the world. In Vietnam, landslides frequently caused considerable losses of life and property. The systematic evaluation of landslide hazards is a crucial component of Vietnam's disaster prevention strategy.

The main aim of this study is to assess the landslide susceptibility of the Batxat district, Laocai province (Vietnam), using four digital elevation model resolutions (10, 30, 40, and 60 m) and nine landslide causative factors: slope aspect, elevation, slope, distance to roads, distance to faults, distance to drainage, average monthly precipitation, land use, and weathering crust.

Object of the study is the landslide susceptibility in Batxat district, Laocai province, Vietnam.

The quality of the available input data plays an important role in the reliability of the results of modeling the susceptibility of territories to the landslide process. Maps of slope aspect, slope, horizontal and relative relief, etc. are prepared based on information about the terrain, which is one of the most important parameters for conducting the analysis. The quality of a digital elevation model can be assessed based on its spatial resolution.

Methods: Certainty Factor method, fractal method.

Results. The performed analyses indicated a statistically significant relationship between the distribution of landslides and the landslide causative factors in the study area. As a result, the territory was divided into five zones according to its susceptibility to the landslide process: very low, low, moderate, high, and very high. The very low landslide susceptibility zone is less than 10 % of the study area, while the very high susceptibility zone varies from 14,95 to 18,32 %, depending on the digital elevation model spatial resolution. Analysis of the Receiver Operating Characteristics curve revealed that all models, independent of digital elevation model resolution, have good prediction efficiency, with the area under the receiver operating characteristic curve over 70 %. In addition, the Receiver operating characteristic and fractal analysis results indicated that the model with a digital elevation model spatial resolution of 60 m has the highest accuracy. This significant conclusion may be explained by the fact that the accuracy of the landslide susceptibility assessment result is dependent not only on the digital elevation model resolution but also on the ratio of the digital elevation model resolution and the average area of landslides in the study area. This conclusion proves that it is necessary to depict landslide locations and their detailed morphological characteristics on the landslide inventory maps.

Key words:

Landslide susceptibility of the territory, digital elevation model resolution, certainty factor method, fractal method, GIS, area under the receiver operating characteristic curve, Batxat, Vietnam.

This study was supported by the Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, as part of the national science and technology project under grant number ĐTĐL.CN-81/21.

REFERENCES

1. Haque U., Da Silva P.F., Devoli G., Pilz J., Zhao B., Khaloua A., Wilopo W., Andersen P., Lu P., Lee J., Yamamoto T., Keellings D., Wu J.-H., Glass G.E. The human cost of global warming: deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 682, pp. 673–684. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415> (accessed 15 January 2023).
2. Froude M.J., Petley D.N. Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, vol. 18, Iss. 8, pp. 2161–2181. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018> (accessed 15 January 2023).
3. Kieu L.Q., Ngo G.V. Landslide susceptibility assessment for warning of dangerous areas in Tan Uyen district, Lai Chau province, Vietnam. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2022, vol. 104, Iss. 3, pp. 183–200. Available at: <https://doi.org/10.1080/04353676.2022.2091915> (accessed 15 January 2023).
4. Thanh L.N., Fang Y.-M., Chou T.-Y., Hoang T.-V., Nguyen Q.D., Lee C.-Y., Wang C.-L., Yin H.-Y., Lin Y.-C. Using landslide statistical index technique for landslide susceptibility mapping: case study: Ban Khoang Commune, Lao Cai Province, Vietnam. *Water*, 2022, vol. 14, Iss. 18. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14182814> (accessed 15 January 2023).
5. Binh Van Duong, Fomenko I.K., Kien Trung Nguyen. Application of GIS-based bivariate statistical methods for landslide potential assessment in Sapa, Vietnam. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 126–140. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473> (accessed 15 January 2023).
6. Tam DM. Flooding and landslides at the highways of Vietnam. *Proceedings of the International Workshop on «Saving Our Water and Protecting Our Land»*, Hanoi, 2001, pp. 18–27.
7. UNICEF Viet Nam. *Viet Nam child centred risk assessment*. Hanoi, Vietnam, 2019. Available at: <https://www.unicef.org/vietnam/reports/viet-nam-child-centred-risk-assessment> (accessed 15 January 2023).
8. Tien Bui D., Tuan T.A., Hoang N.-D., Thanh N.Q., Nguyen D.B., Van Liem N., Pradhan B. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization. *Landslides*, 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 447–458. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9> (accessed 15 January 2023).
9. Nguyen T.Y. Assessment of landslides and mudslides in mountainous areas of Vietnam and recommendations on control measures and damage reduction. Research report. Hanoi, Institute of Geology (Vietnam Academy of Sciences and Technology), 2006. 134 p. In Vietnamese.
10. ARC, VNRC, ADPC. *Manual on Early Warning System in Vietnam*. Hanoi, Vietnam Red Cross, 2011. Available at: <https://www.rccr-resilience-southeastasia.org/document/manual-on-early-warning-system-in-vietnam/> (accessed 15 January 2023).
11. Daniel M.T., Ng T.F., Abdul Kadir M.F., Pereira J.J. Landslide susceptibility modeling using a hybrid bivariate statistical and expert consultation approach in Canada Hill, Sarawak, Malaysia. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.616225> (accessed 15 January 2023).
12. Gautam P., Kubota T., Sapkota L.M., Shinohara Y. Landslide susceptibility mapping with GIS in high mountain area of Nepal: a comparison of four methods. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, Iss. 9. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09650-2> (accessed 15 January 2023).
13. Mersha T., Meten M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, vol. 7, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x> (accessed 15 January 2023).
14. Zhang W., Liu S., Wang L., Samui P., Chwala M., He Y. Landslide susceptibility research combining qualitative analysis and quantitative evaluation: a case study of Yunyang County in Chongqing, China. *Forests*, 2022, vol. 13, Iss. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/f13071055> (accessed 15 January 2023).
15. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, vol. 7, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0> (accessed 15 January 2023).
16. Wang Y., Wen H., Sun D., Li Y. Quantitative assessment of landslide risk based on susceptibility mapping using Random Forest and GeoDetector. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, Iss. 13. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs13132625> (accessed 15 January 2023).
17. Pendin V.V., Fomenko I.K. *Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti* [Methodology of landslide hazard assessment and prediction]. Moscow, LENAND Publ., 2015. 320 p.
18. Gaidzik K., Ramirez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y> (accessed 15 January 2023).
19. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 180, pp. 60–91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001> (accessed 15 January 2023).
20. Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A.C., Yomralioglu T. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *CATENA*, 2011, vol. 85, Iss. 3, pp. 274–287. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014> (accessed 15 January 2023).
21. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 1999, vol. 31, Iss. 1, pp. 181–216. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1) (accessed 15 January 2023).
22. Brock J., Schratz P., Petschko H., Muenchow J., Micu M., Brenning A. The performance of landslide susceptibility models critically depends on the quality of digital elevation models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, Iss. 1, pp. 1075–1092. Available at: <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1776403> (accessed 15 January 2023).
23. Wubalem A. The impact of DEM resolution on landslide susceptibility modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, Iss. 10. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10241-z> (accessed 15 January 2023).
24. Pham T.T., Shellenutt J.G., Tran T.-A., Lee H.-Y. Petrogenesis of Eocene to early Oligocene granitic rocks in Phan Si Pan uplift area, northwestern Vietnam: Geochemical implications for the Cenozoic crustal evolution of the South China Block. *Lithos*, 2020, vol. 372–373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105640> (accessed 15 January 2023).
25. Binh Van Duong, Fomenko I.K., Ha Viet Nhu, Phuong Huy Nguyen, Sirotkina O.N., Kien Trung Nguyen, Ha Ngoc Thi Pham. Landslide hazard assessment for Batxat area of Vietnam using GIS-based spatial prediction models. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 2022, vol. 63, Iss. 5a, pp. 70–82.
26. Guzzetti F., Mondini A.C., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.-T. Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 2012, vol. 112, Iss. 1, pp. 42–66. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001> (accessed 15 January 2023).
27. Ozturk U., Pittore M., Behling R., Roessner S., Andreani L., Korup O. How robust are landslide susceptibility estimates? *Landslides*, 2021, vol. 18, Iss. 2, pp. 681–695. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01485-5> (accessed 15 January 2023).
28. Perera E.N.C., Gunaratne A.M.C.T., Samarasinghe S.B.D. Participatory Landslide Inventory (PLI): an online tool for the development of a landslide inventory. *Complexity*, 2022, vol. 2022. Available at: <https://doi.org/10.1155/2022/2659203> (accessed 15 January 2023).
29. Wubalem A. Landslide inventory, susceptibility, hazard and risk mapping. *Landslides*. Eds. Y. Zhang, Q. Cheng. London, IntechOpen, 2021. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100504> (accessed 15 January 2023).

30. Shortliffe E.H., Buchanan B.G. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, 1975, vol. 23, Iss. 3, pp. 351–379. Available at: [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90047-4) (accessed 15 January 2023).
31. Zhao Z., Liu Z.Y., Xu C. Slope unit-based landslide susceptibility mapping using Certainty Factor, Support Vector Machine, Random Forest, CF-SVM and CF-RF models. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.589630> (accessed 15 January 2023).
32. Wang Q., Li W., Chen W., Bai H. GIS-based assessment of landslide susceptibility using certainty factor and index of entropy models for the Qianyang County of Baoji city, China. *Journal of Earth System Science*, 2015, vol. 124, Iss. 7, pp. 1399–1415. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0624-3> (accessed 15 January 2023).
33. Fan W., Wei X.-S., Cao Y.-B., Zheng B. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and analytic hierarchy process. *Journal of Mountain Science*, 2017, vol. 14, Iss. 5, pp. 906–925. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4068-2> (accessed 15 January 2023).
34. Yuan X., Liu C., Nie R., Yang Z., Li W., Dai X., Cheng J., Zhang J., Ma L., Fu X., Tang M., Xu Y., Lu H. A comparative analysis of certainty factor-based machine learning methods for collapse and landslide susceptibility mapping in Wenchuan County, China. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, Iss. 14. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs14143259> (accessed 15 January 2023).
35. Dou J., Tien Bui D., Yunus P.A., Jia K., Song X., Revhaug I., Xia H., Zhu Z. Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata, Japan. *PLOS ONE*, 2015, vol. 10, Iss. 7. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133262> (accessed 15 January 2023).
36. Cantarino I., Carrion M.A., Goerlich F., Martinez Ibañez V. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 265–282. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4> (accessed 15 January 2023).
37. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, vol. 240, Iss. 4857, pp. 1285–1293. Available at: <http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615> (accessed 15 January 2023).
38. Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, vol. 156, Iss. 3775, pp. 636–638. Available at: <http://www.jstor.org/stable/1721427> (accessed 15 January 2023).
39. Mandelbrot B.B. Fractal analysis and synthesis of fracture surface roughness and related forms of complexity and disorder. *International Journal of Fracture*, 2006, vol. 138, Iss. 1, pp. 13–17. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10704-006-0037-z> (accessed 15 January 2023).
40. Zhang Y., Yan Q. Landslide susceptibility prediction based on high-trust non-landslide point selection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, vol. 11, Iss. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijgi11070398> (accessed 15 January 2023).
41. Kornejady A., Pourghasemi H.R. Producing a spatially focused landslide susceptibility map using an ensemble of Shannon's entropy and fractal dimension (case study: Ziarat Watershed, Iran). *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. Eds. H.R. Pourghasemi, C. Gokceoglu. Amsterdam, Elsevier, 2019. pp. 689–732. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00032-6> (accessed 15 January 2023).
42. Zhang T., Han L., Han J., Li X., Zhang H., Wang H. Assessment of landslide susceptibility using integrated ensemble fractal dimension with kernel logistic regression model. *Entropy*, 2019, vol. 21, Iss. 2. Available at: <https://doi.org/10.3390/e21020218> (accessed 15 January 2023).
43. Hu Q., Zhou Y., Wang S.X., Wang F.T., Wang H.J. Fractal-based spatial distribution analysis of geological hazards and measurement of spatial association with hazard-related predisposing factors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2020, vol. XLII-3/W10, pp. 125–131. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-125-2020> (accessed 15 January 2023).
44. Hu Q., Zhou Y., Wang S., Wang F. Machine learning and fractal theory models for landslide susceptibility mapping: case study from the Jinsha River Basin. *Geomorphology*, 2020, vol. 351. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106975> (accessed 15 January 2023).
45. Chen Z., Ye F., Fu W., Ke Y., Hong H. The influence of DEM spatial resolution on landslide susceptibility mapping in the Baxie River basin, NW China. *Natural Hazards*, 2020, vol. 101, Iss. 3, pp. 853–877. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03899-9> (accessed 15 January 2023).

Received: 20 January 2023.
Reviewed: 6 February 2023.

Information about the authors

Van B. Duong, lecturer, Hanoi University of Mining and Geology; postgraduate student, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Igor K. Fomenko, Dr. Sc., professor, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Duc T. Ta, Cand. Sc., associate professor, Hanoi University of Mining and Geology; president, Vietnam Association of Engineering Geology and Environment.

Trung K. Nguyen, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology.

Oleg V. Zerkal, Cand. Sc., leading researcher, Lomonosov Moscow State University.

Denis N. Gorobtsov, Cand. Sc., head of the Department of Engineering Geology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University.

Hong D. Vu, research scientist, Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resource.

УДК 510.644.4

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ УЧАСТКОВ НЕДР НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Дадыкин Валерий Сергеевич¹,
dadykin88@bk.ru

Дадыкина Ольга Викторовна¹,
atamanova_281287@mail.ru

Язвенко Николай Александрович¹,
nikolayyazvenko@mail.ru

¹ Брянский государственный технический университет,
Россия, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7.

Актуальность исследования заключается в необходимости обеспечения потенциальных инвесторов и органов власти результатами интегральной экспертной оценки перспективности участков недр на основе онтологической модели и нечеткой логики для повышения экономической эффективности проведения поисковых работ по выявлению прогнозных ресурсов и геологических запасов. Предметом исследования служат методические подходы к интегральной экспертной оценке перспективности участков недр и подходы к ее практической реализации.

Целью исследования является разработка методики интегральной экспертной оценки перспективности участков недр на основе онтологической модели и нечеткой логики.

Объекты: участки недр, перспективные для геологического изучения, преимущественно по твердым полезным ископаемым.

Методы. Теоретическая и методологическая основа исследования базируется на методах системного анализа и онтологического моделирования, использовании методов нечеткой логики.

Результаты. Разработана атомарная онтологическая модель, содержащая показатели интегральной экспертной оценки перспективности участков недр для потенциальных инвесторов в части формализации процесса принятия решений в условиях снижения неопределённости группы количественных критериев и «смягчения точности» качественных критериев; разработана методика интегральной экспертной оценки перспективности участков недр на основе онтологической модели и нечеткой логики. Разработанная методика интегральной экспертной оценки перспективности участков недр проходит апробацию в Брянском филиале Федерального бюджетного учреждения «Территориальный фонд геологической информации по Центральному федеральному округу» (г. Брянск) на материалах, собранных по Центральному федеральному округу, и может быть использована как система поддержки принятия решений в части недропользования, потенциальными инвесторами, государственным заказчиком при программно-целевом планировании геологоразведочных работ.

Ключевые слова:

онтологическая модель, нечеткая логика, экспертная оценка, планирование поисковых работ, атомарная модель, дефазификация, метод Мамдани.

Введение

В настоящее время в условиях региональной экономики минерального сырья сложилась ситуация крайне неравномерного освоения минерально-сырьевой базы. Так, например, в отдельных регионах доля месторождений нераспределенного фонда недр составляет более 80 % [1]. Такое высокое значение не вовлечённых в разработку объектов является примером нерационального использования минерально-сырьевой базы и со временем приводит к утрате перспективной возможности освоения данных объектов: в связи с переводом фонда недр, содержащего полезные ископаемые, в другие категории землепользования; в связи с ухудшением кондиционных свойств минерального сырья.

По ряду перспективных объектов разработка недр не ведется в связи с отсутствием достоверной и актуальной информации о текущем состоянии объектов, понятной потенциальным инвесторам.

При принятии решения об инвестировании в объекты недропользования необходимо учитывать критерии сравнительной оценки масштабности месторожде-

ния, природного качества руд и потребительские свойства сырья, горно-геологические условия разработки, транспортно-экономические условия, инвестиционный потенциал и социально-экономическую обстановку, физико-географические условия [2].

Кроме системы оценок месторождений, автоматизированная система также должна содержать компоненты, позволяющие сформулировать требования к месторождениям в виде перечня с качественной или количественной оценкой по каждой позиции [3, 4]. Сравнение оценки по требованиям с оценкой, данной месторождению группой экспертов, позволит выявить рассогласование между ними и вынести решение по мероприятиям, направленным на снижение этой разницы. Например, проведение дополнительных геологоразведочных работ для уточнения отдельных характеристик потенциального объекта недропользования.

Литературный обзор

При проведении экспертной оценки перспективности участков недр необходимо пояснить, что оценка выполняется на стадии уточнения перспективности

дальнейшего изучения прогнозных ресурсов [5]. Именно на данной стадии необходимо установить, следует ли вкладывать средства, как правило, бюджетные, в более детальное изучение, в том числе в геологоразведочные работы, бурение скважин и т. д. [6]. На данной стадии эксперту приходится опираться в основном на смежные геологические отчеты, искать аналогии объектов на относительно изученных территориях со сходными геологическими условиями образования полезных ископаемых. Поэтому параметры экспертной оценки необходимо дополнить терминами естественного языка, что более понятно при сопоставлении нескольких объектов недр. Например, по сложности геологического строения выделяют А – простые, Б – средней сложности, В – сложные и весьма сложные объекты. Теория нечетких

множеств, правила импликации и нечетких рассуждений образуют систему нечеткого вывода [7].

Наиболее известными моделями нечеткого вывода в настоящее время являются модели Мамдани, Сугено, Ларсена и Цукамото [8]. Применительно к данной работе, в которой ставится задача получения итоговой оценки участка недр, каждый из вышеназванных подходов имеет свои особенности относительно объекта исследования [9–11].

Наиболее предпочтительной в данном случае является модель Мамдани.

Проектирование онтологической модели

В данной работе онтологический подход предполагает создание базы знаний, которая основана на понятии триады (рис. 1) [12].

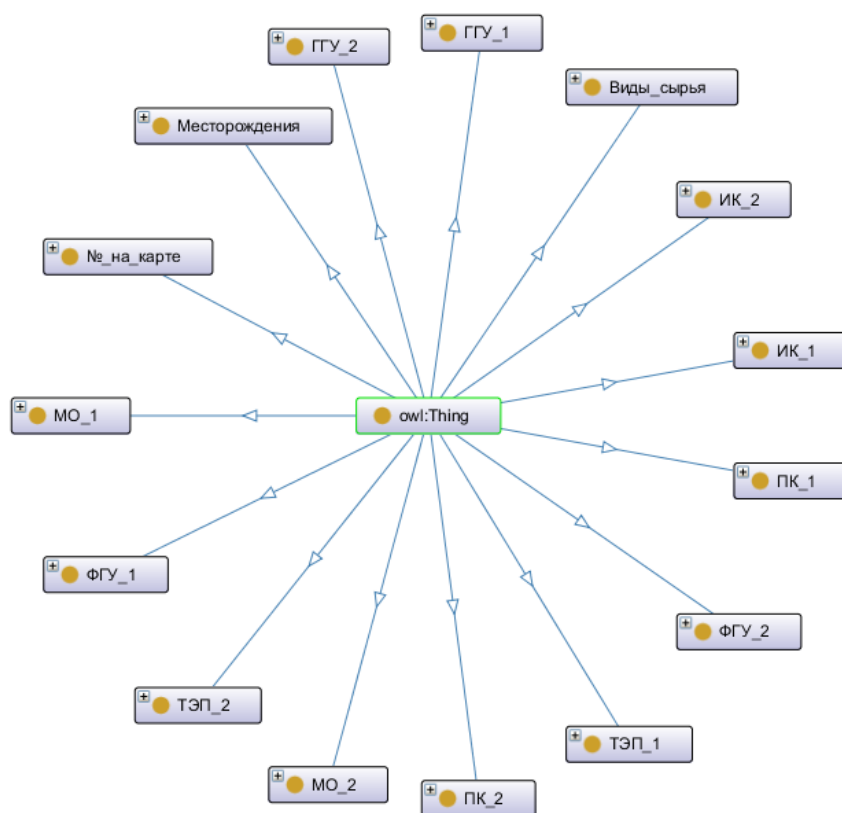


Рис. 1. Общий вид онтологической модели: МО_1 – размерность по сумме $A+B+C_1$ или $C_2+P_1+P_2$ (прогнозные); МО_2 – возможность прироста запасов за счет прогнозных ресурсов; ПК_1 – по содержанию полезных компонентов (обогащаемости сырья); ПК_2 – по возможному использованию; ГГУ_1 – глубина залегания тела полезного ископаемого (способ отработки); ГГУ_2 – сложность геологического строения (горно-технические условия); ТЭП_1 – удаленность от транспортных магистралей, населенных пунктов, объектов инфраструктуры в км; ТЭП_2 – удаленность от основных территориальных сегментов рынка, зон сбыта сырья, в км; ИК_1 – по рейтингу инвестиционного климата субъектов федерации; ИК_2 – по рейтингу (индикаторам) социально-экономической обстановки (уровень безработицы, уровень доходов по субъектам федерации); ФГУ_1 – физико-географические условия по природным зонам (коэффициент удорожания СМР); ФГУ_2 – по категориям оценки экологической обстановки; № на карте; месторождения; виды сырья

Fig. 1. General view of the ontological model: МО_1 – dimension by the sum of $A+B+C_1$ or $C_2+P_1+P_2$ (forecast); МО_2 – possibility of reserves growth due to forecast resources; ПК_1 – by the content of useful components (enrichment of raw materials); ПК_2 – by possible use; ГГУ_1 – depth of the mineral body (method of mining); ГГУ_2 – complexity of the geological structure (mining and technical conditions); ТЭП_1 – distance from highways, settlements, infrastructure facilities in km; ТЭП_2 – distance from the main territorial market segments, raw material sales areas, in km; ИК_1 – according to the rating of the investment climate of the subjects of the federation; ИК_2 – according to the rating (indicators) of the socio-economic situation (unemployment rate, income level by subjects of the federation); ФГУ_1 – physical and geographical conditions by natural zones (the coefficient of appreciation of the SMR); ФГУ_2 – by categories of environmental assessment; no. on the map; deposits; types of raw materials

Система поддержки принятия управленческих решений с целью подбора месторождений для потенциальных инвесторов должна содержать информацию по каждому из блоков данных, описанных в составе вышерассмотренной онтологической модели. В данной онтологической модели все классы являются самостоятельными, т. е. не входят в состав других классов. Такую онтологическую модель будем считать одноранговой, или атомарной [13–16]. Особенность атомарной онтологической модели состоит в том, что каждый узел (экземпляр) в одном классе онтологии связан с экземплярами других структур (классов) онтологии через систему отношений, выраженных, как правило, глаголами.

Преимущество онтологической модели по сравнению с иным способом представления и хранения значимых экспертных оценок состоит в том, что применение специализированного программного продукта – редактора онтологии, включающего машины логического вывода (Reasoner), позволяет установить скрытые, неявно указанные зависимости между сущностями в составе онтологической модели.

Онтологическая модель в данном случае представляет собой структуру для описания базы знаний, которая наполняется в программном продукте Protégé. Источником данных для наполнения базы знаний являются результаты экспертной оценки по имеющимся в территориальных фондах геологической информации по регионам отчетах и обзорным документам, находящимся в открытом доступе. Для расчета интегральной экспертной оценки результатов геологических исследований нами предлагается использовать математический аппарат нечеткой логики.

Методические аспекты ранжирования участков недр на базе нечеткой логики

Следующей задачей, которую необходимо решить в рамках создания информационной системы интегральной экспертной оценки перспективности участков недр на основе онтологической модели и нечеткой логики, является приведение всех качественных и количественных оценок в нечеткий (качественный) и количественный (цифровой) результат [17, 18]. Для ранжирования участков недр по различным позициям и последующего их сопоставления лучше перевести оценки в цифровой вид. Тогда по каждой позиции оценивание должно идти от некоторой максимально допустимой оценки, например, в 100 баллов.

По тем позициям, где оценка формируется группой экспертов (масштаб объекта, природное качество сырья и т. п.), предлагается использовать переход от качественных оценок группой экспертов средствами нечеткой логики в количественную оценку посредством формирования соответствующих функций принадлежности и дефазификации. Таким образом, нам требуется разработать формальные процедуры выбора параметров функции принадлежности и построения правил нечеткого вывода, что позволит более объективно оценивать перспективность прогнозных ресурсов участков недр (месторождений).

Таким образом, определим схему предлагаемого авторами подхода к решению задачи:

- определить лингвистические переменные и выбрать алгоритм нечеткого вывода;
- определить параметры функций принадлежности для ранжирования участков недр (месторождений);
- выполнить формализацию процедур составления правил нечеткого логического вывода;
- выполнить апробацию в программном продукте Matlab посредством компонента Fuzzy Logic Toolbox.

По позициям, где оценка формируется из разных показателей, выраженных цифрой в разных масштабах (удаленность от транспортных магистралей, оценка инвестиционного климата и т. д.), требуется выработка на основе экспертных данных веса каждой позиции. В качестве аппарата для реализации оценивания на основе принципов нечеткой логики автором использовался пакет программ математического моделирования Matlab [19]. В качестве входных данных по каждому участку недр брались нечеткие оценки трех экспертов в виде: А (высокая оценка), Б (средняя), В (низкая оценка). Например, по показателю масштаба объекта: А – крупные; Б – средние; В – мелкие.

Для проведения экспертной оценки месторождений в онтологической модели нами предлагается использовать модель «Куб». Суть данной модели состоит в выборе 6 Категорий оценки, что соответствует 6 граням куба. Категории, в свою очередь, делятся на 2 группы. Первая группа «Природная эффективность» содержит Категории оценки:

- масштаб объекта (код МО);
- природное качество и потребительские свойства сырья (код ПК);
- горно-геологические условия разработки (код ГГУ).

Вторая группа «Эффективность местоположения» содержит Категории оценки:

- транспортно-экономическое положение (код ТЭП);
- инвестиционный климат и социально-экономическая обстановка (код ИК);
- физико-географические условия и экологическая обстановка (код ФГУ).

На каждой из Категорий вводится по 2 Измерения, представленные в табл. 1.

По каждому Измерению, согласно допустимым значениям экспертной оценки, эксперт выбирает значение. Затем результаты сводятся в модель «Куб» для оценки конкретных качеств участков недр (месторождений), согласно табл. 2.

В ячейках Куба указываются номера месторождений на карте. Объекты, имеющие интегральную оценку «ОН» и «Н», исключаются из рассмотрения как низко перспективные в текущей ситуации оценки. Продукционные правила имеют вид конъюнкции, например, $\{C \wedge B \wedge V\}$ соответствует терму ОВ.

Из мнений экспертов по функциям принадлежности в виде нормального распределения с максимальным значением 100 формировались по алгоритму Мамдани итоговые оценки по каждому подразделу. С учетом размерности диапазона 5 групп, входящих в

него, имеют области допустимых значений по 20 единиц каждая. На основании оценок по всем разделам формировалась средняя оценка по разделу в целом. Настройка входных параметров модели в части функций принадлежности выполняется в программе Matlab (компонент Fuzzy Logic Toolbox). Вы-

ходная функция для системы нечеткого вывода представлена на рис. 2.

По аналогии вводится выходная лингвистическая переменная, содержащая результаты интегральной оценки в диапазоне 0–100 баллов. При этом границы диапазонов значений принимаются фиксированными, согласно табл. 2.

Таблица 1. Критерии экспертной оценки участков недр
Table 1. Criteria for expert evaluation of subsurface areas

Код категории Category code	Наименование измерения Measurement name	Значение экспертной оценки Expert evaluation value
МО_1	Размерность по сумме $A+B+C_1$ или $C_2+P_1+P_2$ (прогнозные) Dimension by the sum of $A+B+C_1$ or $C_2+P_1+P_2$ (forecast)	А – крупные/large Б – средние/average В – мелкие/small
МО_2	Возможность прироста запасов за счет прогнозных ресурсов Possibility of increase in reserves due to forecast resources	А – на флангах и в глубину/on the flanks and in depth Б – только на глубину/only to the depth В – отсутствует/missing
ПК_1	По содержанию полезных компонентов (обогащенности сырья) According to the content of useful components (enrichment of raw materials)	А – богатые (легкообогащаемые)/rich (easily rich) Б – рядовые (удовлетворительно обогащаемые) ordinary (satisfactorily enriched) В – бедные (труднообогащаемые)/poor (hard-to-get-rich)
ПК_2	По возможному использованию By possible use	А – экспорториентированные/export oriented Б – импорт-замещающие/import substituting В – имеющие спрос на внутреннем рынке having demand in the domestic market
ГГУ_1	Глубина залегания тела полезного ископаемого (способ отработки) Depth of the mineral body (working out method)	А – приповерхностная (открытый)/near-surface (open) Б – средних глубин (комбинированный)/medium depths (combined) В – глубокое (подземный)/deep (underground)
ГГУ_2	Сложность геологического строения (горнотехнические условия) Complexity of the geological structure (mining and technical conditions)	А – простые/simple Б – средней сложности/medium difficulty В – сложные и весьма сложные/complex and very complex
ТЭП_1	Удаленность от транспортных магистралей, населенных пунктов, объектов инфраструктуры, км Distance from highways, settlements, infrastructure facilities, km	А – до 25/up to 25 Б – 25–100 В – более 100/more than 100
ТЭП_2	Удаленность от основных территориальных сегментов рынка, зон сбыта сырья, км Distance from the main territorial market segments, raw material sales areas, km	А – до 10/up to 10 Б – 100–500 В – более 500/more than 500
ИК_1	По рейтингу инвестиционного климата субъектов федерации According to the rating of the investment climate of the subjects of the federation	А – высокий/high Б – средний/medium В – низкий/low
ИК_2	По рейтингу (индикаторам) социально-экономической обстановки (уровень безработицы, уровень доходов по субъектам федерации) By rating (indicator) of the socio-economic situation (unemployment rate, income level by federal subjects)	А – выше среднего/above average Б – среднего уровня/medium level В – неблагоприятная/unfavorable
ФГУ_1	Физико-географические условия по природным зонам (коэффициент удорожания строительно-монтажных работ) Physical and geographical conditions by natural zones (coefficient of increase in the cost of construction and installation works)	А – благоприятные/favorable Б – удовлетворительные/satisfactory В – неблагоприятные/unfavorable
ФГУ_2	По категориям оценки экологической обстановки By categories of environmental assessment	А – относительно удовлетворительная/relatively satisfactory Б – напряженная/tense В – критическая и кризисная (расположение объекта в пределах охраняемых территорий)/critical and crisis (the location of the object within the protected areas)

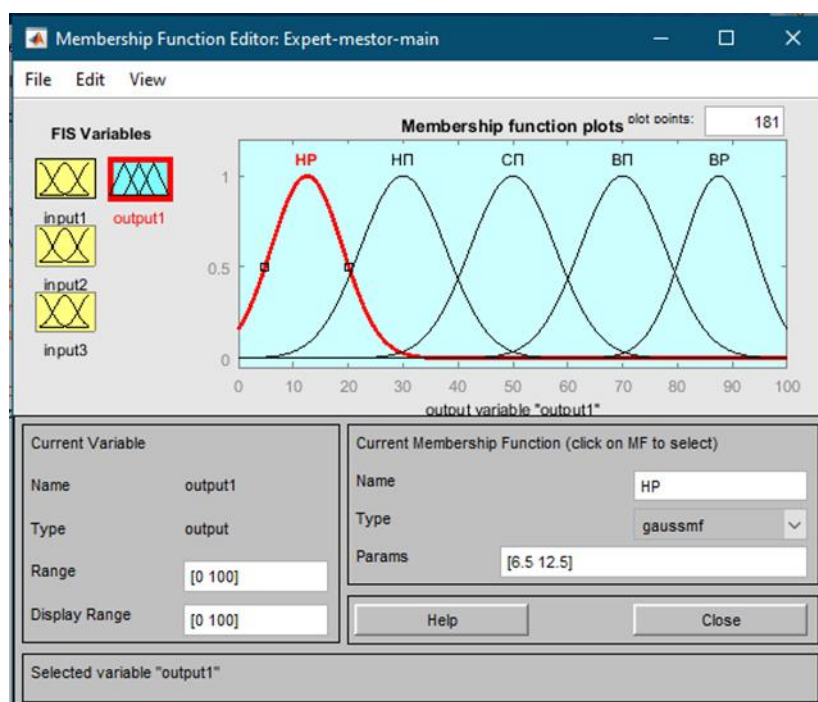


Рис. 2. Выходная функция для системы нечеткого вывода

Fig. 2. Output function for the fuzzy inference system

Таблица 2. Маркировка конкурентных качеств участка недр (месторождения)

Table 2. Marking of competitive qualities of a subsurface area (deposit)

Код Code	Качественная оценка Qualitative assessment	Количественная оценка Quantitative assessment
ОВ/ВН	Очень высокие/Very high	81–100
В/Н	Высокие/High	61–80
С/М	Средние/Medium	41–60
Н/Л	Низкие/Low	21–40
ОН/ВЛ	Очень низкие/Very low	0–20

Обсуждение

В результате применения данной методики была проведена оценка 20 участков недр, содержащих предполагаемые запасы стекольных песков на территории ЦФО по материалам геологических отчетов 2011–2015 гг., 10 из которых позднее были признаны перспективными в результате проведенных геолого-разведочных работ в течение 2015–2022 гг., с занесением результатов их оценки в систему мониторинга (табл. 3) [20].

Участки, признанные перспективными, отмечены знаком (п) в столбце с наименованием. Как видно, онтологическая модель с использованием алгоритмов нечеткой логики позволяет с высокой долей вероятности оценить перспективность участков недр (схождение более 90 %), что свидетельствует о корректности применяемых правил нечетких выводов, заложенных в алгоритм расчета. При расчете учитывалось предположение, что потенциальные потребители сырья также расположены на территории ЦФО.

Симметричный вид поверхности функции принадлежности подтверждает вывод о корректном использовании правил нечетких выводов в модели.

Таблица 3. Результаты усредненной экспертной оценки участков недр

Table 3. Results of the average expert assessment of subsurface areas

Наименование участка Name of the plot*	Эксперт Expert			Интегральная оценка Integral assessment
	1	2	3	
1 (п)**	62	54	66	65,4 (B)
2 (п)	45	59	61	56,2 (C)
3 (п)	58	55	65	61,9 (B)
4 (п)	61	65	71	71,9 (B)
5 (п)	86	74	73	84,6 (ОВ)
6 (п)	49	63	65	64,5 (B)
7 (п)	44	61	73	66,9 (B)
8 (п)	74	67	81	82,9 (ОВ)
9 (п)	69	77	55	79,4 (B)
10 (п)	73	82	85	86,5 (ОВ)
11	32	57	35	34,3 (H)
12	57	44	44	49,1 (C)
13	24	34	44	24,1 (H)
14	33	28	36	26 (H)
15	44	40	35	36,9 (H)
16	46	56	48	50,4 (C)
17	55	36	39	39,5 (H)
18	44	34	23	23,7 (H)
19	38	27	45	29,3 (H)
20	37	25	44	27,5 (H)

Примечание: *Наименования участков в таблице заменены их цифровым обозначением. **Перспективные объекты отмечены (п)

Note: *The names of the plots in the table are replaced by their numerical designation. **Perspective objects are marked (п)

Заключение

Таким образом, авторами разработана методика интегральной экспертной оценки перспективности

участков недр на основе онтологической модели и нечеткой логики. Последовательность расчетов по методике предполагает построение онтологической модели для отражения логических взаимосвязей между объектами недр и их качественными характеристиками. Затем из онтологической модели формируются качественные характеристики с их экспертной оценкой, которые вводятся в модель нечеткой логики в программе Matlab (в модуль Fuzzy logic). В программе заранее настраиваются правила нечеткого вывода и выбирается подходящая модель расчета. В данном случае использовалась модель Мамдани. Апробация корректности расчетов по методике выполнялась по ретроспективным данным по объектам

недр, признанным впоследствии перспективными. Расчет посредством программ Matlab показал сходжение результатов более 90 %, что свидетельствует о высоком уровне достоверности при применении данной методики.

В дальнейшем планируется автоматизировать расчеты по методике в результате формирования клиент-серверного веб-приложения, содержащего на стороне сервера системы управления базами данных, а на стороне клиента – интерфейс для ввода экспертных оценок. Результаты исследования могут использоваться в системах поддержки принятия решений по недропользованию и при планировании затрат на геолого-съемочные и поисковые работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bakaev V.A., Blagov A.V., Blagov Y.V. Creating the self-learning expert system for solving problems with fuzzy logic // Journal of Physics: Conference Series: 5th International Conference on Information Technology and Nanotechnology. – Samara, 21–24 May 2019. – V. 1368, 5. – Samara: Institute of Physics Publ., 2019. – P. 052015. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/5/052015.
2. Eliseev A.V. Adaptation of structure of information-measuring system based on fuzzy logic // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – Vladivostok, 1–4 October 2019. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8934065. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934065.
3. Ermilov A.E. Monitoring systems development using situational approach and fuzzy logic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 108, Development, Research, Certification. – Nizhny Novgorod, 25–26 September 2019. – P. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/695/1/012016.
4. Garcia L.F. The GeoCore ontology: a core ontology for general use in geology // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/337537263_The_GeoCore_ontology_A_core_ontology_for_general_use_in_Geology (дата обращения: 25.12.2022).
5. Predicting cardiovascular death with automatically designed fuzzy logic rule-based models / C. Brester, M. Kolehmainen, V. Stanovov et al. // Studies in Computational Intelligence. – 2021. – V. 922. – P. 223–236. DOI: 10.1007/978-3-030-70594-7_9.
6. Heinrich H. Theory and applications of ontology: computer applications // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/226549712_General_Formal_Ontology_GFO_A_Foundational_Ontology_for_Conceptual_Modelling (дата обращения: 25.12.2022).
7. Ахмет В.Х., Комаров М.А. Оптимизация параметров воспроизводственных циклов ГИН на основе положений контрактной системы в сфере закупок // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 7. – С. 59–64.
8. Ахмет В.Х. Рынок геологии и нерыночная основа ценообразования на продукцию и работы по ГИН и ВМСБ // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 11. – С. 49–54.
9. Scherp A. Designing core ontologies // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/50378685_Designing_Core_Ontologies (дата обращения: 25.12.2022).
10. Геолого-экономическое районирование в управлении фондом недр и геологоразведочной промышленностью / Р.Р. Ноговицын, О.Н. Федонин, В.С. Дадыкин, В.М. Сканцев. – Брянск: ООО «Новый проект», 2018. – 304 с.
11. Дадыкин В.С., Дадыкина О.В. Снижение воспроизводства минерально-сырьевой базы как угроза экономической безопасности // Социально-экономические и гуманитарные исследования: проблемы, тенденции и перспективы развития: Материалы международной научно-практической конференции. – Брянск, 27–28 апреля 2016. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2016. – С. 24–27.
12. Martins F.F., Castro H. Raw material depletion and scenario assessment in European Union – a circular economy approach // Energy Reports. – 2020. – V. 6. – P. 417–422. DOI: 10.1016/j.egy.2019.08.082.
13. Basag S.P., Turan A., Yucel O. An investigation on antimony production by using Niederschlag process // TMS Annual Meeting. 7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. Code 121635. – 2016. – P. 117–121. DOI: 10.1002/9781119274643.ch15.
14. Дадыкина О.В., Дадыкин В.С. Модель геолого-экономического мониторинга в системе экономической безопасности региона // Управление в условиях глобальных мировых трансформаций: экономика, политика, право. Сборник научных трудов. – Брянск: БГТУ, 2016. – С. 106–108.
15. Карнаухов В.М. Исследование весовых коэффициентов единиц рейтинга при помощи нечетких множеств // Информатизация образования и науки. – 2017. – № 2 (34). – С. 57–67.
16. Конников Е.А., Прико П.А. Нечетко-множественная модель оценки уровня социальной ответственности организаций // Экономика и предпринимательство. – 2017. – № 3-2 (80-2). – С. 681–683.
17. Морозов А.Ф., Климов А.К. Геологическое информационное обеспечение как важнейшая часть геологоразведочного процесса. Современное состояние и перспективы // МРР. Экономика и управление. – 2012. – № 4. – С. 4–8.
18. Нурмаганбетова М.О., Нурмаганбетов Д.Е., Мырзакеримова А.Б. Математическая модель диагностирования с использованием правила нечеткого вывода // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 43. – С. 493–497.
19. Степина О.М., Дадыкин В.С. Применение ГИС-технологий в управлении промышленным предприятием // Инновационно-промышленный потенциал развития экономики регионов: Материалы IV-й Международной научно-практической конференции. – Брянск, 31 марта 2017. – С. 285–290.
20. Mastella L. Formalizing geological knowledge through ontologies and semantic annotation. URL: https://www.researchgate.net/publication/290734392_Formalizing_Geological_Knowledge (дата обращения: 02.12.2022).

Поступила: 13.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 28.03.2023 г.

Информация об авторах

Дадыкин В.С., доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры цифровой экономики, Брянский государственный технический университет.

Дадыкина О.В., кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры цифровой экономики, Брянский государственный технический университет.

Язвенко Н.А., ассистент кафедры цифровой экономики, Брянский государственный технический университет.

UDC 510.644.4

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR INTEGRATED EXPERT ASSESSMENT OF THE PROSPECTS OF SUBSURFACE AREAS BASED ON AN ONTOLOGICAL MODEL AND FUZZY LOGIC

Valery S. Dadykin¹,
dadykin88@bk.ru

Olga V. Dadykina¹,
atamanova_281287@mail.ru

Nikolay A. Yazvenko¹,
nikolayyazvenko@mail.ru

¹ Bryansk State Technical University,
7, 50 let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, 241035, Russia.

The relevance of the research lies in the need to provide potential investors and authorities with the results of an integrated expert assessment of the prospects of subsurface areas based on an ontological model and fuzzy logic to increase the economic efficiency of prospecting to identify forecast resources and geological reserves.

The aim of the study is to develop a methodology for integrated expert assessment of the prospects of subsurface areas based on an ontological model and fuzzy logic.

Objects: subsurface areas promising for geological study, mainly for solid minerals.

Methods. The theoretical and methodological basis of the research is based on the methods of system analysis and ontological modeling, the use of fuzzy logic methods.

Results. The requirements for an automated system for selecting deposits for potential investors are defined in terms of formalizing the decision-making process in terms of reducing the uncertainty of a group of quantitative criteria and «softening the accuracy» of qualitative criteria. The authors developed an atomic ontological model containing indicators of integrated expert assessment of the prospects of subsurface areas and methodology for integrated expert assessment of the prospects of subsurface areas based on the ontological model and fuzzy logic. The developed method of integrated expert assessment of the prospects of subsurface areas is being tested in the Bryansk branch of the Federal Budgetary Institution «Territorial Fund of Geological Information for the Central Federal District» (Bryansk) on materials collected in the Central Federal District, and can be used as a decision support system in terms of subsurface use, potential investors, the state customer in the software and targeted planning of geological exploration.

Key words:

ontological model, fuzzy logic, expert evaluation, search planning, atomic model, defasification, Mamdani method.

REFERENCES

1. Bakaev V.A. Creating the self-learning expert system for solving problems with fuzzy logic. *Journal of Physics: Conference Series 5th International Conference on Information Technology and Nanotechnology*. Samara, Institute of Physics Publishing, 2019. Vol. 1368, 5, p. 052015. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/5/052015.
2. Eliseev A.V. Adaptation of structure of information-measuring system based on fuzzy logic. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. Vladivostok, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. pp. 8934065. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934065.
3. Ermilov A.E. Monitoring systems development using situational approach and fuzzy logic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Nizhny Novgorod, 2019. pp. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/695/1/012016.
4. Garcia L.F. The GeoCore ontology: a core ontology for general use in geology. *ResearchGate*, Available at: https://www.researchgate.net/publication/337537263_The_GeoCore_ontology_A_core_ontology_for_general_use_in_Geology (accessed: 25 December 2022).
5. Brester C. Predicting cardiovascular death with automatically designed fuzzy logic rule-based models. *Studies in Computational Intelligence*, 2021, vol. 922, pp. 223–236. DOI: 10.1007/978-3-030-70594-7_9.
6. Heinrich H. Theory and applications of ontology: computer applications *ResearchGate*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/226549712_General_Formal_Ontology_GFO_A_Foundational_Ontology_for_Conceptual_Modelling (accessed: 25 December 2022).
7. Akhmet V.H. Optimizatsiya parametrov vosproizvodstvennykh tsiklov GIN na osnove polozheniy kontraktnoy sistemy v sfere zakupok [Optimization of the parameters of production cycles of GIN based on the provisions of the contract system in the field of procurement]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2014, no. 7, pp. 59–64.
8. Akhmet V.H. Rynok geologii i nerynochnaya osnova tsenoobrazovaniya na produktsiyu i raboty po GIN i VMSB [The market of geology and the non-market basis of pricing for products and works on GIN and VMSB]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2011, no. 11, pp. 49–54.
9. Scherp A. Designing core ontologies. *ResearchGate*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/50378685_Designing_Core_Ontologies (accessed: 25 December 2022).
10. Nogovitsyn R.R., Fedonin O.N., Dadykin V.S., Skantsev V.M. *Geologo-ekonomicheskoe rayonirovanie v upravlenii fondom nedr i geologorazvedochnoy promyshlennosti* [Geological and economic zoning in the management of the subsoil fund and the exploration industry]. Bryansk, Novy proekt Publ., 2018. 304 p.
11. Dadykin V.S. Snizhenie vosproizvodstva mineralno-syrevooy bazy kak ugroza ekonomicheskoy bezopasnosti [Reduction of reproduction of the mineral resource base as a threat to economic security]. *Sotsialno-ekonomicheskie i humanitarnye issledovaniya: problemy, tendentsii i perspektivy razvitiya* [Socio-economic and humanitarian studies: problems, trends and prospects of development]. Bryansk, Bryansk State Agrarian University, 2016. pp. 24–27.
12. Martins F.F., Castro H. Raw material depletion and scenario assessment in European Union – a circular economy approach. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.egy.2019.08.082.
13. Basag S.P., Turan A., Yucel O. An investigation on antimony production by using Niederschlag process, *TMS Annual Meeting. 7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical*

- Processing*. 2016, code 121635, pp. 117–121. DOI: 10.1002/9781119274643.ch15.
14. Dadykina O.V., Dadykin V.S. Model geologo-ekonomicheskogo monitoringa v sisteme ekonomicheskoy bezopasnosti regiona [The model of geological and economic monitoring in the system of economic security of the region]. *Upravlenie v usloviyakh globalnykh mirovykh transformatsy: ekonomika, politika, pravo. Sbornik nauchnykh trudov* [Socio-economic and humanitarian studies: problems, trends and prospects of development]. Bryansk, BSTU Publ., 2016. pp. 106–108.
 15. Karnaukhov V.M. Issledovanie vesovykh koeffitsientov edinit reytinga pri pomoshchi nechetkikh mnozhestv [Investigation of the weight coefficients of rating units using fuzzy sets]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki*, 2017, no. 2 (34), pp. 57–67.
 16. Konnikov E.A., Priko P.A. Nechetko-mnozhestvennaya model otsenki urovnya sotsialnoy otvetstvennosti organizatsy [Fuzzy-multiple model for assessing the level of social responsibility of organizations]. *Ekonomika i predprinimatelstvo*, 2017, no. 3-2 (80-2), pp. 681–683.
 17. Morozov A.F. Geologicheskoe informatsionnoe obespechenie kak vazhneyshaya chast geologorazvedochnogo protsesssa. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy [Geological information support as the most important part of the exploration process. Modern state and prospects]. *MRR. Ekonomika i upravlenie*, 2012, no. 4, pp. 4–8.
 18. Nurmaganbetova M.O., Nurmaganbetov D.E., Myrzakerimova A.B. Matematicheskaya model diagnostirovaniya s ispolzovaniem pravila nechetkogo vyvoda [Mathematical model of diagnostics using the fuzzy inference rule]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2017, no. 4-3, pp. 493–497.
 19. Stepina O.M. Primenenie GIS-tekhnologiy v upravlenii promyshlennym predpriyatiem [Application of GIS technologies in industrial enterprise management]. *Innovatsionno-promyshlenny potentsial razvitiya ekonomiki regionov. Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovative and industrial potential of regional economic development. Materials of the IVth International Scientific and Practical Conference]. Bryansk, 2017. pp. 285–290.
 20. Mastella L. Formalizing geological knowledge through ontologies and semantic annotation. *ResearchGate*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/290734392_Formalizing_Geological_Knowledge (accessed: 2 December 2022).

Received: 13 January 2023.

Reviewed: 28 March 2023.

Information about the authors

Valery S. Dadykin, Dr. Sc., professor, Bryansk State Technical University.

Olga V. Dadykina, Cand. Sc., associate professor, Bryansk State Technical University.

Nikolay A. Yazvenko, assistant, Bryansk State Technical University.

УДК 621.6:622.69

К ВОПРОСУ О ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЖИЖЕННОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Ванчугов Иван Михайлович¹,
Vanchugov.i@gubkin.ru

Резанов Константин Сергеевич^{2,1},
rezanov_ks@mail.ru

Шестаков Роман Алексеевич¹,
Shestakov.r@gubkin.ru

¹ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65.

² ООО «Морнефтегазпроект»,
Россия, 117246, г. Москва, Херсонская ул., 43, стр. 3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью улавливания и утилизации одного из основных видов парниковых газов – углекислого газа (CO_2). Данная необходимость в первую очередь связана со всевозрастающими выбросами CO_2 , три четверти которых приходится на сжигание различных видов топлива. Одним из основных звеньев цепочки улавливания и утилизации CO_2 является его транспортировка от мест улавливания к местам утилизации или захоронения.

Цель: провести анализ и систематизацию международных методик расчета трубопроводного транспорта сжиженного углекислого газа (LCO_2) для определения отличий в численных результатах, в том числе факторов, учитываемых и не учитываемых в рассматриваемых методах, а также провести анализ водного вида транспорта в качестве альтернативы трубопроводному.

Объекты: сжиженный углекислый газ, трубопровод для транспортировки LCO_2 .

Методы: численное моделирование трубопроводного транспорта LCO_2 согласно международным методикам для оценки требуемого диаметра, способного обеспечить заданный расход перекачки, анализ полученных результатов.

Результаты. Выполнен обзор существующих методик расчета LCO_2 трубопроводов, проведено численное моделирование и анализ полученных результатов, в ходе чего было выявлено, что большинство моделей игнорируют влияние примесей, которые, однако, влияют на технологические параметры эксплуатации и моделирование LCO_2 трубопроводов, что приведет к неточностям при их проектировании и эксплуатации. В дополнение было выявлено, что скорость жидкости в трубопроводе рассчитывается по параметрам в начальном сечении, что соответствует минимальному ее значению в трубопроводе, и принимается равной ей по всему трубопроводу без учета расширения LCO_2 от изменения температуры и давления по его длине и, следовательно, без учета дополнительных потерь давления и изменения иных технологических параметров, которые напрямую могут влиять на безопасность эксплуатации и экономическую эффективность проектируемого или эксплуатируемого LCO_2 трубопровода. Также следует отметить, что уравнения определения диаметра, зависящие от длины трубопровода, не подходят для оценки оптимального диаметра трубопровода. Что же касается альтернатив трубопроводному транспорту, то в первую очередь стоит отметить возможность перевозки танкерами на большие расстояния либо возможность использования LCO_2 для увеличения дебита месторождений на шельфе и в труднодоступных местах прибрежной зоны.

Ключевые слова:

Улавливание и хранение углекислого газа, проектирование трубопровода CO_2 , падение давления, уравнения диаметра трубопровода, транспорт CO_2 , методы транспортировки CO_2 .

Введение

Парниковые газы оказывают непосредственное влияние на повышение температуры атмосферы. Одним из главных компонентов парниковых газов является углекислый газ, или диоксид углерода (CO_2), который выделяется в результате природных и антропогенных процессов, например выработки электроэнергии, сжигании попутного газа на месторождениях, в ходе эксплуатации автомобилей или извержения вулканов и т. д. Выбросы CO_2 вызывают озабоченность, и необходимость снижения процентного содержания CO_2 в атмосфере становится все более и более актуальной задачей и одновременно проблемой для нынешних и будущих поколений из-за неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1], глобальное потепление за последние 50 лет происходит в основном из-за сжигания ископаемого топлива. В 2021 г. выбросы CO_2 , связанные с энергетикой, составили более 36,3 млрд т, иначе говоря рост за год составил более 6 %, что является рекордным показателем, связанным в том числе с ускоренными восстановлением емкости экономики после пандемии короновируса COVID-19 [2]. Примерно три четверти атмосферного выброса CO_2 происходит из-за сжигания различных видов топлив [3], результатом чего является выброс CO_2 в атмосферу. Если этот неконтролируемый выброс CO_2 в атмосферу продолжится, то ожидается, что к 2100 г. средняя температура на планете повысится примерно на 6,4 °C [4], что в свою

очередь приведет к сопутствующему повышению уровня моря.

CCS (Carbon capture and storage) – это относительно новая и передовая технология, направленная на улавливание и хранение антропогенного CO₂ и, как следствие, на общее сокращение выбросов, что в свою очередь должно привести к замедлению повышения температуры Земли не менее чем на 2 °C (как предполагается согласно документации Парижского соглашения) или к достижению доиндустриального уровня [5, 6]. М. Mazzocola и др. [7] совместно с МГЭИК [8] сообщили, что выбросы CO₂ в атмосферу должны составлять менее 85 % к 2050 г. по сравнению с уровнем начала 2000-х гг., чтобы достичь повышения температуры атмосферы не более чем на 2,4 °C. На данный момент данное предложение кажется достаточно амбициозной целью, учитывая уровень внедрения CCS по всему миру.

Транспортировка является связующим звеном между улавливанием CO₂ и хранением (CCTS означает улавливание, транспортировку и хранение CO₂ [9], иногда используется взаимозаменяемо с CCS). Трубопроводы, железнодорожные вагоны и автоцистерны могут транспортировать CO₂ по суше, в то время как для морских перевозок используются суда и трубопроводы [10]. Эффективная транспортировка CO₂ от источника к поглотителю требует надежной конструкции трубопроводов для транспортировки CO₂ [11].

Перед транспортировкой CO₂ улавливается из дымовых газов после обработки на промышленных объектах. Процесс улавливания является наиболее затратным компонентом цепочки CCS, на долю которого приходится до 50 % [12], а с учетом затрат на сжатие до 90 % [13] от общей стоимости CCS. Стоит отметить, что физико-химические свойства CO₂ в различных фазах были уже хорошо изучены, однако состояния CO₂ при высоких давлениях, быстро изменяющихся температурах CO₂, а также наличие различных примесей затрудняют их прогнозирование [14, 15], что важно при проектировании трубопровода для обеспечения надежной эксплуатации и заданной пропускной способности.

Отдельное внимание при проектировании трубопровода для CO₂ должно быть уделено определению физических свойств текущей жидкости, а также определению оптимальных размеров трубопровода, спецификации рабочих давлений, знанию топографии трассы, геотехническим соображениям и особенностям местной окружающей среды [16, 17]. Использование судов должно обеспечивать не только возможность транспорта на сверхдальние расстояния, но и надежную и экологически безопасную транспортировку.

Данная работа посвящена в том числе уже имеющимся, доступным и открытым моделям расчета перепада давления в трубопроводе и диаметра трубопровода. Эти два взаимозависимых параметра, а также скорость потока жидкости являются наиболее важными параметрами при проектировании технологических трубопроводов CO₂. Также в работе рас-

смотрен альтернативный вид транспортировки – транспортировка танкерами, которая на данный момент только начинает зарождаться в нефтегазовой отрасли с целью соблюдения экологической повестки.

Существующие трубопроводы CO₂

В настоящее время по всему миру насчитывается в общей сложности более 8000 км трубопроводов для перекачки CO₂. Это в сравнении с более чем 6500 км трубопроводов CO₂ в 2014 г. и с 2400 км в 2007 г. [18–20]. Для транспортировки около 10 млрд т в год начиная с 2050 г. потребуется более 200000 км трубопроводов. В табл. 1 показаны некоторые эксплуатируемые трубопроводы CO₂ в мире.

Таблица 1. Существующие и эксплуатируемые проекты трубопроводов CO₂ [18, 21–23]

Table 1. Existing and operational CO₂ pipeline projects [18, 21–23]

Название трубопровода Pipeline name	Длина (км) Length (km)	Мощность (Мт/год) Efficiency (Mt/year)	Диаметр (мм) Diameter (mm)	Страна Country
Quest	84	1,2	324	Канада Canada
Alberta Trunkline	240	15	406	
Weyburn	330	2	305–356	
Saskpower Boundary Dam	66	1,2	–	
Beaver Creek	76	–	457	
Monell	52,6	1,6	203	США USA
Baird	258	23	–	
West Texas	204	1,9	203–305	
Transpetco	193	7,3	324	
Salt	201	4,3	–	
Sheep Mountain	656	11	610	
Val verde	130	2,5	–	
Slaughter	56	2,6	305	
Cortez	808	24	762	
Central Basin	231,75	27	406	
Canyon Reef Carriers	225	–	324–420	
Chowtaw (NEJD)	294	7	508	
Decatur	1,9	1,1	–	
Bravo	350	7,3	510	
SACROC	354	4,2	406	
Este	191	4,8	305–356	
Snohvit	153	0,7	–	Норвегия Norway
OCAP	97	0,4	–	Нидерланды Netherlands
Lacq	27	0,06	203–305	Франция France
Qinshui	116	0,5	152	Китай China
Gorgon	8,4	4	269–319	Австралия Australia
Bati Raman	90	1,1	–	Турция Turkey

Маршрут трубопровода

Определение маршрута и длины трубопровода – это первый шаг при проектировании трубопроводов. Целью проектирования оптимального маршрута является сокращение длины трубопровода, снижение затрат за счет использования существующей инфраструктуры, избегание пересечения дорог, рельсов, холмов, озер, рек, фруктовых садов, водных переправ

и населенных пунктов, минимизация экологического ущерба и обеспечение легкого доступа к трубопроводу [24–27].

Расход и скорость потока CO₂ в трубопроводе

Массовый расход транспортируемого углекислого газа вычисляется по стандартной формуле (1):

$$Q = Q_v \cdot \rho, \quad (1)$$

где Q – массовый расход (кг/с); Q_v – объемный расход (м³/с); ρ – плотность (кг/м³).

Скорость потока в трубопроводе рассчитывается как:

$$v = \frac{Q_v}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\rho \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

где v – скорость (м/с); d – внутренний диаметр трубопровода (м); S – площадь поперечного сечения трубопровода (м²).

Американский институт нефти (America Petroleum Institute – API) [28] представил эмпирическую формулу для расчета скорости эрозии для двухфазного потока (3), что критически важно при проектировании трубопровода для коррозионно-активного углекислого газа. Диаметр трубопровода выбирается таким образом, чтобы ограничить скорость потока CO₂ ниже скорости эрозии и избежать чрезмерных потерь давления. V. Vandeginste и K. Piessens [27] применили формулу (3) для расчета скорости эрозии и пришли к скорости эрозии 4,3 м/с, что выше широко используемых 2,0 м/с. Уравнение (4), используемое для определения максимальной скорости во избежание эрозии в соответствии со стандартом API, приведено в работе [29]. Значения скорости, вычисленные с помощью уравнения (4), выше значений, вычисленных с помощью уравнения (3):

$$v_e = 0,82 \frac{c}{\sqrt{\rho}}, \quad (3)$$

где v_e – скорость эрозии (м/с); c – эмпирическая постоянная (100 для непрерывного потока и 125 для прерывистого потока):

$$v_{\max} = \frac{122}{\sqrt{\rho}}, \quad (4)$$

где $v_{\max}$ – максимальная скорость (м/с).

Рабочее давление и температура трубопровода CO₂

Максимальное рабочее давление в трубопроводе CO₂ определяется в первую очередь исходя из экономических соображений. CO₂ может транспортироваться при низком (газовая фаза) или при высоком давлении (жидкая фаза) исходя из числа промежуточных станций. Жидкостная фаза CO₂ является наиболее подходящей для транспорта в больших количествах и на дальние расстояния. Фазовое поведение жидкой фазы CO₂ также зависит от температуры. Температура на выходе из компрессора или насоса устанавливает верхнюю границу температуры, в то время как температура грунта/окружающей среды устанавливает нижнюю границу температуры транспортируемого продукта [24]. В среднем рабочее давление в трубопроводе CO₂ колеблется от 10 до 15 МПа, а температура – от 15 до 30 °C [30] или от 8,5

до 15 МПа и от 13 до 44 °C [12]. Поддержание минимального давления в трубопроводе выше 7,38 МПа, т. е. критического давления CO₂, гарантирует, что жидкость остается в сверхкритическом состоянии [31], в котором она менее коррозионно-активна. Давления вдоль трубопровода CO₂ нелинейны, поэтому простое усреднение давлений на входе и выходе может не дать точных средних значений давления. Из-за этой нелинейности давлений вдоль трубопровода CO₂ S. McCoy и E. Rubin [32] использовали уравнение (5) для расчета среднего давления вдоль трубопровода:

$$P_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \left(P_2 + P_1 - \frac{P_2 \cdot P_1}{P_2 + P_1} \right), \quad (5)$$

где $P_{\text{ср}}$ – среднее давление по трубопроводу (МПа); P_1 – давление на входе (МПа); P_2 – давление на выходе (МПа).

В то же самое время для эффективной эксплуатации данных видов трубопроводов нет необходимости устанавливать температурный предел для CO₂, так как если значения давлений по длине трубопровода поддерживаются выше критических значений, то газовой фаза образовываться не будет [20]. Однако иногда стоит ограничиться максимальной температурой в 50 °C, чтобы избежать разрушений антикоррозионных покрытий трубопровода [22]. Также в некоторых случаях более эффективно будет транспортировать CO₂ при температурах ниже критических, поскольку в этом случае плотность увеличивается, а потери давления уменьшаются.

Толщина стенки трубопровода

Трубопроводы должны иметь достаточную толщину стенки для того, чтобы выдерживать внутреннее и внешнее давление. Максимальное рабочее давление определяет прочность трубопровода в зависимости от толщины стенки трубопровода. Поэтому необходимо рассчитать предполагаемое давление разрыва и смятия, после чего использовать их для выбора труб с соответствующей толщиной стенки и прочностью. A. Witkowski и др. [25], а также S. McCoy и E. Rubin [32] представили уравнение (6) для расчета толщины стенки трубопровода:

$$\delta = \frac{P_{\max} \cdot D_0}{2 \cdot S \cdot E \cdot F}, \quad (6)$$

где δ – толщина трубопровода (м); D_0 – наружный диаметр трубопровода (м); $P_{\max}$ – максимальное рабочее давление (МПа); S – удельный предел текучести материала трубы (МПа); E – коэффициент продольного сжатия (1,0); F – расчетный коэффициент (0,72).

Состав потока CO₂

Потоки, транспортируемые по трубопроводам и не только, обычно содержат определенное количество примесей. Примеси в потоке влияют на физические и термодинамические свойства перекачиваемой жидкости. Состав потока CO₂ зависит от источника, встречающегося в природе или улавливаемого в результате промышленных процессов. Процентное содержание примесей в улавливаемом CO₂ варьируется в зависимости от типа улавливания (предварительное сжига-

ние, кислородное топливо или дожигание). Проценты улавливания представлены в табл. 2.

В зависимости от процесса улавливания и чистоты исходного топлива концентрация и диапазон примесей могут быть очень большими (табл. 3).

Таблица 2. Состав потока CO_2 для различных методов улавливания (объемные %) [22]

Table 2. Composition of the CO_2 stream for various capture methods (volume %) [22]

Название компонента Component name	Дожигание (последующее сгорание) Afterburning (subsequent combustion)	Предварительное сгорание Pre-combustion	Кислородно-топливное сгорание Oxygen-fuel combustion
CO_2	>99	>95,6	>85
CH_4	<0,01	<0,035	–
N_2	<0,17	<0,6	<7
H_2S	~0	<3,4	~0
$\text{C}_2 +$	<0,01	<0,01	–
CO	<0,001	<0,4	0,075
O_2	<0,01	След/Trace	<3
NO_x	<0,005	–	<0,25
SO_x	<0,001	0,07	<2,5
H_2	След/Trace	<3	След/Trace
Ar	След/Trace	<0,05	<5
H_2O	0,01	0,06	0,01

Таблица 3. Минимальные и максимальные молярные доли типичных примесей в потоках CO_2 [7, 33–36]

Table 3. Minimum and maximum molar fractions of typical impurities in CO_2 streams [7, 33–36]

Название компонента Component name	CO_2	N_2	O_2	Ar	SO_2	H_2S
Мин/Min, %	75	0,02	0,04	0,005	<10–3	<0,001
Макс/Max, %	99,95	10	5	1,5	1,5	0,3
Название компонента Component name	NO_x	CO	H_2	CH_4	H_2O	NH_3
Мин/Min, %	<0,002	<10–3	0,06	0,7	0,005	<10–3
Макс/Max, %	0,3	0,2	4	4	6,5	3

Фазы CO_2 при трубопроводном транспорте

CO_2 транспортируется по трубопроводам в виде газа, сверхкритической жидкости и переохлажденной жидкости [37]. Транспортировка CO_2 в любом конкретном состоянии имеет свои преимущества и недостатки. Все три состояния (газообразное, сверхкритическое и жидкое) CO_2 проявляют различное термодинамическое поведение, и определение свойств жидкости необходимо для эффективного проектирования трубопроводов CO_2 . Фазовая диаграмма чистого CO_2 , показанная на рис. 1, отличается от фазовой диаграммы CO_2 с примесями, показанной на рис. 2.

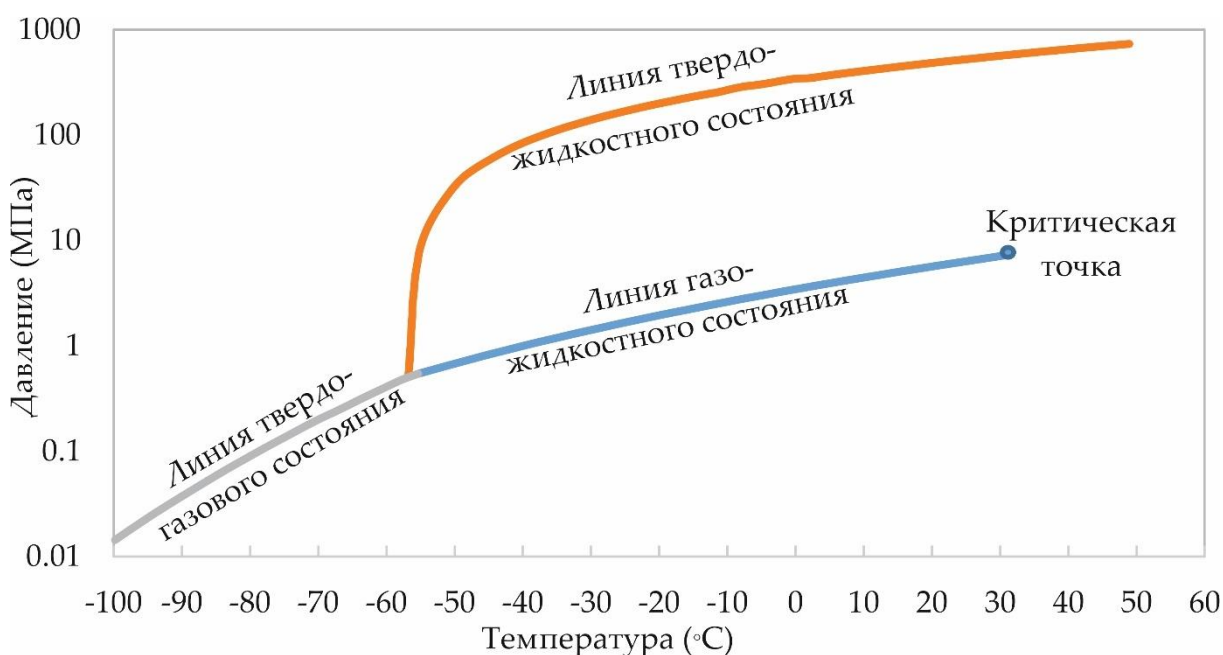


Рис 1. Фазовая диаграмма чистого CO_2 [7, 15, 25]

Fig. 1. Phase diagram of pure CO_2 [7, 15, 25]

Как правило, транспортировка газообразного CO_2 по трубопроводам неэкономична из-за большого объема газа, низкой плотности и потерь при высоком давлении [32]. Однако при определенных обстоятельствах транспортировка CO_2 в газообразном состоянии все еще может быть более рентабельной, чем в жидком или сверхкритическом состояниях. Модель М. Кнооре и др. [38] способна оценить и выявить более экономичный метод при выборе газообразной или жидкой фаз для транспортировки CO_2 . Группа уче-

ных говорит о том, что при массовом расходе CO_2 до 16,5 млн т/год и при расстоянии 100 км по равнинной местности или при расходе в 15,5 млн т/год и расстоянии 100 км по морскому трубопроводу транспортировка CO_2 в газообразной фазе является более рентабельной, чем в жидком.

Но, как правило, транспортировка CO_2 в переохлажденно-жидкостной или сверхкритической фазах является более целесообразной, чем в газообразной фазе [29]. Транспортировка в переохлажденно-

жидкостной фазе имеет ряд преимуществ перед транспортировкой в сверхкритической фазе из-за более высокой плотности, меньшей сжимаемости и, соответственно, меньших потерь давления и, как следствие, большей пропускной способности. Также к этим преимуществам может быть отнесена возможность использования меньшего диаметра трубы, что в свою очередь скажется на окупаемости проекта и уменьшении долгосрочных затрат на проектирование и строительством, а также на уменьшение затрат на

эксплуатацию [39]. Помимо этого, в работах, посвященных энергоэффективности, говорится о том, что насосы потребляют меньше энергии, чем компрессоры, в результате чего для транспортировки жидкости требуется на 50 % меньше энергии, чем для транспортировки CO₂ в сверхкритической фазе [31]. Это в свою очередь говорит об уменьшении капитальных вложений при строительстве и проектировании трубопровода и насосных станций, а также уменьшении эксплуатационных затрат [36].

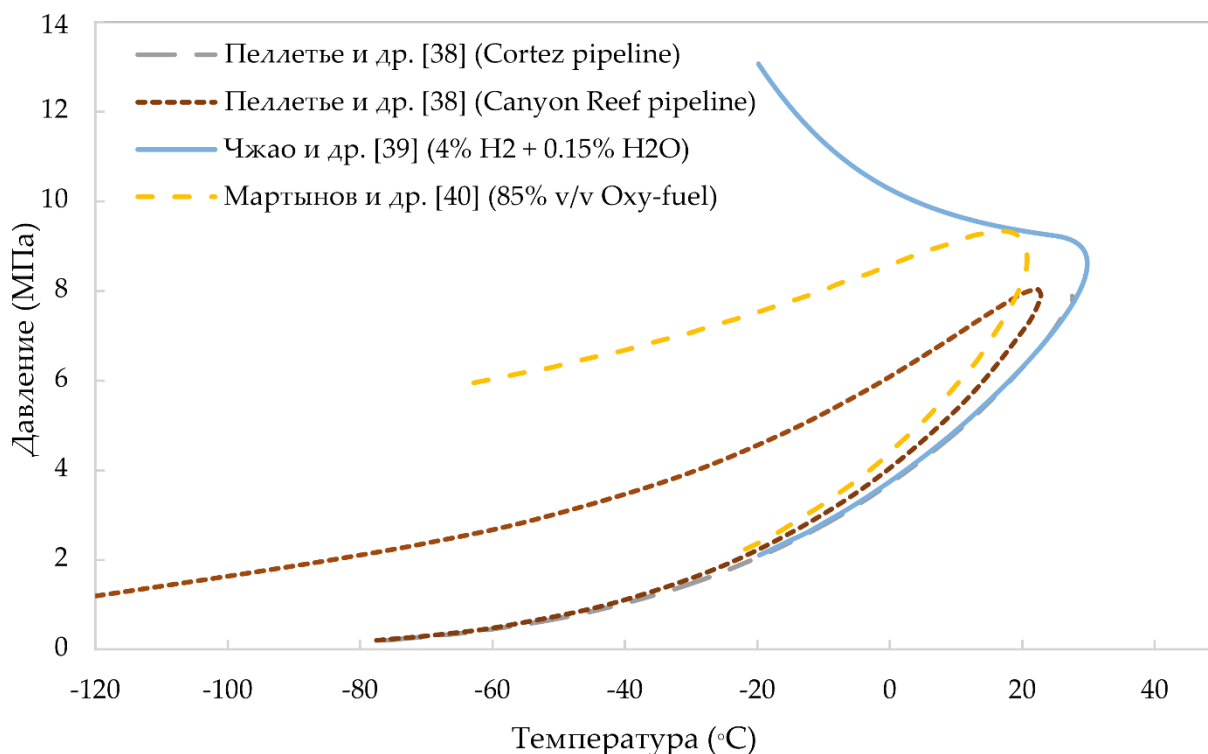


Рис 2. Фазовая диаграмма жидкого CO₂ с примесями [38–40]

Fig. 2. Phase diagram of liquid CO₂ with impurities [38–40]

Однако в переохлаждено-жидкостной фазе CO₂ используется в основном при транспортировке в судах с плотностью хранения около 1162 кг/м³ при 0,65 МПа и –52 °С [40]. Одним из недостатков транспорта данной фазы CO₂ по сравнению со сверхкритической фазой CO₂ является необходимость применения усиленной теплоизоляции трубопроводов в более теплом климате.

Диаметр трубопровода и перепад давления

Параметры диаметра трубопровода и перепадов давления используются для оптимизации конструкции трубопроводов CO₂. Оптимально подобранный диаметр позволяет избежать чрезмерных потерь давления и сократить количество станций повышения давления для оптимизации затрат на транспортировку. Начальный диаметр выбирается с учетом объемов жидкости и потерь давления. В отчете Международного энергетического агентства [27] приведены уравнения для падения давления жидкости (7), форма формулы Дарси и уравнение для расхода газа (8), используемые для определения размеров трубопроводов.

Уравнение (7) используется для расчета расстояния трубопровода, на котором давление падает до минимального значения. Это уравнение учитывает расход, длину трубопровода, плотность флюида и диаметр трубопровода при определении перепада давления в трубопроводе.

$$\Delta P = 2,252 \cdot f \cdot L \cdot \rho \cdot \frac{Q_v^2}{D^5}, \quad (7)$$

где ΔP – перепад давления (МПа); Q_v – расход (м³/с); f – коэффициент трения; ρ – плотность (кг/м³); L – длина трубопровода (м); D – внутренний диаметр трубопровода (м).

Когда CO₂ перемещается по трубопроводу, давление падает, и жидкость расширяется, что приводит к увеличению скорости, что еще больше увеличивает потерю давления при возможном возникновении двухфазного потока. В работе [41] указали безопасные расстояния для предотвращения двухфазного потока или точки перекрытия на 10 % меньше расчетного расстояния перекрытия. На этих безопасных расстояниях установлены форсирующие станции для рекомпрессии. Адиабатический поток приводит к

большему расстоянию переноса CO_2 , чем изотермический поток перед повторным сжатием, а переохлажденный поток преодолевает на 46 % большее расстояние, чем сверхкритический поток, прежде чем требуется форсирование [42]. Расстояние до трубопровода, рельеф местности, максимальная высота над уровнем моря и изоляция были некоторыми факторами, включенными в их отчет для рассмотрения при проектировании трубопроводов на большие расстояния. Уравнение (8) оптимизированного гидравлического диаметра является уравнением оптимизации затрат, не зависит от длины трубопровода и может быть пригодным для определения соответствующего диаметра трубопровода для конкретных объемов жидкости:

$$D_{opt} = 0,363 \cdot Q_v \cdot \rho \cdot \mu, \quad (8)$$

где D_{opt} – оптимальный внутренний диаметр (м); μ – вязкость газа (Па·с).

В случае, когда по трубопроводам ведется перекачка CO_2 в газообразном состоянии для определения объемного расхода CO_2 может быть применена формула (9), в которой используется удельный вес газа вместо плотности жидкости.

$$Q_v = 15485 \cdot \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{f \cdot L \cdot SG}} \cdot D^5, \quad (9)$$

где Q_v – расход газа ($\text{м}^3/\text{с}$); SG – удельный вес газа по отношению к воздуху; P_1, P_2 – начальное и конечное давления в трубопроводе (Па).

Модель V. Vandeginste и K. Piessens [27] включала эффекты изгибов вдоль трубопровода, хотя эффект был признан минимальным. Модель учитывала скорость потока, изменения давления, плотность жидкости, гравитационный эффект и высоту над уровнем моря. Они представили формулу Дарси–Вайсбаха для расчета диаметра после учета перепада высот (10). Это уравнение диаметра – гидравлическое уравнение, также является функцией длины трубопровода.

$$D = \left(\frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\rho \cdot \pi^2 \cdot [\rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2) + (P_1 - P_2)]} \right)^{1/5}. \quad (10)$$

Диаметр некоторых трубопроводов был рассчитан по формуле (10) и сопоставлен со значениями реальных диаметров трубопроводов [27]. Эти результаты показывают, что расчетные значения диаметра были последовательно меньше фактических диаметров трубопроводов. Одной из причин этого является то, что фактические диаметры трубопроводов являются доступными номинальными размерами труб с внутренним диаметром, равным или превышающим вычисленные значения.

В случае если расчетный диаметр больше наибольшего доступного стандартного диаметра, одного трубопровода будет недостаточно для транспортировки CO_2 с требуемым расходом, и уравнение (11) используется для расчета минимального необходимого количества трубопроводов.

$$N_{pipe} = \left\lfloor \frac{Q_v}{Q_{v,max}} \right\rfloor + 1, \quad (11)$$

где N_{pipe} – количество трубопроводов; $\left\lfloor \frac{Q_v}{Q_{v,max}} \right\rfloor$ – целое значение $\frac{Q_v}{Q_{v,max}}$, меньшее или равное прилагаемо-

му коэффициенту (величине); $Q_{v,max}$ – максимальный расход в трубопроводе с наибольшим диаметром ($\text{м}^3/\text{с}$). Там, где требуется более одного трубопровода, необходим экономический анализ для оптимизации размеров трубопроводов. Если трубопроводы $N_{pipe} - 1$ имеют диаметр $D_{i,max}$, то N -й диаметр трубы рассчитывается по уравнению (12):

$$D_{0_{N_{pipe}}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot [Q - (N_{pipe} - 1) \cdot Q_{v,max}]}{\pi \cdot V}}, \quad (12)$$

где $D_{0_{N_{pipe}}}$ – наружный диаметр N -го трубопровода (м); N_{pipe} – количество трубопроводов.

Падение давления вычисляется с помощью уравнения Бернулли (13) с присущим ему допущением постоянной скорости, которое пренебрегает потерями при ускорении:

$$P_1 - P_2 = 10^{-6} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_L + \Delta z), \quad (13)$$

где ρ – плотность сверхкритического CO_2 ($827 \text{ кг}/\text{м}^3$); h_L – потери напора (м); Δz – перепад высотных отметок трубопровода, м.

Трение является основной причиной потери напора и рассчитывается уравнением Дарси–Вайсбаха (14):

$$h_f = f \cdot \frac{l \cdot v^2}{2 \cdot D \cdot g}, \quad (14)$$

где h_f – потери напора на трение (м); l – расстояние между перекачивающими станциями (м); v – скорость флюида в трубопроводе (м/с).

Если пропускная способность трубопровода меньше полной, фактическая скорость потока жидкости рассчитывается по уравнению (2). Это применимо для негабаритных трубопроводов до ввода в эксплуатацию второй нитки. При перестановке после объединения уравнений (13) и (14), пренебрегая изменением высотных отметок, получаем уравнение (15) для расчета длины трубопровода. Уравнение (15) совпадает с уравнением (10):

$$l = \frac{\Delta P}{\rho \cdot f} \cdot \frac{2 \cdot D_i}{v^2}. \quad (15)$$

Коэффициент трения, который зависит от шероховатости трубы, внутреннего диаметра и турбулентности потока, вычисляется с помощью уравнения (16), уравнения Хааланда:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log_{10} \left[1,11 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_i} \right) + \frac{6,9}{Re} \right], \quad (16)$$

где ε – коэффициент шероховатости ($4,5 \cdot 10^{-5}$ м для новых труб, но в качестве расчета были использованы сверхгладкие трубы, предполагалось $\varepsilon = 4,5 \cdot 10^{-5}$ м); Re – число Рейнольдса; D_i – диаметр i -го участка (м).

Количество насосных станций определяется как отношение общей длины трубопровода L к расстоянию между насосными станциями l_i и вычисляется по уравнению (17):

$$N_{pump} = \frac{L}{l_i}, \quad (17)$$

где N_{pump} – количество насосных станций; l_i – количество секций трубопровода.

В конце трубопровода используется дополнительная насосная станция для повышения давления до

13 МПа для подачи отводов с трубопроводов. Уравнение для мощности насоса, необходимой для повышения давления жидкости обратно до 13 МПа, является уравнением (18) [43]:

$$W_{pump} = \frac{Q \cdot |P_i - P_{initial}|}{\eta_p}, \quad (18)$$

где η_p – КПД насоса, принимаемый равным 0,75; а W_{pump} – потребляемая мощность насоса (Вт); $P_{initial}$ – начальное давление на участке трубопровода (13 МПа); P_i – конечное давление (МПа) на участке трубопровода длиной l_i (м).

Входное давление 13 МПа для всех входов CO₂ может привести к «остановке потока», поскольку разница давлений (ΔP) между любыми двумя точками подвода CO₂ вдоль трубопровода будет равна нулю. Следует рассчитать давление потока CO₂ в любой дополнительной точке подключения ответвления и подачи дополнительного объема CO₂, а значит соответствующим образом определить входные давления. В качестве альтернативы непосредственно перед точками подключения может быть установлена дожимная станция для повышения давления до 13 МПа, что равно давлению входящего потока.

Международное энергетическое агентство [44] сообщает, что уравнение скорости (2) преобразуется в уравнение (19) путем приведения константы 4 к знаменателю, равному 0,25, и включения диаметра в формулу:

$$D = \left(\frac{Q_m}{v \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot \rho} \right)^{0,5}. \quad (19)$$

Перепад давления на длину ($\Delta P/L$) рассчитывается в три этапа. Сначала вычисляется число Рейнольдса, затем коэффициент трения μ , наконец, падение давления на единицу длины (20)–(22). Уравнение (22) совпадает с (15), но без высотной составляющей перепада давления. Максимальная длина трубопровода l_{max} между двумя станциями определяется уравнением (23). В данной работе мы рассматриваем только потери давления на трение:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}, \quad (20)$$

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}, \quad (21)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2}{\rho \cdot \pi^2 \cdot D^5}, \quad (22)$$

$$l_{max} = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P/L}. \quad (23)$$

В работе [38] была проанализирована транспортировка как газообразного, так и жидкого CO₂ – с давлением от 3 до 16 МПа для газообразного CO₂ и с давлением от 24 до 90 МПа для жидкого CO₂. Для жидкостных линий была установлена высокая скорость эрозии 6 м/с с минимальной скоростью 0,5 м/с для обеспечения потока. Уравнение (24), необходимое для оптимизации затрат, используется для расчета удельного перепада давления, которое затем используется для расчета диаметра трубопровода. Для вычисления изменения давления в зависимости от

диаметра необходимы уравнения (24) и (25), которые являются функциями длины трубопровода:

$$\Delta P_{design} = \frac{(P_1 - P_2) \cdot (\eta_{насоса} + 1)}{L} + \frac{g \cdot \rho \cdot \Delta z}{L}, \quad (24)$$

$$D = \left\{ \frac{G \cdot z_{ave} \cdot T_{ave} \cdot Q^2 \cdot f \cdot L \cdot \eta_{трубы}^2}{a_1 \left[\left(\frac{P_1}{1000} \right)^2 - \left(\frac{P_2}{1000} \right)^2 - (a_2 \cdot G \cdot \frac{P_{ave}}{1000} \cdot z_{ave} \cdot T_{ave} \cdot \Delta h) \right]} \right\}^{1/5}, \quad (25)$$

где G – удельный вес трубопровода (1,519); $\eta_{трубы}$ – КПД трубопровода (предполагается равным 1,0); a_1 и a_2 константы, равные 73,06 и 0,006836, соответственно.

Lazic T. и др. [15] разделили уравнения диаметра на основанные на турбулентном потоке (22) и основанные на скорости (2). Также было приведено уравнение для перепада давления жидкости (15). Они заявили, что падение давления как для жидкой, так и для газообразной фаз может быть рассчитано с помощью уравнения (15).

S.B. Martynov др. [40] добавили изменения давления из-за влияния высоты в уравнение (15), чтобы получить уравнение (26), которое совпадает с уравнением (22):

$$\Delta P = \frac{8 \cdot f \cdot Q_m^2 \cdot L}{\rho \cdot \pi^2 \cdot D^5} + \rho \cdot g \cdot \Delta z. \quad (26)$$

В более ранних работах K. Kang и др. [12] провели поиск оптимального диаметра трубопровода, количества дожимных станций и общей стоимости трубопроводов CO₂. Они обнаружили, что наименьший диаметр дает неоправданно большое количество дожимных станций, тем самым увеличивая стоимость проекта. На рис. 3 показано падение давления в зависимости от диаметра трубопровода. Линии на рис. 3 нанесены с разными параметрами, но обе линии показывают, что удвоение диаметра трубопровода уменьшило падение давления примерно до 4 % от первоначального значения. Для проектирования станций вдоль трубопровода задается минимальное давление. Рассчитывается расстояние для снижения давления до минимального значения и устанавливается перекачивающая станция.

В работе [45] были рассмотрены четыре различных сценария улавливания и транспортировки CO₂ для двух трубопроводов, которые объединились в один вдоль транспортного маршрута. Был сделан вывод о том, что при проектировании трубопроводов CO₂ важно точно моделировать профиль давления, изменения фаз жидкости и состав потока жидкости. Температура и давление могут изменяться вдоль трубопровода в результате потерь давления на трение, работы по расширению, выполняемой текущей жидкостью, и теплообмена между жидкостью и окружающей средой. Общий коэффициент теплопередачи приведен в уравнении (27)

$$\alpha = \left[\frac{1}{\alpha_f} + \frac{D}{2 \cdot \lambda_w} \ln \left(\frac{\left(\frac{D_0}{D} \right) + \frac{D}{\lambda_{ins}} \cdot \ln \left(\frac{D_0 + \delta_{ins}}{1} \right) + \frac{D}{2 \cdot \lambda_{soil}} \left(\frac{d_{soil}}{D} \right) + \frac{1}{\alpha_{amb}} \frac{D}{2 \cdot d_{soil}}} \right) \right]^{-1}, \quad (27)$$

где α – общий коэффициент теплопередачи (Вт·м⁻²·К⁻¹); λ_w – теплопроводность стенки трубы (Вт·м⁻¹·К⁻¹); λ_{ins} – теплопроводность изоляции (Вт·м⁻¹·К⁻¹);

λ_{soil} – теплопроводность окружающей среды ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$);
 α_f – коэффициент теплопередачи внутренней по-

верхности трубы ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$); α_0 – коэффициент теплопередачи внешней поверхности трубы ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$).

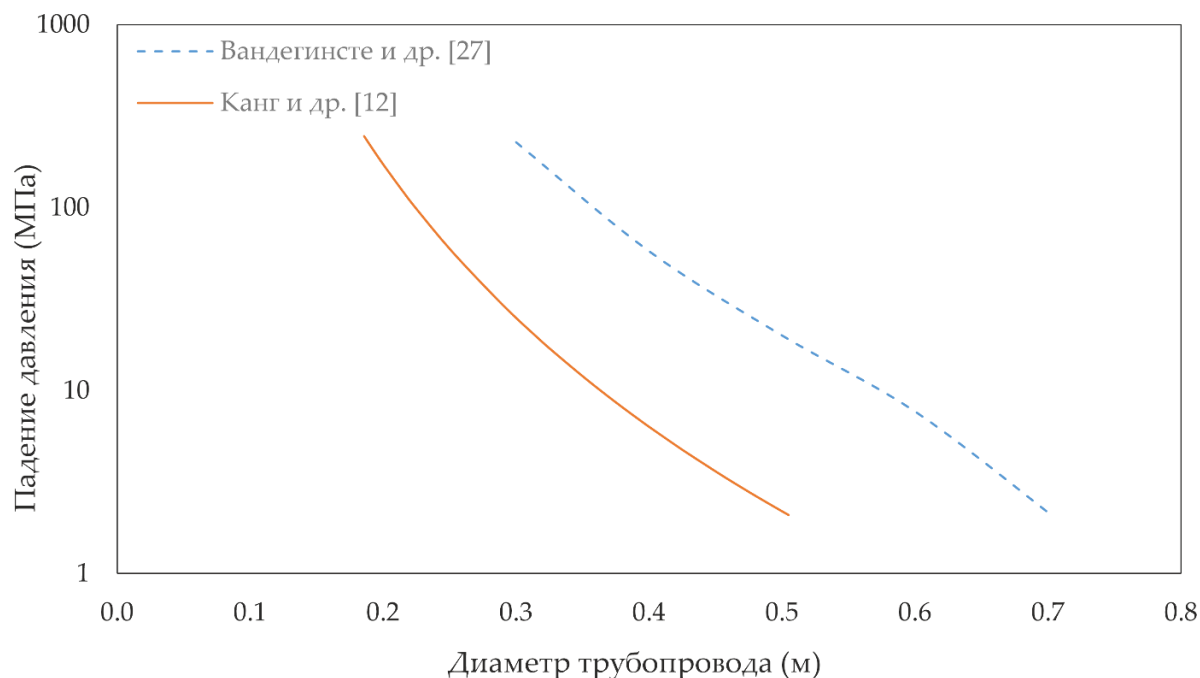


Рис 3. Зависимость перепада давления от внутреннего диаметра [12, 27]

Fig. 3. Dependence of pressure drop on the inner diameter [12, 27]

Модель S. Brown и др. [45] учитывала влияние трения, теплового потока или теплопередачи между жидкостью и окружающей средой, температуры и теплопроводности почвы на транспортируемый поток.

G. Skaugen и др. [46] заявили, что теплопроводность грунта и температура окружающей среды влияют на падение давления в трубопроводе и очень важны для точного моделирования. Сочетание более высокой теплопроводности грунта и более низких температур окружающей среды снижает температуру текущей жидкости и приводит к снижению удельных энергозатрат. Также в данной работе было заявлено, что для малых диаметров трубопроводов отвод тепла, выделяющегося при сжатию CO_2 , будет меньше в силу меньшей площади поверхности, в результате чего вероятность перехода потока диоксида углерода в газообразное состояние будет выше. Однако предполагаемое минимальное давление в 9 МПа удерживало бы жидкость в сверхкритическом состоянии. Уравнение потери давления по длине (28) – это уравнение, представленное с различными параметрами:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = -f \cdot \frac{M^2}{2 \cdot \rho \cdot D'} \quad (28)$$

где M – массовый расход ($\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \cdot \text{с}$); $\frac{\Delta P}{\Delta L}$ – потеря давления на единицу длины ($\frac{\text{Па}}{\text{м}}$).

Транспортировка углекислого газа танкерами

Как показывает практика, выбор метода транспортировки углекислого газа зависит от длины маршрута доставки – в то время как трубопроводы более рентабельны на коротких расстояниях, на более дальних

маршрутах, превышающих 300 км, суда считаются более выгодными. В дополнение к этому не всегда и не везде прокладка трубопровода возможна и не только с экономической точки зрения, но и с технической, в связи с этим немаловажной частью цепочки утилизации углекислого газа после трубопровода является использование танкеров [47].

В настоящее время существуют японские и европейские проекты, находящиеся на стадии реализации и использующие перевозчики LCO_2 для транспортировки и хранения.

Преимуществом морских перевозок является гибкость в отношении следующих аспектов:

- несколько мест отгрузки диоксида углерода с последующей закачкой;
- возможность переноса места закачки в случае прекращения добычи нефти или заполнения участка CO_2 .
- экономическая выгода по сравнению с прокладкой трубопровода, когда место закачки расположено далеко от берега или удалено от берегового объекта и находится на шельфе;
- места закачки, где прокладка нового трубопровода может быть сложной/дорогой из-за наличия различных препятствий или ранее проложенных трубопроводов на морском дне;
- способность контролировать закачку CO_2 путем корректировки размера судна (т. е. грузоподъемности) или частоты отгрузки;
- отсутствие необходимости в дорогостоящем демонтаже трубопроводов в случае прекращения добычи нефти или заполнения объекта CO_2 .

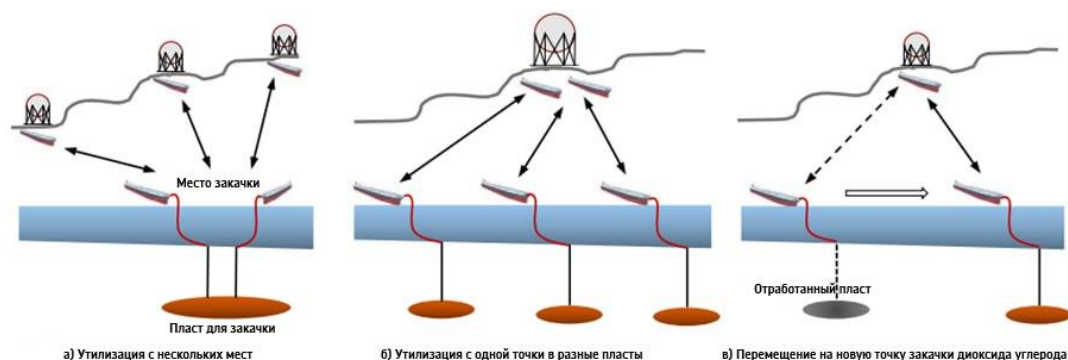


Рис. 4. Схема гибкости судов к одному/нескольким морским местам закачки из одного/нескольких портов отгрузки [47]

Fig. 4. Scheme of flexibility of vessels to one/several sea injection sites from one/several ports of shipment [47]

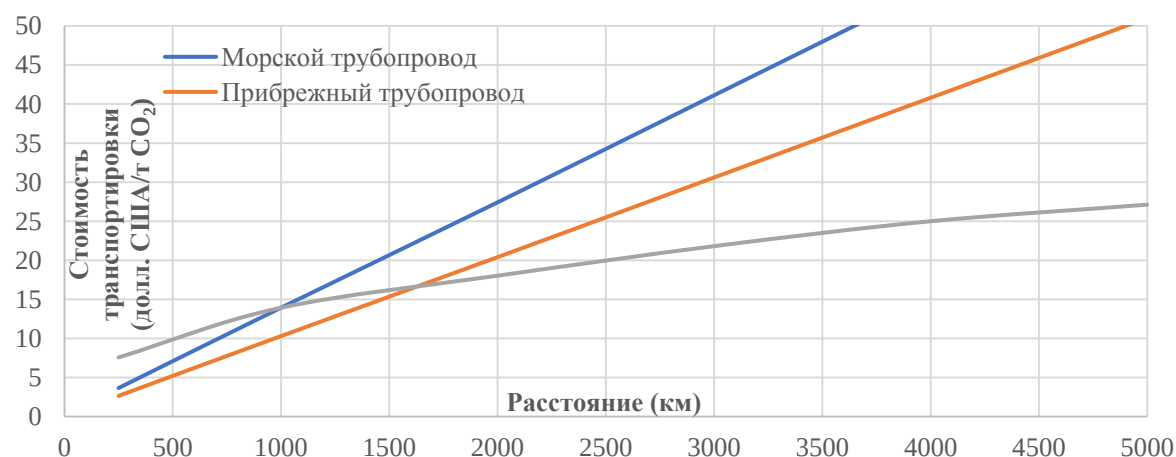


Рис. 5. Выбор метода транспортировки CO_2 в зависимости от расстояния [47]

Fig. 5. Selection of the CO_2 transportation method depending on distance [47]

Танкера активно используются в перевозках крупных коммерческих сжиженных газов. Жидкое или жидкостно-охлажденное состояние CO_2 носит техническое название «жидкая углекислота», или просто «углекислота». Это бесцветная жидкость без запаха, средней плотностью 771 кг/м^3 , которая существует только под давлением от 482 до 519 кПа при температуре от 0 до $-56,5^\circ\text{C}$ («низкотемпературная углекислота») [48].

Важно отметить, что использование танкеров в морских перевозках на данный момент развито слабо, что связано в первую очередь с ограниченным спросом (абсолютное большинство магистральных трубопроводов, эксплуатируемых для транспорта CO_2 , находится в США и Канаде). Развитие системы утилизации углекислого газа повлечет за собой увеличение как количе-

ства флота для перевозки CO_2 , так и размеров самих танкеров, что вполне возможно при сопоставлении с габаритами газозовов и, соответственно, емкостей для сжиженных углеводородных газов (СУГ), которые по параметрам хранения схожи с жидким диоксидом углерода. Методология проектирования грузовых танкеров СУГ хорошо известна и регулируется международными стандартами (в частности, Международным кодексом постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом).

Роль танкеров в системе утилизации диоксида углерода показана ниже и заключается в транспортировке жидкой углекислоты и дальнейшей утилизации либо для повышения нефтеотдачи, либо просто для утилизации в море или закачки в пласт.

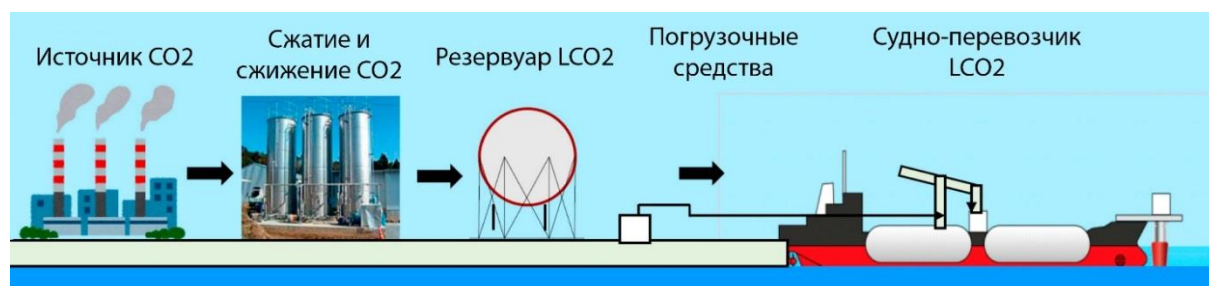


Рис. 6. Структура утилизации CO_2 с задействованием танкеров [49]

Fig. 6. Structure of CO_2 utilization involving tankers [49]

Таблица 4. Основные технические характеристики LCO₂ [50]

Table 4. Main technical characteristics of LCO₂ [50]

Судовое оборудование Marine equipment		Значение Value
Корпус/Hull	Длина максимальная, м Maximum length, m	94,2
	Длина по ватерлинии, м Waterline length, m	89,6
	Ширина, м/Width, m	14,6
	Осадка максимальная, м Maximum draft, m	6,9
	Осадка проектная, м Draft design, m	5,6
Энергоэффективность судна Energy efficiency of the vessel	Боковые винты, кВт Side screws, kW	1150
	Азимутальный винт, кВт Azimuth screw, kW	3000
	Генератор энергии (дизель), кВт Power generator (diesel), kW	3500
Скорость корабля Ship speed	Узлы/Nodes	15,0
Вместимость Capacity	Объем хранения, м ³ Storage volume, m ³	3000
Размеры емкости хранения Storage capacity dimensions	Радиус одного цилиндра, м Cylinder radius, m	3,50
	Общая длина цилиндра, м Cylinder total length, m	26,96

В табл. 4 приведены размеры одного из концептов танкера для перевозки жидкого диоксида углерода, на базе которого детально рассмотрим строение судов LCO₂ [49, 50]. В табл. 5 приведены условия для танкера CO₂.

Таблица 5. Расчетные условия для танкера CO₂ и грузового танка [49]

Table 5. Design conditions for a CO₂ tanker and a cargo tank [49]

Параметр Parameter name	Условие проектирования Design condition
Температура жидкости Liquid temperature	–10 °C
Давление паров жидкости Liquid vapor pressure	2,65 МПа/MPa
Повышение давления LCO ₂ Increase in LCO ₂ pressure	около 0,1 МПа после трехдневной продолжительности about 0,1 MPa after three day duration
Максимальное рабочее давление Maximum operating pressure	2,8 МПа/MPa
Количество танков Number of tanks	Две единицы Two units
Объем бака/Tank capacity	1500 м ³ /m ³
Расчетное давление бака (равно давлению предохранительного клапана) Design pressure of the tank (equal to the pressure of the safety valve)	3,10 МПа/MPa

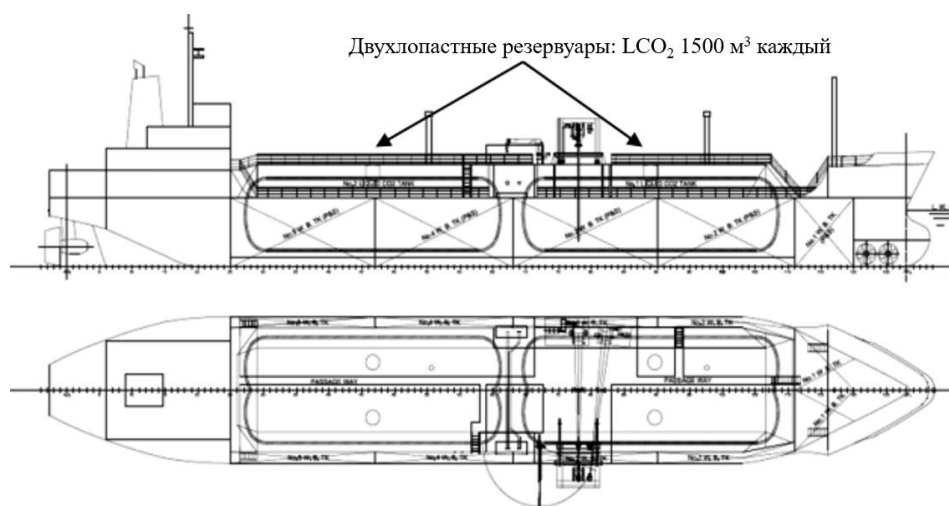
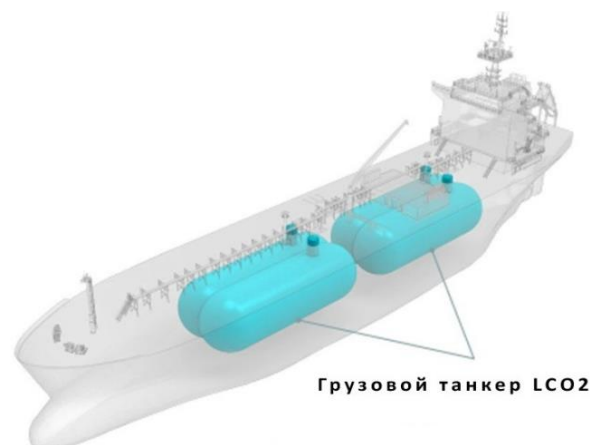


Рис. 7. Схема танкера LCO₂

Fig. 7. LCO₂ tanker diagram



Корабль оборудован двумя единицами резервуаров для хранения LCO₂, удерживает свое положение в одной точке во время операции заправки в море с помощью системы динамического позиционирования (dynamic positioning systems – DPS), состоящей из одного азимутального гребного винта (на корме корабля) и двух боковых подруливающих устройств (на носу корабля).

Рис. 8. Общий вид танкера LCO₂ [49]

Fig. 8. General view of the LCO₂ tanker [49]

Материалом резервуаров служит закаленная и отпущенная углеродистая сталь для использования при низких температурах. Прочность на растяжение 795 Н/мм^2 , предел текучести 685 Н/мм^2 согласно JIS SHY685 (использование при минус 10°C).

Конструкция грузовых танков должна соответствовать Международному кодексу постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом, также известному как код IGC. Этот код использовался в качестве основы для проектирования грузовых танков для сжиженного нефтяного газа (СНГ) с 1960-х гг., следует отметить, что классификационные общества уже включили соображения по двуокиси углерода в свои правила проектирования [49].

Выбор расчетного давления грузовой емкости определяется давлением паров углекислого газа при -10°C с эксплуатационным и безопасным запасами; для обеспечения возможности повышения давления во время рейса и для обеспечения работы предохранительных клапанов грузовых танков. Первоначальная концепция проекта заключалась в том, чтобы обеспечить примерно до трех дней плавания между погрузкой и разгрузкой груза. Используя отраслевые стандарты для типа и толщины изоляции, можно рассчитать количество тепла, поступающего в грузовые танки за трехдневное плавание, и определить, что толщина изоляции 250 мм достаточна для трехдневного плавания [51–53].

Общепринятой отраслевой практикой является обеспечение запаса прочности в 10 % для срабатывания предохранительных клапанов, поэтому расчетное давление грузовых танкеров определено равным

$3,1 \text{ МПа}$. Отмечается, что поступление тепла в грузовые танки рассчитано при температуре окружающего воздуха 45°C и температуре окружающего моря 32°C . Эти условия являются наиболее строгими, чем нормальные условия окружающей среды на побережье Японии. В результате данного исследования было выявлено, что танкер для углекислого газа, который будет загружаться при $2,65 \text{ МПа}$ и при температуре до -10°C , сможет транспортировать углекислый газ до трех дней, в течение которых поступление тепла из окружающей среды вызовет нагрев транспортируемого углекислого газа, что приведет к увеличению давления на $0,15 \text{ МПа}$ и результирующего давления в танках до $2,8 \text{ МПа}$. Затем углекислый газ будет выгружен с достаточным запасом между максимальным рабочим давлением и давлением сброса предохранительного клапана, равным $3,1 \text{ МПа}$. Эта конструкция жизнеспособна и соответствует существующим стандартам для проверенных конструкций в отрасли морского транспорта сжиженных газов.

Сжатый и нагретый CO_2 подается в процессе закачки к устьевому оборудованию, установленному на морском дне в точке нагнетания, после чего закачивается в подземную геологическую формацию с плановой скоростью, установленной для каждой скважины, при этом скорость закачки контролируется клапанами управления потоком (с электрическим управлением), установленными на устье скважины. Сигналы данных о дебите поступают с устья скважины в систему управления закачкой на CO_2 челночный танкер для мониторинга и контроля условий закачки [52].

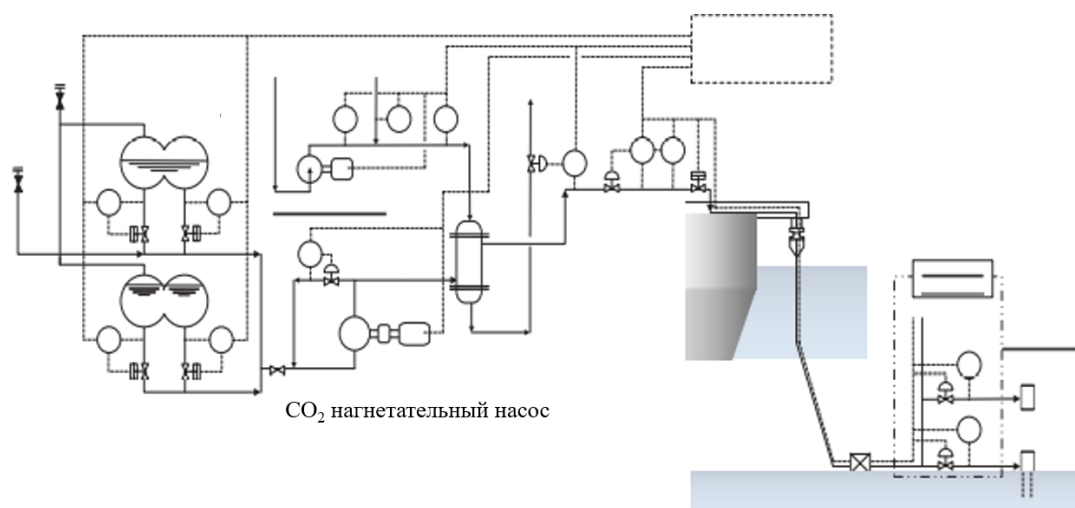


Рис. 9. Технологическая схема отгрузки CO_2 [49]

Fig. 9. Technological scheme of CO_2 shipment [49]

Рассмотрим анонсированные проекты по строительству танкеров LCO_2 . Mitsubishi Heavy Industries (MHI) объявила о планах построить первое в своем роде судно для транспортировки сжиженного диоксида углерода (LCO_2) специально для инициатив по CCS [51].

Корабль будет построен на заводе MHI Shimonoseki Shipyard & Machinery Works для Sanyu

Kisen Co, а поставка запланирована на вторую половину 2023 г.

Хотя суда для перевозки LCO_2 , используемые в пищевой промышленности, ранее строились и эксплуатировались в Европе и Японии, считается, что это новое судно станет первым в мире транспортным средством LCO_2 , специально предназначенным для улавливания, утилизации и хранения углекислого газа.



Рис. 10. Проект LCO₂ Mitsubishi Heavy Industries [54]

Fig. 10. LCO₂ Mitsubishi Heavy Industries Project [54]

На 2024 г. запланирована сдача в эксплуатацию двух судов согласно контракту компании Northern Lights (совместное предприятие Shell, Equinor и TotalEnergies) и китайской верфи Dalian Shipbuilding Industry. Данный проект интересен также из-за планируемого снижения выбросов углекислых газов на 34 % за счет внедрения двигателей, работающих на СПГ. Построенные суда будут перевозить сжиженный углекислый газ с промышленных площадок в Европе на терминал в Эйгардене (Норвегия). Для контроля деятельности судов была создана первая в мире судоводная компания Dan-Unity CO₂, специализирующаяся на перевозках сжиженного углекислого газа [55].

Также Shipbuilding & Offshore Engineering сообщает, что ее верфь Hyundai завершит разработку прототипа крупнейшего в мире перевозчика CO₂ к концу этого года – судно вместимостью 74000 м³, которое сможет перевозить сжиженный углекислый газ [56].

В рамках нового проекта помимо увеличения размера концептуального судна Shipbuilding & Offshore Engineering будут работать над модернизацией системы хранения грузов и системы грузовых операций на основе информации и проектов, разработанных в прошлом году. Кроме того, судно должно быть оборудовано силовой установкой, работающей на сжиженном природном газе, которая будет разработана в соответствии с экологическими нормами для максимальной грузоподъемности за счет применения в общей сложности девяти цилиндрических резервуаров.

KSOE и NHI спроектируют судно и планируют построить прототип после получения одобрения проекта. Поставщик логистических услуг Hyundai Glovis и G-Marine Service будут управлять отгрузкой сжиженного углекислого газа, а классификационное общество ABS и международные регистры реестра Маршалловых островов будут проверять безопасность судна. Они предоставят консультационные услуги для проверки устойчивости и пригодности конструкции на основе международного соглашения о перевозчиках сжиженного газа, требуемого Международной морской организацией [56].

В апреле 2022 г. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering получила одобрение на проект того, что, по ее словам, станет крупнейшим из когда-либо разработанных перевозчиков сжиженного CO₂. ABS рассмотрела и утвердила проект, предусматривающий производительность 70000 м³ LCO₂ [57].

Одним из самых последних инновационных проектов является соглашение между классификационным обществом DNV и Либерийским международным судовым и корпоративным регистром (LISCR) с южнокорейскими судостроительными компаниями: Hyundai Heavy Industries (HHI) и Korea Shipbuilding & Offshore Engineering CO. Соглашение включает в себя новую конструкцию танкера для транспортировки сжиженного углекислого газа (LCO₂) вместимостью 40 тыс. м³ и семь грузовых танков IMO типа «С» [58]. В табл. 6 приведена сводная информация по развитию проектов танкеров LCO₂.

Обсуждение

Уравнения изменений диаметра и давления, по существу, оставались неизменными на протяжении многих лет. Уравнения определения оптимального диаметра трубопровода можно разделить на две широкие категории. Первая категория не зависит от длины трубопровода (2) и (17), а вторая категория зависит от длины трубопровода (16), (18), (20) и (21). Уравнения, которые являются функциями длины трубопровода, не подходят для определения оптимального диаметра трубопровода. Это связано с тем, что значение диаметра увеличивается с увеличением длины трубопровода. Диаметр трубопровода может быть рассчитан с помощью этих уравнений только после указания длины трубопровода или расстояния между его интересующими нас сечениями при заданных перепадах давления. Этот диаметр, однако, не был бы оптимальным. Оптимальный диаметр трубы является результатом экономических соображений при наименьших затратах (капитальные и эксплуатационные затраты) [48]. Диаметр трубопровода должен зависеть от расхода, плотности и максимальной скорости [27], но не зависеть от длины трубопровода.

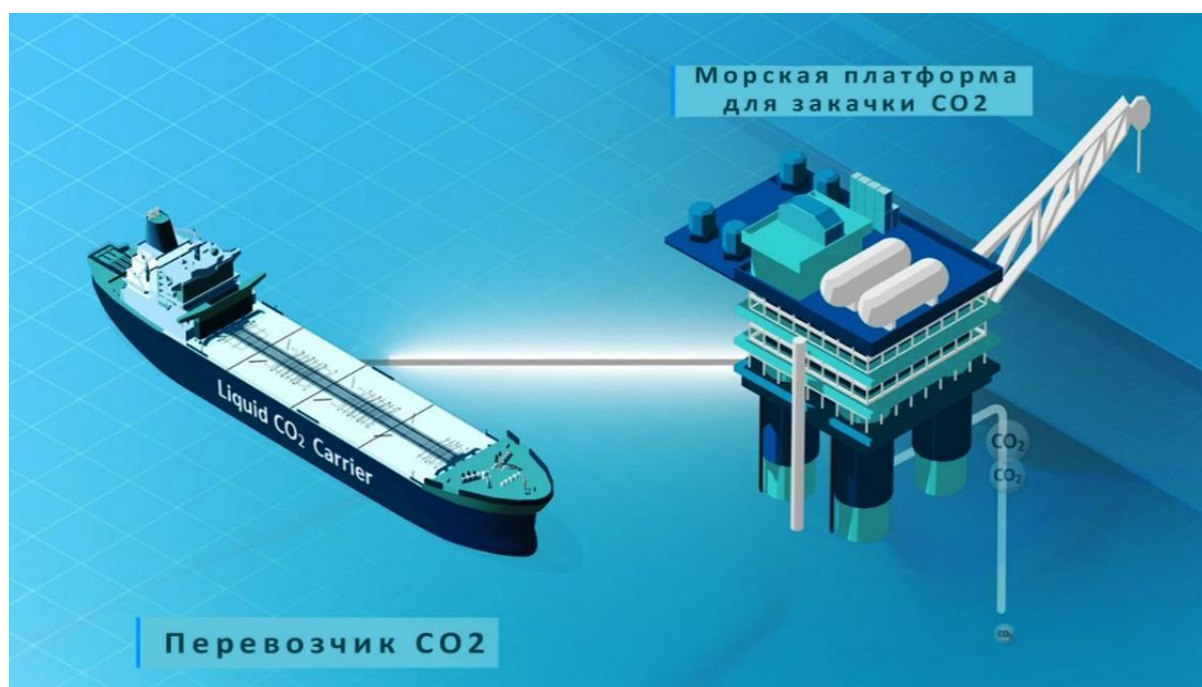


Рис. 11. Проект LCO₂ Hyundai Heavy Industries (HHI) и Korea Shipbuilding & Offshore Engineering CO [55]

Fig. 11. LCO₂ project of Hyundai Heavy Industries (HHI) and Korea Shipbuilding & Offshore Engineering CO [55]

Таблица 6. Сводная информация по развитию проектов танкеров LCO₂ [59, 60]

Table 6. Summary information on the development of LCO₂ tanker projects [59, 60]

Проекты на стадии ПД или выходящие на строительство Projects at the PD stage or coming to construction				
Производители Producer	Где строят Place of construction	Габариты, м Dimensions, m	Вместимость, м ³ Capacity, m ³	Срок сдачи Deadline for delivery
Sanyu Kisen	Mitsubishi Shipbuilding Co	72×12,5×4,55	1450	2023
Northern Lights	Dalian Shipbuilding Industry (DSIC)	Длина 130 м Length 130 m	7500	2024
DNV и Либерийский международный судо- вой и корпоративный регистр (LISCR) DNV and the Liberian International Ship and Corporate Register (LISCR)	Hyundai Heavy Industries и Korea Shipbuilding & Offshore Engineer- ing CO	239×30×21	30 000	–
Концепты/Concepts				
Компании/Companies		Вместимость, м ³ /Capacity, m ³		
Hyundai Heavy Industries Group (HHI) и Морской администратор Республики Маршалловы Острова (RMI) Hyundai Heavy Industries Group (HHI) and the Maritime Administrator of the Re- public of the Marshall Islands (RMI)		70000		
Korean Register (KR) и Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME)		40000		
Японская судоходная компания Mitsui OSK Lines (MOL), Японская организа- ция по развитию новых энергетических и промышленных технологий (NEDO) Japanese shipping company Mitsui OSK Lines (MOL), Japanese Organization for the Development of New Energy and Industrial Technologies (NEDO)		≈50000		

Уравнения, которые не зависят от длины трубопровода (2) и (17), подходят для выбора размера оптимального диаметра трубопровода. Моделирование осуществлялось в программном обеспечении Pipesim путем установки неизмененного расхода в 300 кг/с при различных внутренних диаметрах трубопровода. В программном комплексе было установлено неизменное значение толщины теплоизоляционного покрытия, исходя из возможности обеспечения безопасной эксплуатации трубопровода и отсутствия выпадения по длине твердой фазы при резком охлаждении транспортируемой продукции. Для расчета теплопередачи помимо исходных данных температуры и давления на входе в трубопровод (20 °С, 150 бар.) были

заданы температура окружающей среды 16 °С, скорость ветра 2,6 м/с. Перепад высот между конечной и начальной точками был принят равным 0. Таким образом осуществляется моделирование движения жидкостного потока CO₂ по трубопроводу и соответственно получается распределение давления, скорости, плотности, соотношения жидкой и газообразных фаз потоков и так далее, в зависимости от диаметров, влияния теплопередачи, учета сил диссипации и прочих факторов, влияющих на термодинамические и гидравлические характеристики потока. Анализируя существующие зависимости на численных моделях в ПО Pipesim, изменяя значения диаметров, расхода и т. д., можно сделать вывод, что уравнение (17) счита-

ется более точным и рекомендуется к использованию по сравнению с уравнением (2). После определения оптимального диаметра расстояние, на котором давление падает до заданного минимума, вычисляется с помощью уравнений, которые являются функциями длины трубопровода для сооружения перекачивающих станций. Следует отметить, что рассчитанный оптимальный диаметр – это минимальный внутренний диаметр трубопровода, соответствующий объему транспортируемой жидкости. Это значение может не соответствовать имеющимся в нормируемой номенклатуре сортаментам. Выбранный размер трубы – это наименьший сортament с внутренним диаметром, который больше или равен рассчитанному оптимальному значению, и это значение используется в дальнейших расчетах. Значения, полученные

с помощью уравнения (14), являются слишком низкими, что приводит к высоким скоростям потока. Уравнение (15) (то же, что уравнения (7) и (22)) можно было бы переставить для вычисления диаметра. Основные зависимости и распределения представлены на рис. 12–14. Также стоит отметить, что скорость жидкости увеличивается вдоль направления потока по мере расширения жидкости из-за снижения давления в силу закона сохранения массового расхода, но не в одной из рассматриваемых моделей не учитывается эффект ускорения жидкости, возникающий вследствие воздействия данного фактора. На основании вышеизложенного материала и проведенных расчетов была сформирована точностная проверка формул диаметра трубопровода, представленная в табл. 7.

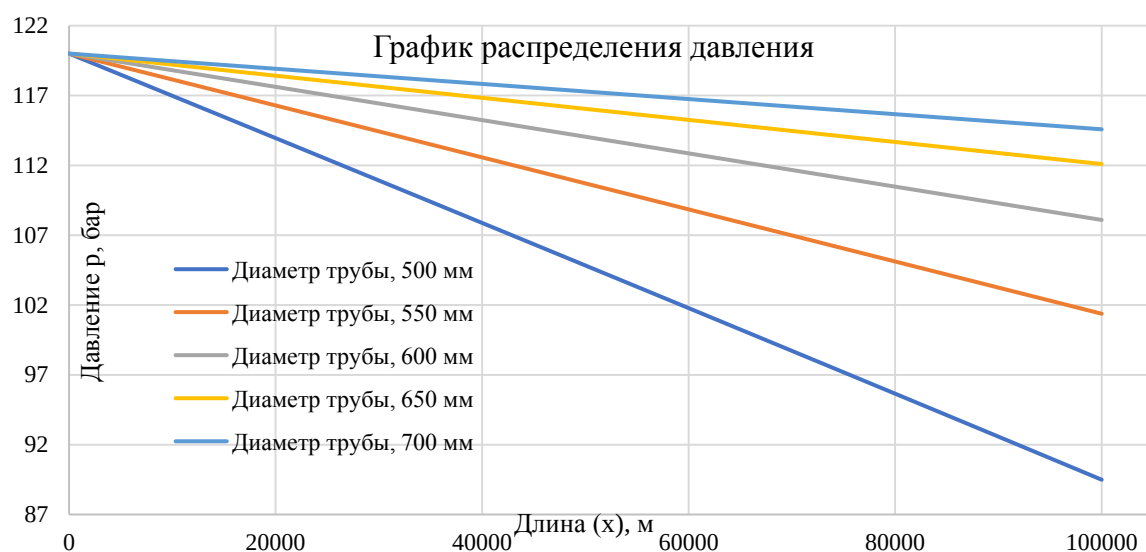


Рис. 12. График распределения давления потоков CO_2 по трубопроводам в зависимости от диаметров

Fig. 12. Graph of pressure distribution of CO_2 flows through pipelines depending on diameters

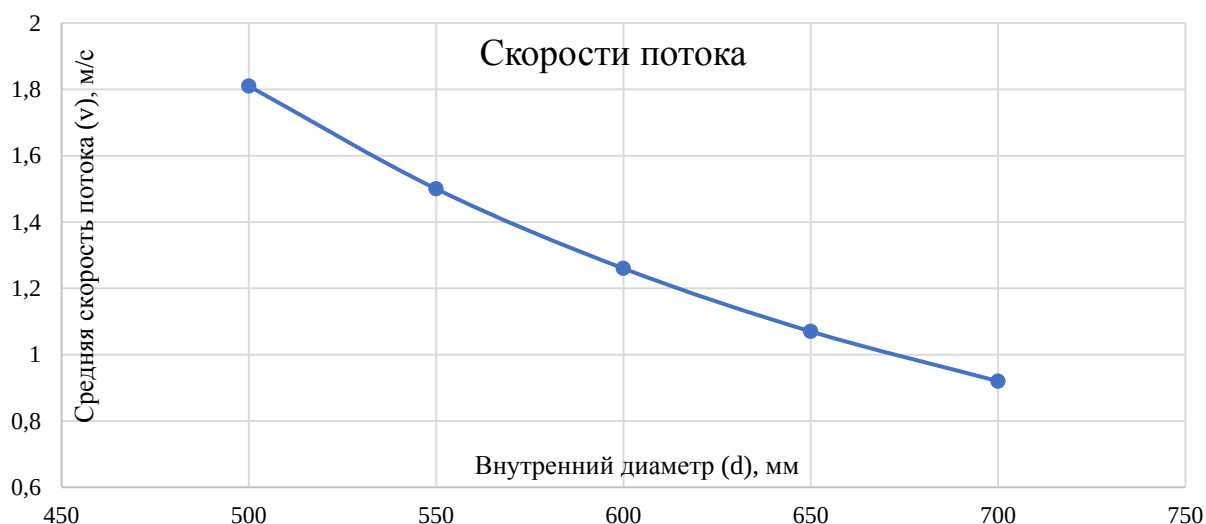


Рис. 13. График распределения скорости потоков CO_2 по трубопроводам в зависимости от диаметров

Fig. 13. Graph of velocity distribution of CO_2 flows through pipelines depending on diameters

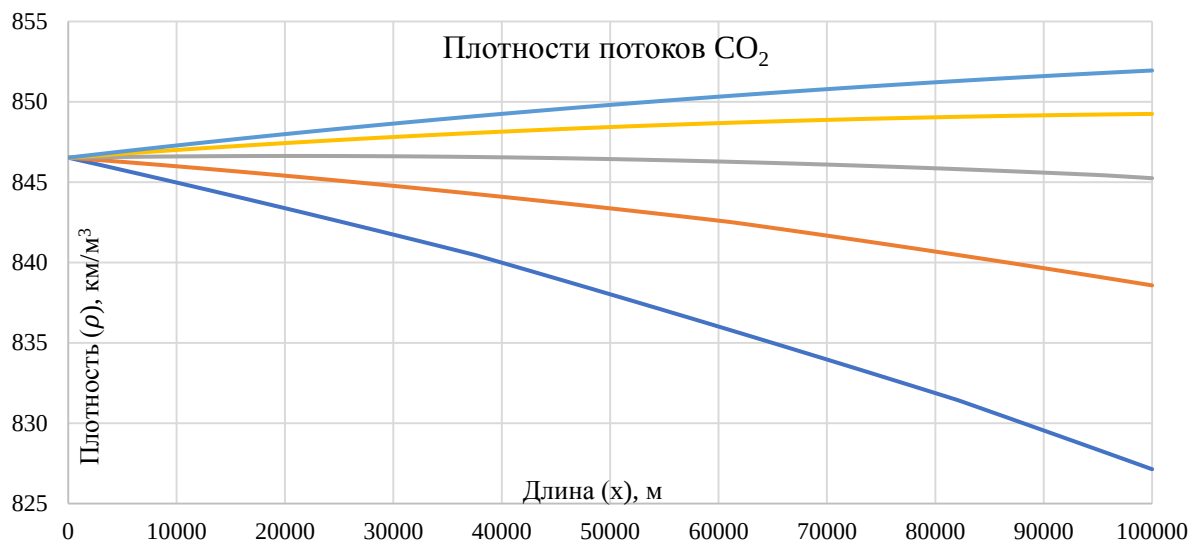


Рис. 14. Распределение плотностей потоков CO_2 в зависимости от диаметров и влияния внешней и внутренней теплопередач

Fig. 14. Distribution of CO_2 flux densities depending on diameters and the influence of external and internal heat transfer

Таблица 7. Точностная проверка формул для вычисления диаметра LCO_2 трубопровода

Table 7. Precision verification of formulas for calculating the diameter of the LCO_2 pipeline

№ уравнения Equation no.	Ссылка Reference	Формула диаметра D_i , (м) Diameter D_i , formula (m)	Значение диаметра D_i , (м) Diameter value D_i (m)	Мин. скорость флюида Min. fluid velocity
(2)	[20]	$\left(\frac{4 \cdot Q_v}{v \cdot \pi}\right)^{0.5}$	0,3722	3,93
(14)	[17]	$\left[2,252 \cdot f \cdot L \cdot \rho \cdot \frac{Q_v^2}{\Delta P}\right]^{1/5}$	0,1685	6,629
(17)	[26]	$0,363 \cdot Q_v \cdot \rho \cdot \mu$	0,460	2,562
(20)	[27]	$\frac{8 \cdot f \cdot Q_v^2 \cdot L}{\rho \cdot \pi^2 \cdot [\rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2) + (P_1 - P_2)]}$	0,6667	1,222
(27)	[27]	$\frac{v^2 \cdot \rho \cdot f \cdot L}{2 \cdot \Delta P}$	0,6667	1,222
(35)	[32]	$\left(\frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q_m^2}{\rho \cdot \pi^2 \cdot \Delta P}\right)^{1/5}$	0,6667	1,222
(40)	[44]	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = -f \cdot \frac{M^2}{2 \cdot \rho \cdot D_i}$	0,6667	1,222

Выводы

Были рассмотрены многие аспекты проектирования трубопроводов для CO_2 , присутствующие в литературе, с акцентом на доступные модели, необходимые для определения диаметра трубопровода. Были определены две широкие категории уравнений для определения диаметра трубопровода. Уравнения первой категории не учитывают длину трубопровода для расчета диаметра, в то время как уравнения второй категории зависят от длины трубопровода. Уравнения диаметра, которые являются функциями длины трубопровода, не следует использовать для первоначального определения оптимального диаметра трубопровода, поскольку значение диаметра изменяется с изменением длины трубопровода. Уравнения диаметра, которые не зависят от длины трубопровода, следует использовать для выбора соответствующего диаметра трубопровода при известных объемах жидкости, подлежащих транспортировке, прежде чем использовать уравнения, зависящие от длины, для определения расстояний трубопровода и, как следствие, для уста-

новки перекачивающих станций. В ходе этого обзора было выявлено следующее:

- Примеси влияют на изменения плотности, давления и температуры, критического давления, критической температуры и вязкости, но большинство моделей игнорируют влияние примесей. Таким образом, значения потерь давления, рассчитанные с учетом чистого CO_2 , будут неточными.
- Точное определение плотности и вязкости жидкости CO_2 с примесями повысит точность моделей диаметра трубопровода и перепада давления.
- Скорость жидкости в трубопроводе рассчитывается на входе – это минимальное значение в трубопроводе. Максимальная скорость возникает в конце участка трубопровода, что должно быть учтено при проведении моделирования, чтобы избежать превышения скоростей потока над эрозийным значением. Однако ни в одной из представленных и рассмотренных моделей не осуществляется учет потери давления из-за ускорения жидкости по причине изменения термобарических условий в разных сечениях трубопровода.

- Уравнения диаметра, зависящие от длины трубопровода, не подходят для оценки оптимального диаметра трубопровода. Эти уравнения оценивают значение диаметра, увеличивающиеся с увеличением длины трубопровода.

Что же касается альтернатив для трубопроводного транспорта, то в первую очередь стоит отметить возможность перевозки CO₂ танкерами на большие расстояния. На данный момент происходит только этап развития и дальнейшего становления системы танкерных перевозок углекислого газа, однако по мере развития технологий улавливания и утилизации крупных объемов диоксида углерода появляется

необходимость обеспечения перевозок на сверхдальние расстояния, что заметно при анализе концептов танкеров LCO₂, которые по габаритам в ближайшем будущем сравнятся с судами для перевозки сжиженных углеводородных газов.

Важно отметить, что сама технология транспортировки сжиженного углекислого газа танкерами мало отличается от аналогов транспорта СУГ. Также стоит упомянуть, что драйвером роста танкерного флота служит не только необходимость транспорта больших объемов, но и востребованность углекислого газа на морских объектах, закачка которого в пласт является одним из распространенных методов повышения нефтеотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate change 2007 – impacts, adaptation and vulnerability / M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. – 987 p.
2. IEA GHG. Global CO₂ emissions rebounded to their highest level in history in 2021. – Cheltenham, UK: IEA Environmental Projects Ltd, 2002. – 735 p.
3. Перспективы развития индустрии улавливания, использования и хранения углерода в России / И.М. Ванчугов, В.В. Жаркова, Сунь Фачжань, Р.А. Шестаков // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27. – № 8. – С. 42–49.
4. Получение СПГ как метода утилизации ПНГ / И.М. Ванчугов, К.С. Резанов, С.М. Ватузов и др. // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2023. – № 2 (134). – С. 70–75.
5. Дизайн пилотного проекта улавливания и хранения углерода на примере Салымской группы месторождений – от геологии до обустройства / Д.И. Жигулина, М.Ю. Прудский, Б.В. Малышев и др. // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 12. – С. 64–69.
6. Munkejord S.T., Hammer M., Løvseth S.W. CO₂ transport: data and models – a review // Appl. Energy. – 2016. – № 169. – P. 499–523.
7. CO₂-mixture properties for pipeline transportation in the CCS process / M. Mazzocolli, G. De Guido, B. Bosio, E. Arato, L.A. Pellegrini // Chem. Eng. Trans. – 2013. – № 32. – P. 1861–1866.
8. Special report on renewable energy sources and climate change mitigation / O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T.L. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer et al. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. – 1059 p.
9. Блябляс А.Н. Особенности транспорта углекислого газа трубопроводным транспортом, специфика при проектировании, строительстве и эксплуатации // Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли: сборник тезисов II Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти профессора А.В. Алиева. – Ижевск, 24–25 марта 2022. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2022. – С. 5–8.
10. On the integration of CO₂ capture technologies for an oil refinery / V. Fetisov, A.M. Gonopolsky, M.Y. Zemenkova, A.H. Mohammedi, M. Riaz // Energies. – 2023. – V. 16 (2). – P. 1–19. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/865> (дата обращения: 16.10.2022).
11. Mazzoldi A., Hill T., Colls J. CO₂ transportation for carbon capture and storage: Sublimation of carbon dioxide from a dry ice bank // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2008. – № 2 – P. 210–218.
12. Estimation of CO₂ pipeline transport cost in South Korea based on the scenarios / K. Kang, C. Huh, S.-G. Kang, J.-H. Baek, H. Jeong Noh // Energy Procedia. – 2014. – № 63. – P. 2475–2480.
13. Middleton R.S., Bielicki J.M. A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS. // Energy Policy. – 2009. – № 37. – P. 1052–1060.
14. Impact of CCUS impurities on dense phase CO₂ pipeline surface engineering design / M. Sawan, S. Thyagarajan, A. Kataria et al. // International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, 15–18 November 2021. – 21 p.
15. Impact of CO₂ specifications on design and operation challenges of CO₂ transport and storage systems in CCUS / M. Nazeri, H. Haghighi, C. McKay, D. Erickson, S. Zha // SPE Offshore Europe Conference & Exhibition. – Virtual, 7–10 September 2021. – 18 p.
16. Economic analysis for the transport and storage of captured carbon dioxide in South Korea / U. Zahid, U. Lee, J. An, Y. Lim, C. Han // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2014. – № 33. – P. 978–992.
17. Safe delivery of H₂ and CO₂ in offshore pipeline systems: novel methodology and tools for technological risk assessment / A. Mercury, F. Gianfelici, G. Luci et al. // Offshore Technology Conference. – Houston, TX, USA, 2–5 May, 2022. – 24 p.
18. IEA GHG. CO₂ Pipeline Infrastructure. – Cheltenham, UK: Environmental Projects Ltd, 2014. – 147 p.
19. Towler B.F., Agarwal D., Mokhtab S. Modeling Wyoming's carbon dioxide pipeline network // Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2007. – № 30. – P. 259–270.
20. Chandel M.K., Pratson L.F., Williams E. Potential economies of scale in CO₂ transport through use of a trunk pipeline // Energy Conversion and Management. – 2010. – № 51. – P. 2825–2834.
21. Khetib Y., Zunez S. Integrated pipeline and wells transient behavior of CO₂ injection operations: flow assurance best practices // Annual Meeting. – San Antonio, Texas, 16–19 May 2023. – 25 p.
22. Oosterkamp A., Ramsen J. State-of-the-art overview of CO₂ pipeline transport with relevance to offshore pipelines. – Haugesund, Norway: POLYTEC, 2008. – 88 p.
23. Towards a CO₂ pipeline specification: defining tolerance limits for impurities / J.M. Race, B. Wetenhall, P.N. Seevam, M.J. Downie // The Journal of Pipeline Engineering. – 2012. – № 11. – P. 173–190.
24. Brun K., Group E. Turbomachinery for carbon dioxide transport and storage // Offshore Technology Conference. – Houston, TX, USA, 1–4 May, 2023. – 30 p.
25. The analysis of pipeline transportation process for CO₂ captured from reference coal-fired 900 MW power plant to sequestration region / A. Witkowski, A. Rusin, M. Majkut, K. Stolecka // Chemical and Process Engineering. – 2014. – № 35. – P. 497–514.
26. Menon E.S., Ozanne H.S. Route selection // Pipeline Planning and Construction Field Manual. 1st ed. – Boston, MA, USA: Gulf Professional Publ., 2011. – 56 p.
27. Vandeginste V., Piessens K. Pipeline design for a least-cost router application for CO₂ transport in the CO₂ sequestration cycle // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2008. – V. 2. – P. 571–581.
28. API. America Petroleum Institute. Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems. 5th ed. – Washington, DC, USA: American Petroleum Institute (API), 1991. – 63 p.
29. Nazeri M., Maroto-Valer M.M., Jukes E. Performance of Coriolis flowmeters in CO₂ pipelines with pre-combustion, post-combustion and oxyfuel gas mixtures in carbon capture and storage // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2016. – № 54. – P. 297–308.
30. Patchigolla K., Oakey J.E. Design overview of high pressure dense phase CO₂ pipeline transport in flow mode // Energy Procedia. – 2013. – № 37. – P. 3123–3130.
31. CO₂ transport: design considerations and project outlook / C. Han, U. Zahid, J. An, K. Kim, C. Kim // Current Opinion in Chemical Engineering. – 2015. – № 10. – P. 42–48.

32. McCoy S., Rubin E. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2008. – № 2. – P. 219–229.
33. Viscosities, thermal conductivities, and diffusion coefficients of CO₂ mixtures: Review of experimental data and theoretical models / H. Li, Ø. Wilhelmsen, Y. Lv, W. Wang, J. Yan // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2011. – № 5. – P. 1119–1139.
34. The range and level of impurities in CO₂ streams from different carbon capture sources / R.T.J. Porter, M. Fairweather, M. Pourkashanian, R.M. Woolley // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – № 36. – P. 161–174.
35. Kather A., Kownatzki S. Assessment of the different parameters affecting the CO₂ purity from coal fired oxyfuel process // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2011. – № 5. – P. 204–209.
36. Luna-Ortiz E. Reusing existing infrastructure for CO₂ transport: risks and opportunities // Offshore Technology Conference. – Asia, Kuala Lumpur, Malaysia, 22–25 March 2022. – 14 p.
37. Особенности фазовых переходов углекислого газа при реализации проектов по декарбонизации крупнейших эмитентов Российской Федерации / С.А. Вершинин, Д.А. Голованов, А.Н. Блябляс, Е.А. Хлопотова // Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений: Сборник тезисов V научно-технической конференции / отв. Ред. А.Г. Чернов. – Томск, 21–22 сентября 2022. – Томск: Акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа», 2022. – С. 199–201.
38. Knoope M.M.J., Ramirez A., Faaij A.P.C. Economic optimization of CO₂ pipeline configurations // Energy Procedia. – 2013. – № 37. – P. 3105–3112.
39. Cost analysis of CO₂ transportation: case study in China / L. Gao, M. Fang, H. Li, J. Hetland // Energy Procedia. – 2011. – № 4. – P. 5974–5981.
40. Impact of stream impurities on compressor power requirements for CO₂ pipeline transportation / S.B. Martynov, N.K. Daud, H. Mahgerefteh, S. Brown, R.T.J. Porter // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2016. – № 54. – P. 652–661.
41. Peletiri S.P., Rahmanian N., Mujtaba I.M. Effects of impurities on CO₂ pipeline performance // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – № 57. – P. 355–360.
42. Optimization of pipeline transport for CO₂ sequestration / Z.X. Zhang, G.X. Wang, P. Massarotto, V. Rudolph // Energy Conversion and Management. – 2006. – № 47. – P. 702–715.
43. McCollum D.L., Ogden J.M. Techno-economic models for carbon dioxide compression, transport, and storage & correlations for estimating carbon dioxide density and viscosity. – Davis, CA, USA: University of California, Davis, 2006. – 87 p.
44. IEA GHG. CO₂ pipeline infrastructure: an analysis of global challenges and opportunities. – Cheltenham, U: IEA Environmental Projects Ltd, 2010. – 134 p.
45. A multi-source flow model for CCS pipeline transportation networks / S. Brown, H. Mahgerefteh, S. Martynov, V. Sundara, N.M. Dowell // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – № 43. – P. 108–114.
46. Techno-economic evaluation of the effects of impurities on conditioning and transport of CO₂ by pipeline / G. Skaugen, S. Rousanally, J. Jakobsen, A. Brunsvold // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2016. – № 54. – P. 627–639.
47. Купцов Н.В. Текущий статус и перспективы развития морских судов и портовых терминалов для углекислого газа // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 199–217.
48. Физические свойства углекислоты. URL: https://gidro.techgroup.pro/fizicheskie_svoystva_uglekisloty (дата обращения: 16.10.2022).
49. Ship-based carbon dioxide capture and storage for enhanced oil recovery conference paper / M. Ozaki, N. Nakazawa, A. Omata, M. Komatsu, H. Manabe // Offshore Technology Conference. – Houston, 2015. – 11 p.
50. Kokubun N., Ko K., Ozaki M. Cargo conditions of CO₂ in shuttle transport by ship, GHGT-11 // Energy Procedia. – 2013. – № 37. – P. 3160–3167.
51. Regulations on ship transport and on-board direct injection of CO₂ into sub-seabed geological formations, GHGT-11 / S. Suzuki, T. Nakamura, M. Muraoka, S. Higashi, T. Ohsumi // Energy Procedia. – 2013. – № 37. – P. 3191–3198.
52. Technical aspects of CO₂ EOR and associated carbon storage. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/118946/technical-aspects-co2-enhanced-oil-recovery-and-associated-carbon-sto.pdf> (дата обращения: 16.10.2022).
53. Kuuskraa V.A., Godec M.L., Dipietro P. CO₂ Utilization from «Next Generation» CO₂ enhanced oil recovery technology, GHGT-11 // Energy Procedia. – 2013. – № 37. – P. 6854–6866.
54. Mitsubishi shipbuilding holds keel laying ceremony in Shimono-seki for demonstration test ship for liquefied CO₂ transport. URL: <https://en.portnews.ru/news/336696/> (дата обращения: 16.10.2022).
55. LCO₂ carriers for Northern Lights CCS project to have rotor sails. URL: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/lco2-carriers-for-northern-lights-ccs-project-to-have-rotor-sails-72511/> (дата обращения: 16.10.2022).
56. KSOE competes to design world's largest LCO₂ carrier. URL: <https://maritime-executive.com/article/ksoe-competes-to-design-world-s-largest-lco2-carrier> (дата обращения: 16.10.2022).
57. DSME and ABS to develop 70,000 cu m liquefied CO₂ carrier. URL: <https://splash247.com/dsme-and-abs-to-develop-70000-cu-m-liquefied-co2-carrier/> (дата обращения: 16.10.2022).
58. DNV и Либерийский регистр одобрили проект ННІ танкера типа LCO₂. URL: <https://portnews.ru/news/319022/> (дата обращения: 16.10.2022).
59. MOL gets AiP for large-scale LCO₂ carrier. URL: <https://www.offshore-energy.biz/mol-gets-aip-for-large-scale-lco2-carrier/> (дата обращения: 16.10.2022).
60. KR, DSME target large-scale LCO₂ carrier development, green fuels. URL: <https://www.offshore-energy.biz/kr-dsme-target-large-scale-lco2-carrier-development/> (дата обращения: 16.10.2022).

Поступила: 15.06.2023 г.

Прошла рецензирование: 08.07.2023 г.

Информация об авторах

Ванчугов И.М., специалист отдела организации молодежной науки и научных мероприятий, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.

Резанов К.С., главный специалист ООО «Морнефтегазпроект»; магистрант кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.

Шестаков Р.А., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.

UDC 621.6:622.69

ON THE ISSUE OF TRANSPORTATION OF LIQUEFIED CARBON DIOXIDE

Ivan M. Vanchugov¹,
Vanchugov.i@gubkin.ru

Konstantin S. Rezanov^{2,1},
rezanov_ks@mail.ru

Roman A. Shestakov¹,
Shestakov.r@gubkin.ru

¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas,
65, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russia.

² LLC «Morneftegazproekt»,
43, bld. 3, Khersonskaya street, Moscow, 117246, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to capture and utilize one of the main types of greenhouse gases – carbon dioxide (CO₂). This need is primarily related to the ever-increasing CO₂ emissions, three quarters of which are accounted for by the combustion of various fuels.

The main aim is to analyze and systematize international methods for calculating the pipeline transport of liquefied carbon dioxide (LCO₂) to determine differences in numerical results, including factors taken into account and not taken into account in the methods under consideration, as well as to analyze water transport type as an alternative to pipeline transport.

Objects: liquefied carbon dioxide, a pipeline for transporting LCO₂.

Methods: numerical modeling of LCO₂ pipeline transport according to international methods to estimate the required diameter capable of providing a given pumping flow rate, analysis of the results obtained.

Results. The authors have carried out a review of existing methods for calculating LCO₂ pipelines, carried out numerical modeling and analysis of the results, during which it was revealed that most models ignore the influence of impurities, which, however, affect the technological parameters of operation and modeling of LCO₂ pipelines, which will lead to inaccuracies in their design and operation. In addition, it was found that the fluid velocity in the pipeline is calculated according to the parameters in the initial section, which corresponds to its minimum value in the pipeline, and is assumed to be equal to it throughout the pipeline without taking into account the expansion of LCO₂ from changes in temperature and pressure along its length and, consequently, without taking into account additional pressure losses and changes in other technological parameters that they can directly affect the operational safety and economic efficiency of the designed or operated LCO₂ pipeline. It should also be noted that the diameter determination equations depending on the length of the pipeline are not suitable for estimating the optimal diameter of the pipeline. As for alternatives to pipeline transport, first of all, it is worth noting the possibility of transportation by tankers over long distances or the possibility of using LCO₂ to increase the flow rate of deposits on the shelf and in hard-to-reach places of the coastal zone.

Key words:

Carbon dioxide capture and storage, CO₂ pipeline design, pressure drop, pipeline diameter equations, CO₂ transport, CO₂ transportation methods.

REFERENCES

1. Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., Van der Linden P.J., Hanson C.E. *Climate Change 2007 – impacts, adaptation and vulnerability*. UK, Cambridge University Press, 2007. 987 p.
2. IEA GHG. *Global CO₂ emissions rebounded to their highest level in history in 2021*. Cheltenham, UK, IEA Environmental Projects Ltd, 2002. 735 p.
3. Vanchugov I.M., Zharkova V.V., Fazhan Sun, Shestakov R.A. Prospects for the development of the carbon capture, use and storage industry in Russia. *Ecology and Industry of Russia*, 2023, vol. 27, no. 8, pp. 42–49. In Rus.
4. Vanchugov I.M., Rezanov K.S., Vatzov S.M., Avtomonov P.Yu., Tanasenko M.S. Obtaining LNG as a method of APG utilization. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 2023, no. 2 (134), pp. 70–75. In Rus.
5. Zhigulina D.I., Prudsky M.Yu., Malyshev B.V. Design of a pilot project for carbon capture and storage on the example of the Salym group of fields – from geology to development. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2022, no. 12, pp. 64–69. In Rus.
6. Munkejord S.T., Hammer M., Løvseth S.W. CO₂ transport: data and models – a review. *Appl. Energy*, 2016, no. 169, pp. 499–523.
7. Mazzocolli M., De Guido G., Bosio B., Arato E., Pellegrini L.A. CO₂-mixture properties for pipeline transportation in the CCS process. *Chem. Eng. Trans*, 2013, no. 32, pp. 1861–1866.
8. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Matschoss P., Kadner S., Zwickel T.L., Eickemeier P., Hansen G., Schlömer S. *Special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. UK, Cambridge University Press, 2011. 1059 p.
9. Blyabyas A.N. Osobennosti transporta uglekislogo gaza truboprovodnym transportom, spetsifika pri proektirovanii, stroitelstve i ekspluatatsii [Features of carbon dioxide transport by pipeline transport, specifics in design, construction and operation]. *Aktualnye voprosy energomashinostroeniya, neftyanoy i gazovoy otrasli. Sbornik tezisov II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professor A.V. Alieva* [Topical issues of power engineering, oil and gas industry: collection of abstracts of the II All-Russian scientific and technical conference dedicated to the memory of Professor A.V. Aliyev]. Izhevsk, March 24–25, 2022, pp. 5–8.
10. Fetisov V., Gonopolsky A.M., Zemenkova M.Y., Mohammadi A.H., Riaz M. On the Integration of CO₂ capture technologies for an oil refinery. *Energies*, 2023, vol. 16 (2), pp. 1–19.
11. Mazzoldi A., Hill T., Colls J. CO₂ transportation for carbon capture and storage: Sublimation of carbon dioxide from a dry ice bank. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, no. 2, pp. 210–218.
12. Kang K., Huh C., Kang S.-G., Baek J.-H., Jeong Noh H. Estimation of CO₂ pipeline transport cost in South Korea based on the scenarios. *Energy Procedia*, 2014, no. 63, pp. 2475–2480.

13. Middleton R.S., Bielicki J.M. A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS. *Energy Policy*, 2009, no. 37, pp. 1052–1060.
14. Sawsan M., Thyagarajan S., Kataria A. Impact of CCUS impurities on dense phase CO₂ pipeline surface engineering design. *International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, 15–18 November 2021. 21 p.
15. Nazeri M., Haghighi H., McKay C., Erickson D., Zha S. Impact of CO₂ specifications on design and operation challenges of CO₂ transport and storage systems in CCUS. *SPE Offshore Europe Conference & Exhibition*. Virtual, 7–10 September 2021. 18 p.
16. Zahid U., Lee U., An J., Lim Y., Han C. Economic analysis for the transport and storage of captured carbon dioxide in South Korea. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2014, no. 33, pp. 978–992.
17. Mercury A., Gianfelici F., Luci G. Safe delivery of H₂ and CO₂ in offshore pipeline systems: novel methodology and tools for technological risk assessment. *Offshore Technology Conference*. Houston, TX, USA, 2–5 May, 2022. 24 p.
18. IEA GHG. *CO₂ Pipeline Infrastructure*. UK, Environmental Projects Ltd, 2014. 147 p.
19. Towler B.F., Agarwal D., Mokhtab S. Modeling Wyoming's carbon dioxide pipeline network. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2007, no. 30, pp. 259–270.
20. Chandel M.K., Pratson L.F., Williams E. Potential economies of scale in CO₂ transport through use of a trunk pipeline. *Energy Conversion and Management*, 2010, no. 51, pp. 2825–2834.
21. Khetib Y., Zunez S. Integrated pipeline and wells transient behavior of CO₂ injection operations: flow assurance best practices. *Annual Meeting*. San Antonio, Texas, 16–19 May 2023. 25 p.
22. Oosterkamp A., Ramsen J. *State-of-the-art overview of CO₂ pipeline transport with relevance to offshore pipelines*. Norway, POLYTEC, 2008. 88 p.
23. Race J.M., Wetenhall B., Seevam P.N., Downie M.J. Towards a CO₂ pipeline specification: Defining tolerance limits for impurities. *The Journal of Pipeline Engineering*, 2012, no. 11, pp. 173–190.
24. Brun K., Group E. Turbomachinery for carbon dioxide transport and storage. *Offshore Technology Conference*. Houston, TX, USA, 1–4 May, 2023. 30 p.
25. Witkowski A., Rusin A., Majkut M., Stolecka K. The analysis of pipeline transportation process for CO₂ captured from reference coal-fired 900 MW power plant to sequestration region. *Chemical and Process Engineering*, 2014, no. 35, pp. 497–514.
26. Menon E.S., Ozanne H.S. Route selection. *Pipeline Planning and Construction Field Manual*. 1st ed. USA, Gulf Professional Publ., 2011. 56 p.
27. Vandeginste V., Piessens K. Pipeline design for a least-cost router application for CO₂ transport in the CO₂ sequestration cycle. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, vol. 2, pp. 571–581.
28. API. *America Petroleum Institute. Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems*. 5th ed. USA, American Petroleum Institute (API), 1991. 63 p.
29. Nazeri M., Maroto-Valer M.M., Jukes E. Performance of Coriolis flowmeters in CO₂ pipelines with pre-combustion, post-combustion and oxyfuel gas mixtures in carbon capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, no. 54, pp. 297–308.
30. Patchigolla K., Oakey J.E. Design overview of high pressure dense phase CO₂ pipeline transport in flow mode. *Energy Procedia*, 2013, no. 37, pp. 3123–3130.
31. Han C., Zahid U., An J., Kim K., Kim C. CO₂ transport: design considerations and project outlook. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2015, no. 10, pp. 42–48.
32. McCoy S., Rubin E. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, no. 2, pp. 219–229.
33. Li H., Wilhelmsen Ø., Lv Y., Wang W., Yan J. Viscosities, thermal conductivities, and diffusion coefficients of CO₂ mixtures: review of experimental data and theoretical models. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, no. 5, pp. 1119–1139.
34. Porter R.T.J., Fairweather M., Pourkashanian M., Woolley R.M. The range and level of impurities in CO₂ streams from different carbon capture sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, no. 36, pp. 161–174.
35. Kather A., Kownatzki S. Assessment of the different parameters affecting the CO₂ purity from coal fired oxyfuel process. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, no. 5, pp. 204–209.
36. Luna-Ortiz E. Reusing existing infrastructure for CO₂ transport: risks and opportunities. *Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia, 22–25 March 2022. 14 p.
37. Vershinin S.A., Golovanov D.A., Blyabiyas A.N., Khlopotova E.A. Osobennosti fazovykh perekhodov uglekislogo gaza pri realizatsii proektov po dekarbonizatsii krupneyshikh emitentov Rossiyskoy Federatsii [Features of phase transitions of carbon dioxide in the implementation of projects for the decarbonization of the largest emitters of the Russian Federation]. *Tekhnologii obustroystva neftyanykh, gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy. Sbornik tezisev V nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technologies for the development of oil, gas and gas condensate fields. Collection of abstracts of the V scientific and technical conference]. Ed. by A.G. Chemov. Tomsk, Russia, 21–22 September, 2022. pp. 199–201.
38. Knoope M.M.J., Ramirez A., Faaij A.P.C. Economic optimization of CO₂ pipeline configurations. *Energy Procedia*, 2013, no. 37, pp. 3105–3112.
39. Gao L., Fang M., Li H., Hetland J. Cost analysis of CO₂ transportation: case study in China. *Energy Procedia*, 2011, no. 4, pp. 5974–5981.
40. Martynov S.B., Daud N.K., Mahgerefteh H., Brown S., Porter R.T.J. Impact of stream impurities on compressor power requirements for CO₂ pipeline transportation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, no. 54, pp. 652–661.
41. Peletiri S.P., Rahmanian N., Muftaba I.M. Effects of impurities on CO₂ pipeline performance. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, no. 57, pp. 355–360.
42. Zhang Z.X., Wang G.X., Massarotto P., Rudolph V. Optimization of pipeline transport for CO₂ sequestration. *Energy Conversion and Management*, 2006, no. 47, pp. 702–715.
43. McCollum D.L., Ogden J.M. *Techno-Economic Models for Carbon Dioxide Compression, Transport, and Storage & Correlations for Estimating Carbon Dioxide Density and Viscosity*. USA, University of California, 2006. 87 p.
44. IEA GHG. *CO₂ pipeline infrastructure: an analysis of global challenges and opportunities*. Cheltenham, UK, IEA Environmental Projects Ltd, 2010. 134 p.
45. Brown S., Mahgerefteh H., Martynov S., Sundara V., Dowell N.M. A multi-source flow model for CCS pipeline transportation networks. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, no. 43, pp. 108–114.
46. Skaugen G., Roussanaly S., Jakobsen J., Brunsvold A. Techno-economic evaluation of the effects of impurities on conditioning and transport of CO₂ by pipeline. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, no. 54, pp. 627–639.
47. Kuptsov N.V. Current status and prospects for the development of sea vessels and port terminals for carbon dioxide. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet*. Admiral S.O. Makarov, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 199–217. In Rus.
48. *Fizicheskie svoystva uglekisloty* [Physical properties of carbon dioxide]. Available at: https://gidro.tech-group.pro/fizicheskie_svoystva_uglekisloty (accessed 16 October 2022).
49. Ozaki M., Nakazawa N., Omata A., Komatsu M., Manabe H. Ship-Based carbon dioxide capture and storage for enhanced oil recovery conference paper. *Offshore Technology Conference*. Houston, 2015, vol. 4, pp. 2412–2425.
50. Kokubun N., Ko K., Ozaki M. Cargo conditions of CO₂ in shuttle transport by ship, GHGT-11. *Energy Procedia*, 2013, no. 37, pp. 3160–3167.
51. Suzuki S., Nakamura T., Muraoka M., Higashi S., Ohsumi T. Regulations on ship transport and on-board direct injection of CO₂ into sub-seabed geological formations, GHGT-11. *Energy Procedia*, 2013, no. 37, pp. 3191–3198.
52. *Technical aspects of CO₂ EOR and associated carbon storage*. Available at: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/118946/technical-aspects-co2-enhanced-oil-recovery-and-associated-carbon-sto.pdf> (accessed 16 October 2022).
53. Kuuskraa V.A., Godec M.L., Di Pietro P. CO₂ Utilization from «Next Generation» CO₂ enhanced oil recovery technology, GHGT-11. *Energy Procedia*, 2013, no. 37, pp. 6854–6866.
54. *Mitsubishi Shipbuilding holds keel laying ceremony in Shimonoseki for demonstration test ship for liquefied CO₂ transport*. Availa-

- ble at: <https://en.portnews.ru/news/336696/> (accessed 16 October 2022).
55. *LCO₂ carriers for Northern Lights CCS project to have rotor sails*. Available at: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/lco2-carriers-for-northern-lights-ccs-project-to-have-rotor-sails-72511/> (accessed 16 October 2022).
56. *KSOE Competes to Design World's Largest LCO₂ Carrier*. Available at: <https://maritime-executive.com/article/ksoe-competes-to-design-world-s-largest-lco2-carrier> (accessed 16 October 2022).
57. *DSME and ABS to develop 70,000 cu m liquefied CO₂ carrier*. Available at: <https://splash247.com/dsme-and-abs-to-develop-70000-cu-m-liquefied-co2-carrier/> (accessed 16 October 2022).
58. *DNV i Liberiyskiy registr odobrili proekt HHI tankera tipa LCO₂* [DNV and the Liberian Register approved the project of the LCO₂ type HI tanker]. Available at: <https://portnews.ru/news/319022/> (accessed 16 October 2022).
59. *MOL gets AiP for large-scale LCO₂ carrier*. Available at: <https://www.offshore-energy.biz/mol-gets-aip-for-large-scale-lco2-carrier/> (accessed 16 October 2022).
60. *KR, DSME target large-scale LCO₂ carrier development, green fuels*. Available at: <https://www.offshore-energy.biz/kr-dsme-target-large-scale-lco2-carrier-development/> (accessed 16 October 2022).

Received: 15 June 2023.

Reviewed: 8 July 2023.

Information about the authors

Ivan M. Vanchugov, specialist, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Konstantin S. Rezanov, chief specialist, LLC «Morneftegazproekt»; master student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Roman A. Shestakov, Cand. Sc., associate professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

УДК 621.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО УРОВНЯ В СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ, ОБОРУДОВАННОЙ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Тотанов Александр Сергеевич¹,
063samng@gmail.com

Молчанова Вероника Александровна¹,
mba_2019@mail.ru

Уразаков Камил Рахматуллович¹,
urazakk@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450038, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования связана с широким применением установок электроцентробежных насосов при добыче мало-вязких нефтей и водогазонефтяных эмульсий на данном этапе развития механизированной добычи. Однако текущие условия добычи, связанные с изменяющимися параметрами пласта, выдвигают на передний план ряд технических задач, требующих решения. В качестве одной из таких задач следует выделить явление, при котором происходит снижение динамического уровня скважины вследствие изменения параметров пласта (пластовое давление, коэффициент продуктивности и т. д.). Снижение динамического уровня жидкости в скважине приводит к осложнениям при работе установок электроцентробежных насосов. Как следствие, возможно проявление повышенной кавитации в рабочих колесах ввиду снижения давления на приеме насоса, а также не исключен полный срыв подачи насоса при значительном снижении динамического уровня скважинной жидкости. В связи с этим предложено техническое решение, заключающееся в установке перепускного устройства (клапана с электроприводом) выше места подвески установки электроцентробежного насоса для поддержания стабильного динамического уровня жидкости в скважине и исключения осложнений при работе насоса. Для подтверждения целесообразности применения системы стабилизации динамического уровня разработана математическая модель, позволяющая оценить эффективность предупреждения осложнений с помощью предложенного технического решения при работе установки электроцентробежного насоса.

Цель: разработать методику расчета для исследования динамики работы системы стабилизации динамического уровня.

Объекты: установка электроцентробежного насоса в совокупности с системой стабилизации динамического уровня скважины. Изучено влияние диаметра и длины клапана с электроприводом на эффективность восстановления динамического уровня с учетом гидравлических потерь в процессе работы системы.

Методы. Метод исследования сводится к численному решению дифференциальных, линейных и нелинейных уравнений, описывающих подачу и давление на выходе установки электроцентробежного насоса в установившемся режиме, истечение жидкости через клапан с электроприводом с учетом гидравлических сопротивлений, протекание гидродинамических процессов в затрубном пространстве при работе системы стабилизации, то есть изменение уровня жидкости над насосом в зависимости от скважинных условий и конструктивных параметров клапана с электроприводом.

Результаты. Исследовано влияние параметров клапана с электроприводом – диаметра проходного сечения и длины – на динамику изменения уровня жидкости над насосом, а также влияние свойств жидкости, а именно ее вязкости, на интенсивность восстановления уровня жидкости над насосом. Установлено, что при увеличении диаметра клапана с электроприводом наблюдается более интенсивное восстановление уровня жидкости над насосом в связи со снижением гидравлических сопротивлений в полости клапана. Аналогично установлено, что с увеличением длины клапана, а также при увеличении вязкости жидкости снижается коэффициент расхода и интенсивность восстановления уровня жидкости над насосом соответственно.

Ключевые слова:

электроцентробежный насос, динамический уровень, перепускное устройство, затрубное пространство, клапан с электроприводом.

Введение

Применение установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) является достаточно распространенным явлением на текущий момент при подъеме мало-вязких нефтей и водогазонефтяных эмульсий из добывающих скважин. Процесс добычи неразрывно связан с динамическими изменениями параметров технологического режима, а также параметров непосредственно самого пласта [1–7].

Известно явление, при котором наблюдается снижение динамического уровня вследствие изменения параметров пласта при добыче нефти. Снижение динамического уровня приводит к осложнениям при ра-

боте УЭЦН, в частности, к возможному появлению кавитационного процесса в рабочих колесах насоса вследствие снижения давления на приеме насоса ниже давления насыщения. Более того, при значительном снижении динамического уровня возможен полный срыв подачи насоса, перегрев погружного электродвигателя (ПЭД) [8–12].

В связи с этим возникает актуальная задача для устранения указанного недостатка. Одно из перспективных направлений для решения подобного рода задач, связанных с различными параметрами затрубного пространства, предполагает наличие автоматической системы контроля (струйный насос, клапана с

электроприводом и др.) Разработка технических решений для автоматического контроля различных параметров в затрубном пространстве добывающих скважин является на сегодняшний день актуальной задачей, которой посвящены исследования ряда авторов [13–15].

В частности, в работах [16–18] представлены преимущества tandemной установки электроцентробежного насоса (ЭЦН, предназначен для откачки пластовой жидкости) и струйного насоса (предназначен для откачки газа из затрубного пространства), такие как простота конструкции и относительная дешевизна при эксплуатации, однако такие технические решения предполагают наличие некоторых сложностей с подбором основных эксплуатационных параметров электроцентробежного и струйного насосов. Более того, такое техническое решение конструктивно не позволяет поддерживать динамический уровень жидкости в скважине.

Учитывая вышеизложенные недостатки известных технических решений [17, 19–21], разработана система стабилизации динамического уровня. Система стабилизации динамического уровня жидкости в стволе скважины представляет собой станцию управления УЭЦН с блоком управления электроуправляемым клапаном, расположенную на поверхности, УЭЦН в комплектации с термоманометрической системой для фиксации параметров температуры и давления с целью обеспечения корректной работы клапана с электроприводом.

Принцип работы системы стабилизации динамического уровня заключается в следующем. При снижении динамического уровня ниже критического значения датчики давления фиксируют изменения давления в трех точках – на указанной глубине спуска насоса и клапана с электроприводом и на устье. После некоторого критического значения понизившегося динамического уровня клапан с электроприводом вступает в работу, постепенно открывая проходное сечение и перепуская часть потока из НКТ в затрубное пространство, тем самым повышая и стабилизируя динамический уровень жидкости.

Целью данного исследования является разработка математической модели, позволяющей описать работу системы стабилизации динамического уровня, и обоснование эффективности ее работы.

Описание подачи и давления на выходе УЭЦН. Подача УЭЦН при установившемся режиме откачки связана со скоростью потока в НКТ зависимостью (1) [16]:

$$Q_{УЭЦН} = \frac{\pi D_{НКТ}^2}{4} v_{УЭЦН}, \quad (1)$$

где $D_{НКТ}$ – внутренний диаметр НКТ, м; $v_{УЭЦН}$ – скорость на выходе УЭЦН, м/с.

Давление на выходе УЭЦН с учетом гидродинамических потерь описывается уравнением (2) [17]:

$$P_{\text{вых.УЭЦН}} = P_y + \rho_{\text{ж}} g H_{\text{сп}} + \lambda \frac{L_{\text{сп}}}{D_{НКТ}} \frac{v_{УЭЦН}^2}{2} \rho_{\text{ж}}, \quad (2)$$

где P_y – устьевое давление, Па; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; $L_{\text{сп}}$ – глубина спуска насоса по стволу, м; $H_{\text{сп}}$ – глубина спуска насоса по вертикали, м; $\lambda = \frac{64}{Re}$ –

коэффициент сопротивлений потока; $Re = \frac{\rho_{\text{ж}} v_{УЭЦН} D_{НКТ}}{\mu}$ – число Рейнольдса; μ – вязкость жидкости, Па·с; $D_{НКТ}$ – внутренний диаметр НКТ, м.

Закон баланса расходов при совместной работе УЭЦН и клапана с электроприводом запишется в виде (3) [18]:

$$Q_{УЭЦН} - Q_{\text{кл}} = Q_{\text{НКТ}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{кл}}$ – расход жидкости через клапан с электроприводом, м³/с; $Q_{\text{НКТ}}$ – расход жидкости, поступившей в НКТ при работе клапана с электроприводом, м³/с.

Описание работы клапана с электроприводом. При работе клапана с электроприводом в системе стабилизации динамического уровня необходимо определить коэффициент степени открытия проходного сечения клапана $\alpha_{\text{кл}}(dP_{\text{кл}})$ для отведения потока жидкости в затрубное пространство, который является функцией от времени и перепада давления и определяется следующим образом:

$$\alpha_{\text{кл}}(dP_{\text{кл}}) = \begin{cases} \alpha_{\text{кл.0}} + \frac{\alpha_{\text{кл.п}}}{t_{\text{кл}}} dt, & \text{при } dP_{\text{кл}} > 0 \\ \alpha_{\text{кл.0}} - \frac{\alpha_{\text{кл.п}}}{t_{\text{кл}}} dt, & \text{при } dP_{\text{кл}} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

где $t_{\text{кл}}$ – время открытия (закрытия) клапана, с; $\alpha_{\text{кл.0}}$ – начальная степень открытия (закрытия) проходного сечения клапана при $t = 0$, $\alpha_{\text{кл.0}} = 0$; $\alpha_{\text{кл.п}}$ – полная степень открытия (закрытия) проходного сечения клапана при $t = t_{\text{кл}}$, $\alpha_{\text{кл.п}} = 1$; dt – шаг по времени, с; $dP_{\text{кл}} = P_{\text{вых.УЭЦН}} - P_{\text{затр}}$ – перепад давления на клапане, Па; $P_{\text{затр}}$ – давление в затрубном пространстве на глубине установки клапана с электроприводом, Па.

Потери расхода при прохождении жидкости клапана с электроприводом могут быть описаны зависимостью (при допущении наличия турбулентного потока в полости клапана с электроприводом):

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{0,03}{\sqrt{1 + \frac{L_{\text{кл}} 0,316}{D_{\text{кл}}^4 Re}}}, \quad (5)$$

где $L_{\text{кл}}$ – длина клапана с электроприводом, м; $D_{\text{кл}}$ – внутренний диаметр клапана с электроприводом, м; Re – число Рейнольдса.

С учетом уравнений (4), (5) расход при работе клапана с электроприводом будет описываться следующим образом:

$$Q_{\text{кл}} = \lambda_{\text{кл}} \alpha_{\text{кл}}(dP_{\text{кл}}) S_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2}{\rho_{\text{ж}}}} (P_{\text{вых.УЭЦН}} - P_{\text{затр}}) \times \times \text{sign}(P_{\text{вых.УЭЦН}} - P_{\text{затр}}), \quad (6)$$

где $S_{\text{кл}}$ – площадь поперечного сечения клапана, м².

Описание гидродинамических процессов в затрубном пространстве при работе системы стабилизации динамического уровня. После снижения динамического уровня на некоторую величину происходит изменение непосредственно самого уровня столба жидкости в затрубном пространстве, а также давления в затрубном пространстве на месте установки системы стабилизации [22]. В свою очередь изменение давления в затрубном пространстве (на глубине места

установки клапана с электроприводом) по времени зависит от соответствующих изменений давлений столба газа и динамического уровня жидкости:

$$\frac{dP_{затр}}{dt} = \frac{dP_d}{dt} + \frac{dP_r}{dt}, \quad (7)$$

где P_d – давление столба жидкости динамического уровня в затрубном пространстве на глубине установки системы стабилизации, Па; P_r – давление столба газа в затрубном пространстве на глубине установки системы стабилизации, Па.

Изменение давления динамического уровня столба жидкости определяется следующим образом:

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{dH_d}{dt} \rho_{ж} g, \quad (8)$$

где H_d – динамический уровень столба жидкости, м; $\rho_{ж}$ – значение плотности жидкости, кг/м³.

Аналогично необходимо описать изменение давления газа в затрубном пространстве, вызванное наличием расхода жидкости через клапан с электроприводом, а также с учетом сжимаемости газа (т. к. в процессе перепуска жидкости из полости НКТ в затрубное пространство происходит сжатие газа с последующим увеличением давления:

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{E_r}{V_r} Q_{кл}, \quad (9)$$

где $E_r = \frac{P_{г.0} V_{г.0}}{V_r}$ – объемный коэффициент упругости газа, Па⁻¹; $P_{г.0}$ – начальное давление газа в затрубном пространстве, Па; $V_r = V_{г.0} - S_{затр} dH_r$ – объем газа в

затрубном пространстве, м³; $V_{г.0}$ – начальный объем газа в затрубном пространстве, м³.

Изменение высоты динамического уровня следует выразить из изменения объема жидкости в затрубном пространстве в единицу времени (что соответствует расходу через клапан с электроприводом):

$$\frac{dH_d}{dt} = \frac{Q_{кл}}{S_{затр}}, \quad (10)$$

где $S_{затр}$ – площадь поперечного сечения затрубного пространства, м².

При изменении высоты столба жидкости динамического уровня происходит и изменение высоты столба газа в затрубном пространстве, которое связано соотношением:

$$dH_r = -dH_d, \quad (11)$$

где $H_{сп} = H_r + H_d$ – глубина спуска системы стабилизации, м.

С учетом уравнений (4)–(11) изменение давления в затрубном пространстве по времени в месте установки системы стабилизации окончательно имеет вид:

$$\frac{dP_{затр}}{dt} = \frac{dH_d}{dt} \rho_{ж} g + \frac{E_r}{V_r} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{L_{кл} 0.316}{D_{кл}^4 \sqrt{Re}}}} \alpha_{кл} (dP_{кл}) S_{кл} \sqrt{\left| \frac{2}{\rho_{ж}} dP_{кл} \right|} \times \text{sign}(dP_{кл}).$$

На рис. 1 проиллюстрирована схема устройства с указанием направлений потоков в НКТ, электроклапане и представлением основных параметров, входящих в математическую модель системы стабилизации динамического уровня.

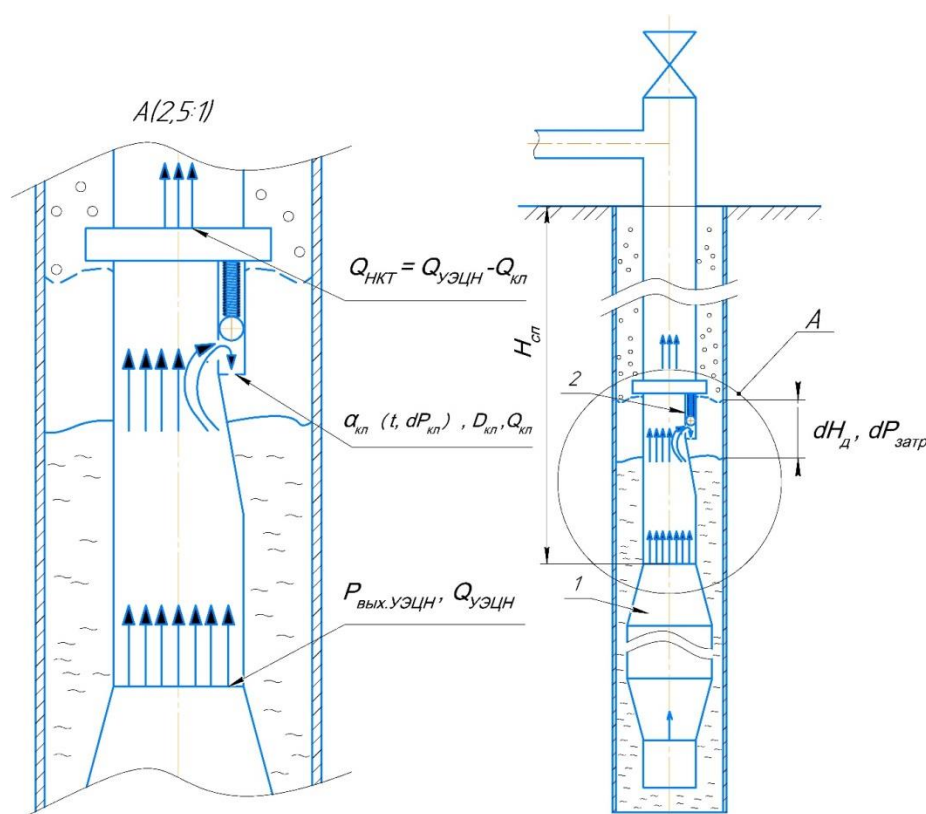


Рис. 1. Расчетная схема системы стабилизации динамического уровня: 1 – установка электроцентробежного насоса, 2 – клапан с электроприводом

Fig. 1. Calculation scheme of the dynamic level stabilization system: 1 – electrical submersible pump unit, 2 – electric valve

Обсуждение результатов

Для проведения гидродинамического анализа системы стабилизации динамического уровня принимается гипотетическая скважина, в которой произошло снижение динамического уровня (вызванное изменением каких-либо параметров пласта) до определенной величины, после чего вступает в работу непосредственно указанная система. В качестве направления отсчета принимается уровень жидкости над насосом. При проведении гидродинамического анализа принимаются следующие параметры скважины, перекачиваемой жидкости, газа и насоса:

- начальное значение уровня жидкости над насосом (в момент пуска системы стабилизации), $H_{д,0} = 135$ м;
- начальное значение высоты столба газа в затрубном пространстве $H_{затр,0} = 1365$ м;
- глубина спуска насоса, $H_{сп,0} = 1500$ м;
- начальная плотность жидкости, $\rho_{ж} = 750$ кг/м³;

- устьевое давление, $P_y = 0,4$ МПа;
- коэффициент объемной упругости газа, $E_g = 1,6 \cdot 10^7$ Па⁻¹;
- внутренний диаметр эксплуатационной колонны, $D_3 = 0,115$ м;
- внутренний диаметр НКТ, $D_{НКТ} = 0,06$ м;
- вязкости жидкости, $\mu = 5 \cdot 10^{-3}$ Па·с;
- подача УЭЦН (до входа в клапан), $Q_{УЭЦН} = 0,001157$ м³/с (100 м³/сут);
- время открытия клапана с электроприводом 10 с.

На рис. 2 представлен пример численного моделирования гипотетической скважины с начальным (сниженным) уровнем жидкости над УЭЦН (выше уровня установки клапана с электроприводом) с 155 до 50 м. Расчет произведен снизу вверх, то есть уровень жидкости увеличивается относительно уровня установки клапана с электроприводом, а газ, находящийся выше уровня жидкости, сжимается. Диаметр отверстия клапана с электроприводом варьировался от 6 до 15 мм, а его длина 50 мм.

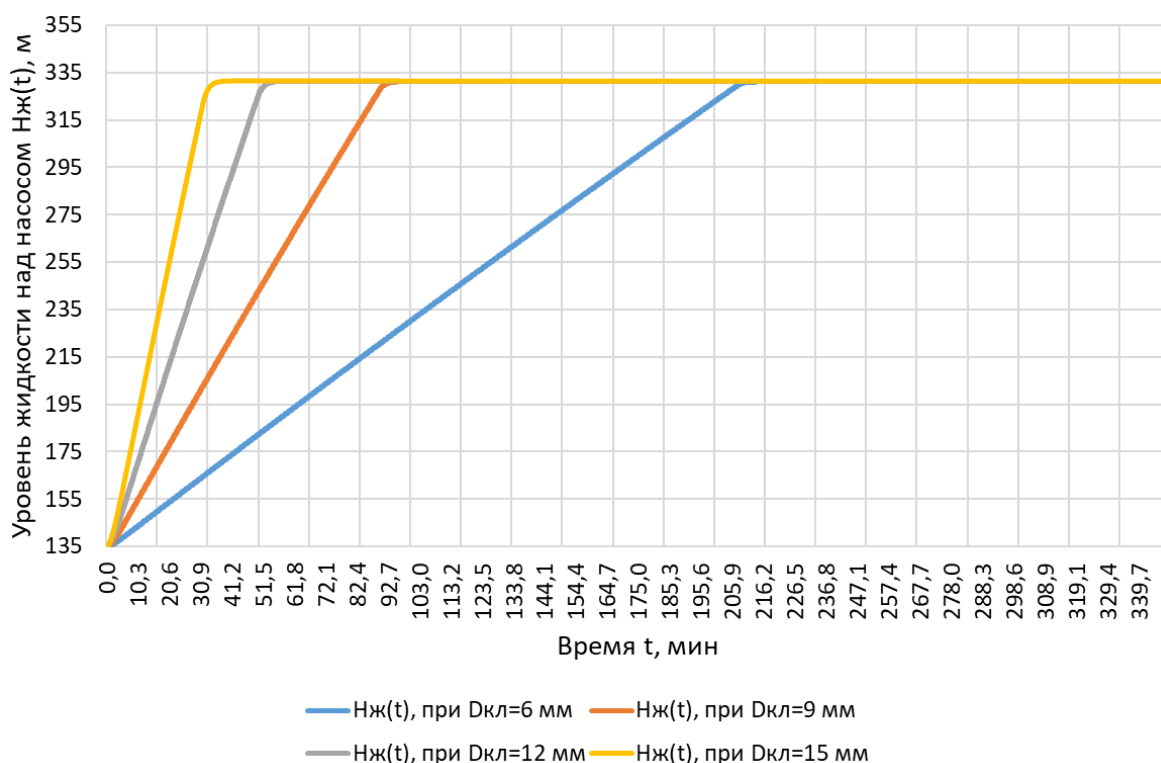


Рис. 2. Зависимость уровня жидкости над насосом от времени при различных значениях диаметра проходного сечения клапана с электроприводом

Fig. 2. Time dependence of the liquid level above the pump at different values of the electrical valve passage diameter

Представленные графики свидетельствуют о восстановлении уровня жидкости над насосом с 135 до 330 м. Исходя из полученных результатов моделирования видно, что интенсивность восстановления уровня жидкости над насосом зависит от диаметра проходного сечения клапана с электроприводом. При значении диаметра 6 мм, время восстановления уровня жидкости составляет около 206 мин, или 3,5 ч, при диаметре 9 мм время стабилизации 100 мин, или 1,7 ч, при диаметре 12 мм время стабилизации 55 мин, или

0,9 ч, а при диаметре 15 мм время стабилизации составляет около 40 мин, или 0,7 ч.

На рис. 3 аналогично представлено численное моделирование изменения расхода жидкости при ее прохождении через клапан с электроприводом.

Исходя из представленных зависимостей, полученных на рис. 3, видно, что максимальный расход жидкости при различных значениях диаметра проходного сечения клапана с электроприводом различается. При значении диаметра 6 мм максимальный расход жидко-

сти через клапан составляет около $10 \text{ м}^3/\text{сут}$, при диаметре 9 мм расход $23 \text{ м}^3/\text{сут}$, при диаметре 12 мм – $44 \text{ м}^3/\text{сут}$, при диаметре 15 мм – $67 \text{ м}^3/\text{сут}$. При этом расход зависит от перепада на клапане, ввиду большего проходного сечения восстановление динамического

уровня происходит более интенсивно (максимальный расход жидкости более высокий и достигается быстрее ввиду наличия меньших потерь). Уменьшение проходного сечения подразумевает увеличение гидравлических потерь в полости клапана с электроприводом.

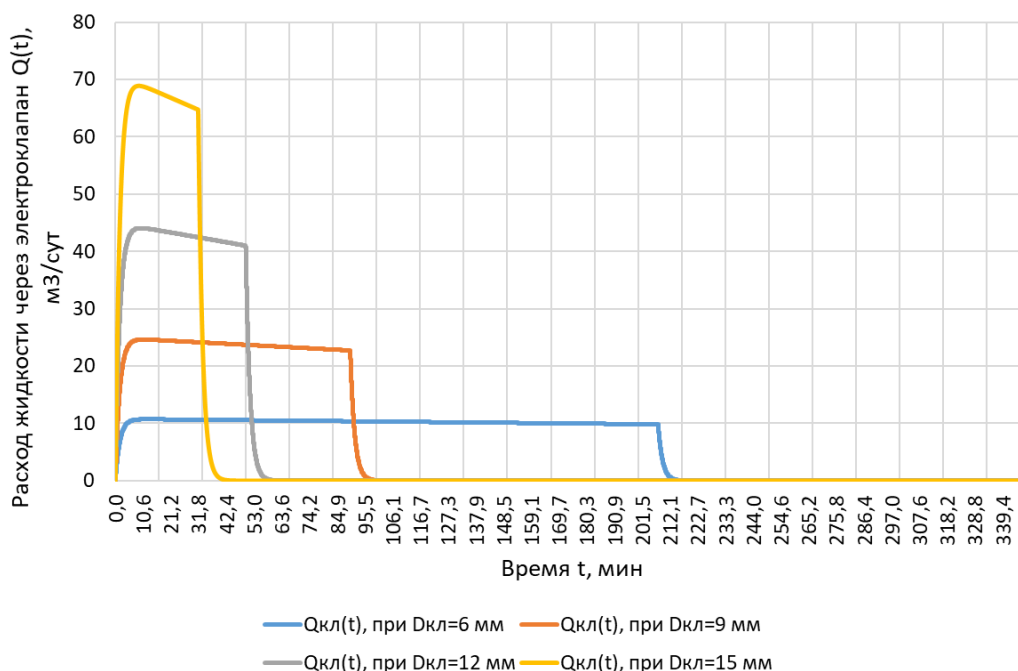


Рис. 3. Зависимость расхода жидкости через клапан с электроприводом по времени при различных значениях его диаметра проходного сечения

Fig. 3. Dependence of liquid flow rate through the electrical valve on time at different values of its diameter

Наблюдаемый эффект подтверждается при проведении анализа коэффициента расхода жидкости через клапан с электроприводом. На рис. 4 представлены

расчетные характеристики коэффициента расхода клапана с электроприводом.

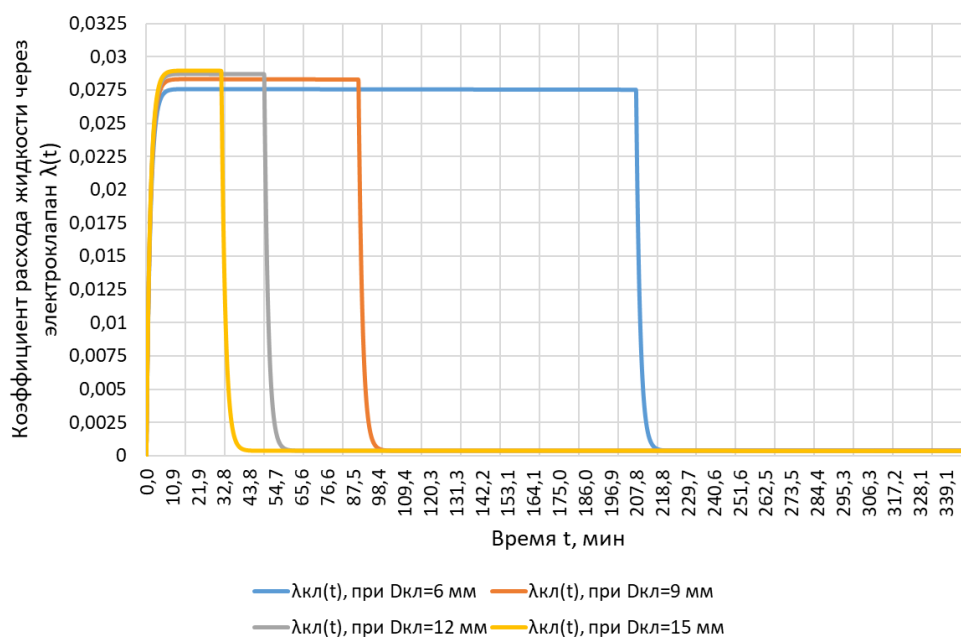


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода жидкости через клапан с электроприводом от времени при различных значениях диаметра его проходного сечения

Fig. 4. Dependence of liquid flow coefficient through the electric valve on time at different values of its passage section diameter

Максимальное значение коэффициента расхода в случае применения диаметра клапана 6 мм составляет 0,0273, при диаметре 9 мм коэффициент расхода 0,028, при диаметре 12 мм – 0,0283, а при диаметре 15 мм составляет около 0,0285.

Далее произведен анализ влияния длины клапана с электроприводом на его работу, в частности рассмотрено изменение коэффициента расхода по времени (рис. 5). Принимается диаметр клапана 9 мм, значения длин – 50, 100, 150, 200 мм.

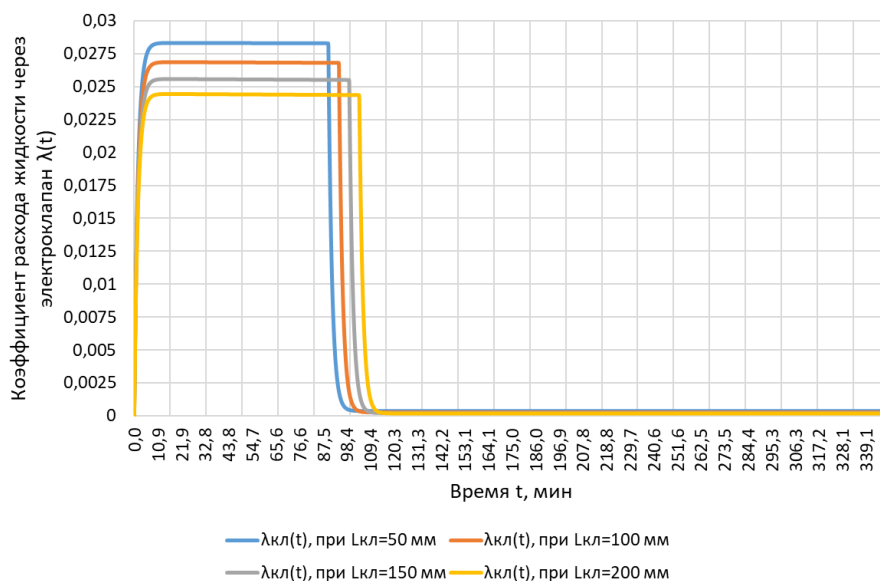


Рис. 5. Зависимость коэффициента расхода жидкости через клапан с электроприводом от времени при различных значениях его длины

Fig. 5. Dependence of liquid flow coefficient through the electric valve on time at different values of its length

Полученные графики свидетельствуют о снижении коэффициента расхода с увеличением длины клапана, что подразумевает повышение гидравлических сопротивлений, очевидно, в свою очередь это влияет на интенсивность восстановления динамического уровня, а именно на время стабилизации.

На рис. 6 представлена зависимость расхода жидкости в НКТ (при постоянной подаче УЭЦН) от времени при различных значениях диаметра проходного сечения клапана с электроприводом.

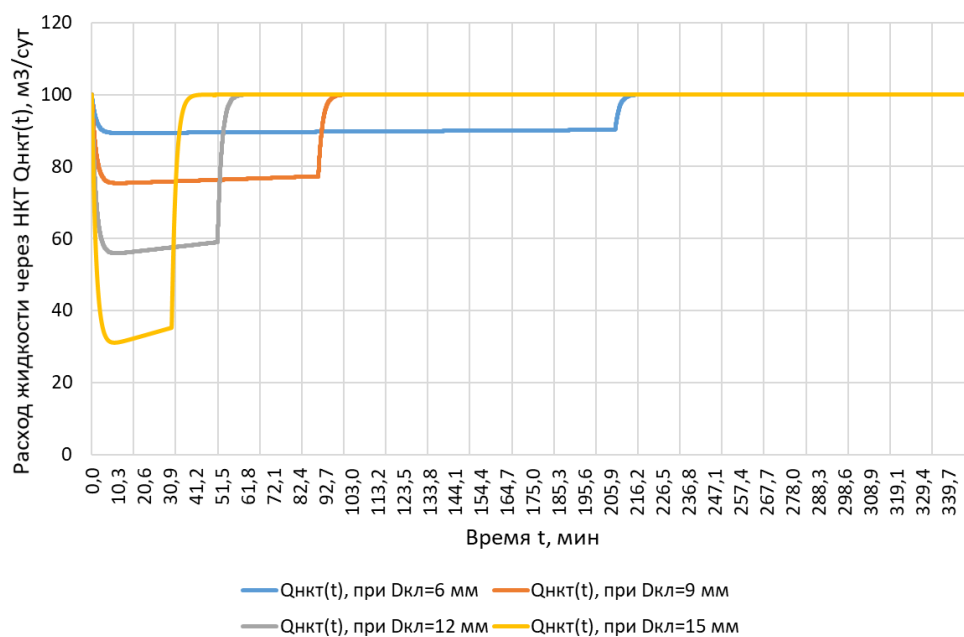


Рис. 6. Зависимость расхода жидкости в НКТ (при постоянной подаче установки электроцентробежного насоса) от времени при различных значениях диаметра проходного сечения клапана с электроприводом

Fig. 6. Dependence of tubing liquid flow rate (at constant electrical submersible pump unit flow rate) on time at different values of electric valve borehole diameter

Как видно из рис. 6, расход жидкости в НКТ в период работы клапана снижается на ту величину объема протекающей жидкости в единицу времени, которая поступает в полость клапана. Наиболее плавное восстановление расхода жидкости в НКТ наблюдается при применении клапана с электроприводом с диаметром 6 мм.

Далее произведен анализ влияния вязкости жидкости на работу клапана с электроприводом (рис. 7), при этом варьирование вязкости представлено следующими значениями: 5, 10, 15, 30 мПа·с. Принимается диаметр клапана с электроприводом 6 мм, его длина 200 мм.

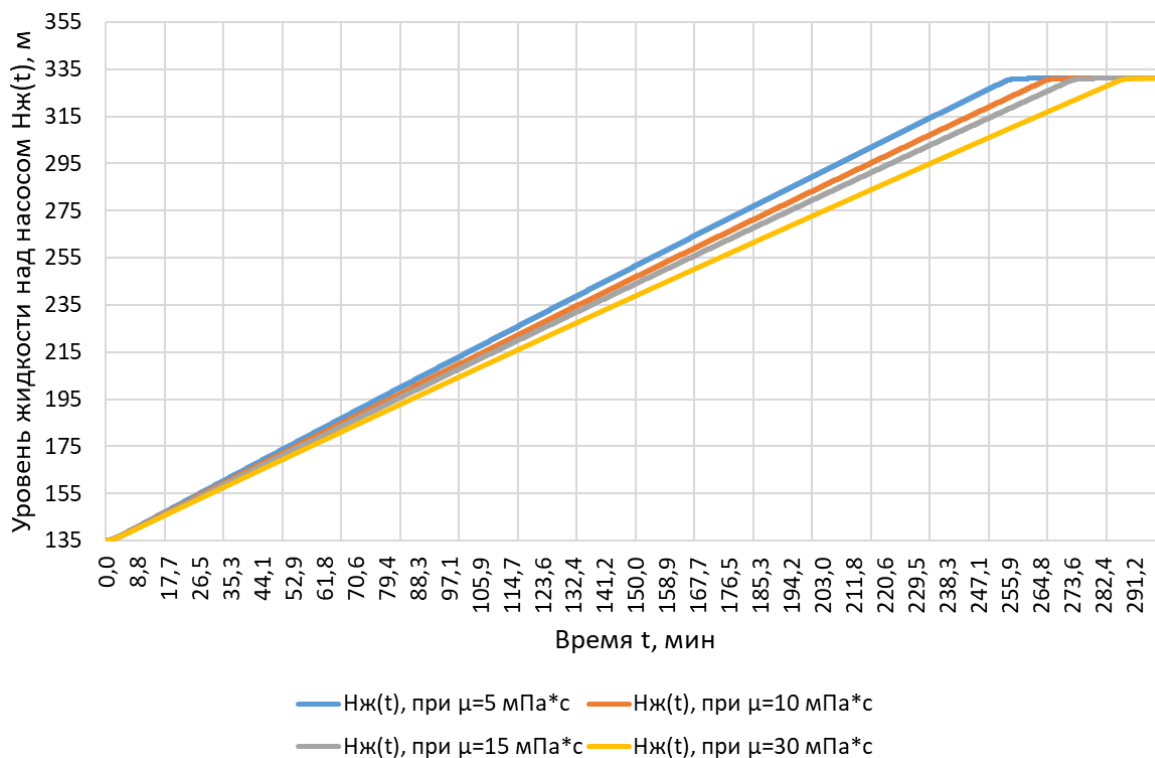


Рис. 7. Зависимость уровня жидкости над насосом по времени при различных значениях вязкости жидкости
Fig. 7. Time dependence of the liquid level above the pump at different values of the liquid viscosity

На основе представленных результатов видно, что увеличение вязкости приводит к повышению гидравлических потерь в полости клапана, о чем свидетельствует изменение интенсивности восстановления уровня жидкости над насосом, к примеру, при значении вязкости жидкости 5 мПа·с время восстановления составляет приблизительно 4,3 ч, а при значении вязкости около 30 мПа·с время восстановления увеличивается до 4,8 ч. То есть фактически время восстановления уровня жидкости над УЭЦН при указанных значениях вязкости повысилось на 25 мин.

Заключение

1. Разработана математическая модель системы стабилизации динамического уровня в стволе скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса, позволяющая учесть особенности динамики работы системы (открытие и закрытие клапана с электроприводом, диаметр и его длину), принимая во внимание протекание гидродинамических процессов (описывающих восстановление до исходного значения уровня жидкости над насосом).
2. Определены основные параметры, позволяющие регулировать динамику работы клапана с электроприводом, – диаметр проходного отверстия, длина. Исследовано влияние диаметра проходного

- отверстия клапана с электроприводом на динамику изменения уровня жидкости над насосом. На основе частного моделирования (при значениях диаметра клапана 6, 9, 12, 15 мм) установлено, что с увеличением диаметра наблюдается более интенсивное восстановление уровня жидкости над насосом в связи со снижением гидравлических потерь в полости клапана, при значении диаметра 6 мм, время восстановления уровня жидкости составляет около 206 мин, или 3,5 ч, при диаметре 9 мм время стабилизации 100 мин, или 1,7 ч, при диаметре 12 мм время стабилизации 55 мин, или 0,9 ч, а при диаметре 15 мм время стабилизации составляет около 40 мин, или 0,7 ч, что необходимо учитывать при проектировании системы стабилизации динамического уровня для исключения срыва подачи насоса.
3. Изучено влияния длины проходного отверстия клапана с электроприводом на динамику изменения уровня жидкости над насосом. Показано (при значениях длин клапана 50, 100, 150, 200 мм), что с увеличением длины происходит возрастание гидравлических потерь, что в свою очередь приводит к снижению коэффициента расхода клапана.
4. Проанализировано влияние вязкости жидкости на работу клапана с электроприводом. На основе

частного решения представленной математической модели получено, что с увеличением вязкости жидкости интенсивность восстановления уровня жидкости над насосом также изменяется и характеризуется более продолжительным процессом – при значении вязкости жидкости 5 мПа·с

время восстановления составляет приблизительно 4,3 ч, а при значении вязкости около 30 мПа·с время восстановления увеличивается до 4,8 ч, то есть время восстановления динамического уровня при указанных значениях вязкости повысилось на 25 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joon-Ho C. A study on the operation status monitoring, diagnosis and failure prediction algorithm of smart ESP // The Journal of Next-generation Convergence Technology Association. – 2022. – V. 6. – P. 775–780.
2. Fault diagnosis of electric submersible pump tubing string leakage / J. Yang, W. Li, J. Chen, L. Sheng // International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Science. – 2021. – V. 245. – P. 1–6.
3. Study of the bubble motion in a centrifugal rotor based on visualization in a rotating frame of reference / E.M. Ofuchia, H.L.V. Silva, D. Bertoldia, E. Mancillaab, H. Stela, R.E.M. Morales // Chemical Engineering Science. – 2022. – V. 259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117829>.
4. Palgrave R. Troubleshooting centrifugal pumps and their systems. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. – 688 p.
5. Kaesti E.Y., Helmy M.F., Yusrizal M.Z. Production optimization with ESP methods on high GOR wells // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2245. – P. 030006.
6. Гафурова Н.Н. Оптимизация работы УЭЦН для предотвращения образования осложнений // Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: Материалы XIX молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – СПб, 2020. – С. 32–35.
7. Лукашов Г.Ю., Царьков И.В. Осложнения, возникающие при эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН на Даниловском нефтегазоконденсатном месторождении // Ашировские чтения. – 2020. – Т. 1. – № 1 (12). – С. 98–100.
8. Stewart M. Centrifugal pumps. – Amsterdam: Gulf Professional Publ., 2019. – 309 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-09895-0.00003-X>
9. On the performance of a centrifugal pump under bubble inflow: Effect of gas-liquid distribution in the impeller / D. He, L. Zhao, Z. Chang, Z. Zhang, P. Guo, B. Bai // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 203. – P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108587>
10. Surfactant effect on air/water flow in a multistage electrical submersible pump (ESP) / J. Zhu, H. Zhu, Z. Wang, J. Zhang, R.C. Melendez, J.A.M. Farfan, H.Q. Zhang // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – V. 98. – P. 95–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exthermflusci.2018.05.013>
11. Сухоруков М.П., Торгаева Д.С., Мамлина В.В. Сравнительный анализ методов определения динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве нефтяной скважины // Электронные средства и системы управления: Материалы XIII Международной научно-практической конференции. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 178–181.
12. Wei J., Wei Z., Tai-fu L. A review of dynamic fluid level detection for oil well // Mechanics and Materials. – 2014. – V. 456. – P. 582–586.
13. Fully automated fluid level measurement tool / G. Sam, C. Burgstaller, M. Kaestenbauer, E. Chevelcha // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Jakarta: SPE, 2011. – P. 20–22.
14. Song C., Guan X. The monitoring system design of oil well dynamic fluid level // Journal of Physics: 4th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing. – Xi'an, China, 2019. – P. 29–31.
15. Fangtian L. Research and application of auxiliary methods for dynamic liquid level admission // Science and technology & enterprise. – 2012. – V. 1237. – P. 95–110.
16. Исследование характеристик струйного насоса численным моделированием / К.Р. Уразаков, И.А. Мухин, Р.И. Вахитова, Д.А. Сарычева, И.В. Волков // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 14. – С. 149–154.
17. Струйный аппарат для перепуска затрубного газа: пат. Рос. Федерация, № 2517287, заявл. 19.11.2012, опубл. 27.05.2014. Бюл. № 15.
18. Shrouded Y-tool application for optimum ESP system run life / A. Al Rashidi, A. Al Ansari, A. Radcliffe, K.O. Company, A.P. Company // International Petroleum Technology Conference. – 2020. – P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-20137-Abstract>
19. Gabor T. Three inventions shaping the future of ESP technology // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol>
20. Simulation of a well with ESP on tubing and natural flow on annulus for energy saving of well alike / H.K. Oetomo, M.T. Fathaddin, C. Sebastian, D.Y. Ananda // AIP Conference Proceedings 2363, 020009. – 2021. DOI: 10.1063/5.0061423/
21. Joseph A.A., Adeoti A.O. Impact of fluid properties on Electric Submersible Pumps (ESP) performance and run life in a well // Journal of Applied Sciences and Environmental Management. – 2021. – V. 25. – № 2. – P. 140–143. DOI: 10.4314/jasem.v25i2.
22. Flow visualization in centrifugal pumps: a review of methods and experimental studies / R.M. Perissinotto, W.M. Verde, J.L. Biazussi, N.A.V. Bulgarelli, W.D.P. Fonseca, M.S. de Castro, E. de Franklin, A.C. Bannwart // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 203. – P. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108582>.

Поступила: 05.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 02.03.2023 г.

Информация об авторах

Тотанов А.С., аспирант кафедры технологических машин и оборудования, Институт нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Молчанова В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, горно-нефтяной факультет, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Уразаков К.Р., доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, горно-нефтяной факультет, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 621.67

STUDY OF THE PERFORMANCE OF THE DYNAMIC LEVEL STABILIZATION SYSTEM OPERATION IN THE WELLBORE EQUIPPED WITH AN ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP UNIT

Alexander S. Totanov¹,
063samng@gmail.com

Veronika A. Molchanova¹,
mba_2019@mail.ru

Kamil R. Urazakov¹,
urazakk@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450038, Russia.

The relevance of the study is related to the widespread use of electrical submersible pump units in the production of low-viscosity oils and water-gas-oil emulsions at this stage of development of mechanized production. However, the current production conditions associated with changing reservoir parameters bring to the fore a number of technical problems that need to be solved. One of these challenges is the phenomenon in which the dynamic level of the well decreases due to changes in reservoir parameters (reservoir pressure, productivity factor, etc.). Decrease of dynamic liquid level in the well leads to complications during operation of electrical submersible pump units. As a consequence, the increased cavitation in impellers is possible due to pressure reduction on the pump intake, and also full pump supply failure is not excluded at significant reduction of the dynamic level of the borehole fluid. In this relation, a technical solution, consisting in installation of bypass device (electric valve) above the place of suspension of electrical submersible pump plant to maintain stable dynamic liquid level in the well and avoid complications during pump operation, was suggested. To confirm the feasibility of the dynamic level stabilization system, a mathematical model was developed to evaluate the effectiveness of complication prevention with the help of the proposed technical solution during the operation of the electric centrifugal pump unit.

The main aim of the research is to develop a calculation method for studying the dynamics of the dynamic level stabilization system.

Objects: an electrical submersible pump unit in conjunction with a system for stabilizing the dynamic level of the well. The influence of the diameter and length of the electric valve on the efficiency of the dynamic level recovery was studied, taking into account hydraulic losses during the system operation.

Methods. The research method is reduced to numerical solution of differential, linear and non-linear equations describing flow and pressure at electrical submersible pump unit outlet in steady-state mode, fluid flow through the electrical valve taking into account hydraulic resistances, flow of hydrodynamic processes in annular space during stabilization system operation, that is change of fluid level above the pump depending on borehole conditions and design parameters of electric valve.

Results. Effect of parameters of the bypass valve – the diameter of flow section and length on dynamics of change of a liquid level above the pump, as well as the impact of liquid properties, namely its viscosity on intensity of restoration of a liquid level above the pump was studied. It was found that when the diameter of the electric valve is increased, more intensive restoration of the liquid level above the pump is observed due to the reduction of hydraulic resistance in the valve cavity. Similarly, it was found that with increase of electric valve length, as well as with increase of viscosity of liquid, coefficient of flow and intensity of liquid level recovery above the pump decreases respectively.

Key words:

electrical submersible pump unit, dynamic level, bypass device, annular space, electric valve.

REFERENCES

1. Joon-Ho C. A study on the operation status monitoring, diagnosis and failure prediction algorithm of smart ESP. *The Journal of Next-generation Convergence Technology Association*, 2022, vol. 6, pp. 775–780.
2. Yang J., Li W., Chen J., Sheng L. Fault diagnosis of electric submersible pump tubing string leakage. *International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Science*, 2021, vol. 245, pp. 1–6.
3. Ofuchi E.M., Silva H.L.V., Bertoldi D., Mancilla E., Stela H., Morales R.E.M. Study of the bubble motion in a centrifugal rotor based on visualization in a rotating frame of reference. *Chemical Engineering Science*, 2022, vol. 259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117829>.
4. Palgrave R. *Troubleshooting centrifugal pumps and their systems*. Butterworth-Heinemann, Oxford Publ., 2019. 688 p.
5. Kaesti E.Y., Helmy M.F., Yusrizal M.Z. Production optimization with ESP methods on high GOR wells. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2245, pp. 030006.
6. Gafurova N.N. Optimizatsiya raboty UETSN dlya predotvrashcheniya zabolevaniy [Optimization of ESP operation for disease prevention]. *Shag v budushchee: teoreticheskie i prikladnye issledovaniya sovremennoy nauki. Materialy XIX molodezhnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Steps into the future: theoretical and applied research of modern science. Proc. of the XIX Youth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. St Petersburg, 2020. pp. 32–35.
7. Lukashov G.Yu., Tsarkov I.V. Oslozhneniya, voznikayushchie pri ekspluatatsii skvazhin, oborudovannykh UETSN na Danilovskom neftegazokondensatnom mestorozhdenii [Complications arising from the operation of wells equipped with ESP at the Danilovskoe oil and gas condensate field]. *Ashirovskie readings*, 2020, vol. 1, no. 1 (12), pp. 98–100.
8. Stewart M. *Centrifugal pumps*. Amsterdam, Gulf Professional Publ., 2019. 309 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-09895-0.00003-X>.
9. He D., Zhao L., Chang Z., Zhang Z., Guo P., Bai B. On the performance of a centrifugal pump under bubble inflow: Effect of gas-liquid distribution in the impeller. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108587>.
10. Zhu J., Zhu H., Wang Z., Zhang J., Melendez R.C., Farfan J.A.M., Zhang H.Q. Surfactant effect on air/water flow in a multistage

- electrical submersible pump (ESP). *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, vol. 98, pp. 95–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.05.013>.
11. Sukhorukov M.P., Torgaeva D.S., Mamlina V.V. Sravnitelny analiz metodov opredeleniya dinamicheskogo urovnya zhidkosti v mezhtrubnom prostranstve nefyanoy skvazhiny [Comparative analysis of methods for determining the dynamic level of the liquid in the interpipe space of an oil well]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Electronic control tools and systems. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference], Tomsk, V-Spectrum Publ., 2017, pp. 178–181.
 12. Wei J., Wei Z., Tai-fu L. A review of dynamic fluid level detection for oil well. *Mechanics and Materials*, 2014, vol. 456, pp. 582–586.
 13. Sam G., Burgstaller C., Kaestenbauer M., Chevelcha E. Fully automated fluid level measurement tool. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Jakarta, 2011, pp. 20–22.
 14. Song C., Guan X. The monitoring system design of oil well dynamic fluid level. *Journal of Physics: 4th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing*. Xi'an, China, 2019, pp. 29–31.
 15. Fangtian L. Research and application of auxiliary methods for dynamic liquid level admission. *Science and technology & enterprise*, 2012, vol. 1237, no. 2, pp. 95–110.
 16. Urazakov K.R., Mukhin I.A., Vakhitova R.I., Sarycheva D.A., Volkov I.V. Investigation of the characteristics of a jet pump by numerical simulation. *Oil and Gas Business*, 2015, vol. 13, no. 14, pp. 149–154. In Rus.
 17. Urazakov K.R., Vakhitova R.I., Saracheva D.A., Abramov E.V. *Struynny apparat dlya perepuska zatrubnogo gaza* [Jet apparatus for bypassing annulus gas]. Patent RF, no. 2517287, 2014.
 18. Al Rashidi A., Al Ansari A., Radcliffe A. Shrouded Y-tool application for optimum ESP system run life. *International Petroleum Technology Conference*. 2020. pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-20137-Abstract>.
 19. Takacs Gabor. Three inventions shaping the future of ESP technology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol>.
 20. Oetomo H.K., Fathaddin M.T., Sebastian C., Ananda D.Y. Simulation of a well with ESP on tubing and natural flow on annulus for energy saving of well alike. *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2363, 020009. DOI: 10.1063/5.0061423
 21. Joseph A.A., Adeoti A.O. Impact of fluid properties on Electric Submersible Pumps (ESP) performance and run life in a well. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 140–143. DOI: 10.4314/jasem.v25i2.
 22. Perissinotto R.M., Verde W.M., Biazussi J.L., Bulgarelli N.A.V., Fonseca W.D.P., Castro M.S., Franklin E., Bannwart A.C. Flow visualization in centrifugal pumps: A review of methods and experimental studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108582>.

Received: 5 February 2023.

Reviewed: 2 March 2023.

Information about the authors

Alexander S. Totanolov, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

Veronika A. Molchanova, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622.276.4:622.276.57:622.276.58

ОБЗОР И КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДОБЫЧИ НЕФТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫМ СПОСОБОМ В ПЕРЕРЫВИСТЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛО- И СРЕДНЕДЕБИТНЫХ СКВАЖИН

Кладиев Сергей Николаевич,
kladiev@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Российская Федерация является одним из мировых лидеров среди нефтедобывающих стран по разведанным запасам нефти. Исторически промышленная добыча нефти в Российской Империи началась в районе Каспийского моря на территории современного Азербайджана. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. в качестве одной из мер обеспечения энергетической безопасности страны предусматривает введение в экономический оборот трудноизвлекаемых запасов нефти (в том числе из Баженовской свиты) на основе инновационных отечественных технологий и оборудования. Основной проблемой нефтяной отрасли в России, как и во всем мире, является снижение качества ресурсной базы. В нефтедобывающих регионах наблюдается истощение активных запасов нефти. Предполагается вовлечение в активную эксплуатацию значительных остаточных запасов разрабатываемых месторождений за счет применения новых технологий добычи нефти. Пути роста нефтедобычи возможны в соответствии с тремя различными сценариями: инновационный – предполагается наращивание вклада в совокупные показатели российской добычи нефти со стороны новых провинций, таких как Восточная Сибирь, Республика Саха (Якутия), а также новых месторождений Западной Сибири и Красноярского края, и освоение шельфа северных морей; форсированный – в случае более активного внедрения новых технологий и стимулирующих мер, удешевляющих процесс добычи, возможно повышение эффективности добычи нефти на шельфовых и трудноизвлекаемых месторождениях; экстенсивный – возможен только при высоких рыночных ценах на нефть. Добыча нового объема нефти в России будет осуществляться исключительно электроприводным способом.

Цель: обзор и критический анализ современного состояния и путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин.

Объект: теоретическое обоснование внедрения в практику циклической или кратковременной эксплуатации установок электроцентробежных насосов при электроприводном способе скважинной добычи нефти.

Методы: геофизические исследования для разработки концепции эксплуатации малodeбитного фонда скважин, способов повышения рентабельности нефтедобычи, методы оптимизации фонда средне- и малodeбитных скважин, ввод их в экономический оборот.

Результаты. На основе критического анализа литературных источников и технико-экономического обоснования показано, что наиболее перспективным способом добычи трудноизвлекаемых нефтяных запасов на примере Баженовской свиты является электропривод погружного центробежного насоса по схеме «наземный силовой преобразователь – погружной кабель – погружной электродвигатель – электроцентробежный насос». Технология циклической или кратковременной эксплуатации скважин при нефтедобыче для мало- и среднедебитных скважин является экономически обоснованной и повсеместно внедряется на скважинах, которые невозможно эксплуатировать в непрерывном режиме.

Ключевые слова:

энергетическая стратегия России в области ТЭК, технологический процесс скважинной добычи нефти, электроприводный способ добычи нефти, мало- и среднедебитные скважины, обводненные скважины, интенсификация добычи нефти, периодический режим работы нефтяных скважин, циклический режим работы скважин.

Введение

Топливо-энергетический комплекс России в значительной мере определяет энергетическую стратегию нашей страны, так как является основой развития её экономики, обеспечения жизнедеятельности и роста производительных сил государства. «...При численности населения России в 2,5 % от всего населения Земли страна имеет около 45 % потенциальных мировых запасов природного газа, 13 % – нефти, 23 % – угля, 14 % – урана...» [1].

Российская Федерация является одним из мировых лидеров среди нефтедобывающих стран по разведанным запасам нефти. Исторически промышленная добыча нефти в Российской Империи началась в районе Каспийского моря на территории современного Азербайджана. Уже в 1846 г. на Апшеронском полуострове была пробурена первая разведочная нефтяная скважина. В 1864 г. появилась первая эксплуата-

ционная скважина на Кубани на реке Кудак. Уже к 1879 г. «Товарищество нефтяного производства братьев Нобель» вело промышленную нефтедобычу и нефтепереработку в Баку, для чего была создана инфраструктура по добыче, переработке и транспортировке товарной продукции [2]. В период с 1930 по 1950 гг. были разведаны и запущены в эксплуатацию нефтяные месторождения в Закавказье и Поволжье [3, 4]. С 1960 г. нефтедобыча активно развивалась на Урале (Тимано-Печорский район) и в Западной Сибири [5]. С 1965 по 1985 гг. экспорт нефти и нефтепродуктов в СССР вырос в 2,5 раза – с 75,7 до 193,5 млн т. Современная нефтедобывающая отрасль в России имеет глубокие исторические предпосылки для дальнейшего развития [6].

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. в качестве одной из мер обеспечения энергетической безопасности страны преду-

смачивает «...введение в экономический оборот ... трудноизвлекаемых запасов нефти (в том числе из баженовской свиты), ... на основе инновационных отечественных технологий и оборудования...» [7].

Теоретическое обоснование внедрения в практику циклической или кратковременной эксплуатации установок электроцентробежных насосов

Проанализируем «Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года». Документ разработан Минэкономразвития России в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 года № 596 «О долгосрочной государственной экономической политике» и предусматривает создание и модернизацию высокопроизводительных рабочих мест, ускоренное развитие высокотехнологичных и наукоёмких отраслей экономики, повышение инвестиционной активности и улучшение предпринимательского климата, рост производительности труда и решение задач социального развития [8]. Дальнейший критический анализ современного состояния и путей развития технологического процесса добычи нефти проведем на основе этого документа.

На 2013 г. Россия занимала восьмое место в мире по разведанным запасам нефти (5,3 %). «...В целом по Российской Федерации 77 % доказанных запасов находились на разрабатываемых месторождениях. Практически все разрабатываемые месторождения характеризовались высокой степенью выработанности разведанных запасов – более 60 %...» [8]

По объему нефтяных запасов месторождения в России подразделяются на крупные, средние и мелкие. «...По состоянию на 2013 год, структура запасов нефти новых месторождений и нераспределенного фонда характеризовалась высокой долей мелких месторождений (величина извлекаемых запасов до 15 млн тонн), удаленностью инфраструктуры, сложными геологическими условиями разработки. Только треть всех разведанных запасов являлись активными, при этом 67 % – трудноизвлекаемые запасы, в том числе высоковязкие нефти – 13 %, малопроницаемые коллектора – 36 %, малые толщины пластов – 4 %, подгазовые зоны – 14 %...» [7].

По объему добычи нефти на 2013 г. Россия занимала одно из лидирующих мест в мире. При существовавшем уровне добычи разведанных запасов предполагалось, что нефти хватит более чем на 30 лет. «...Темпы роста добычи нефти с 2008 по 2013 гг. колебались от 99,4 % до 102,2 %, при этом среднегодовой темп роста добычи нефти составил 101,3 %...» [8]

Основной проблемой нефтяной отрасли в России, как и во всем мире, являлось и является снижение качества ресурсной базы. «...В ряде нефтедобывающих регионов наблюдалось и наблюдается истощение активных запасов нефти. В старых районах добычи прироста запасов в перспективе будут сокращаться. При этом предполагается вовлечение в активную эксплуатацию значительных остаточных запасов разрабатываемых месторождений за счет применения новых технологий добычи нефти, а также интенсифика-

ция поисково-разведочных работ на новых площадях в действующих регионах...» [8].

Предполагается, что рост нефтедобычи до 2030 г. будет обеспечиваться за счет новых нефтяных районов в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке и освоения шельфовых морских месторождений.

«...Основными факторами, определяющими развитие нефтедобычи, являются качество разведанной сырьевой базы, применение новых технологий, позволяющих увеличить коэффициент извлечения нефти, уровень цен на нефть на мировых рынках, налоговая политика, а также развитие инфраструктуры...» [8].

Пути её роста возможны в соответствии с тремя различными сценариями: экстенсивным, инновационным и форсированным.

Темпы роста добычи нефти замедлятся при всех вариантах развития. «...Внутреннее потребление нефти будет определяться производственными мощностями, темпами и структурными особенностями развития экономики, и интенсивностью внедрения ресурсосберегающих технологий...» [8].

Инновационный сценарий: «...Предполагается наращивание вклада в совокупные показатели российской добычи нефти со стороны новых провинций, таких как Восточная Сибирь, Республика Саха (Якутия), а также новых месторождений Западной Сибири и Красноярского края. Объемы добычи нефти по проектам Соглашения о разделе продукции (Сахалин-1, Сахалин-2, Харьягинское месторождение, Сахалин-3 и освоение шельфа северных морей)...» [8].

При реализации инновационных программ нефтяными компаниями с государственным участием, такими как ОАО «НК «Роснефть», предполагается повышение коэффициента извлечения нефти, что повысит эффективность использования уже разведанных запасов и позволит замедлить снижение добычи на старых месторождениях [7].

Происходит стимулирование реализации инновационных технологий по освоению сложных залежей Баженовской свиты, что позволит стабилизировать уровень добычи в Западной Сибири [8].

«...Добыча нефти стабилизируется на уровне 512...517 млн тонн. Выход новых крупных месторождений на проектную мощность на некоторое время приостановит тенденцию стабилизации, и по прогнозам на 2022 год предполагалось увеличение добычи нефти до 517 млн тонн. Однако к 2030 году добыча нефти должна снизиться до 512 млн тонн, что связано с переходом на позднюю стадию эксплуатации основных месторождений, введенных в 2016–2018 годах...» [8].

«...Расширение экспортных мощностей в восточном направлении позволит увеличить экспортные поставки нефти до 252 млн тонн к 2020 году, однако к 2030 году экспорт нефти снизится до 247 млн тонн за счет незначительного снижения европейского спроса на российскую нефть. Доля экспортируемой нефти составит в 2030 году около 48 процентов...» [8].

«...Суммарный объем капиталовложений в добычу нефти в сопоставимых ценах в период 2012–2030 гг. составит более 19 трлн рублей. Производительность труда в добыче нефти возрастет к 2030 году на 28,8 %...» [8].

Форсированный сценарий: «...В случае более активного внедрения новых технологий и стимулирующих мер, удешевляющих процесс добычи, возможно повышение эффективности добычи нефти на шельфовых и трудноизвлекаемых месторождениях...» [8].

Экстенсивный сценарий нефтедобычи возможен только при высоких рыночных ценах на нефть.

«...Низкие цены на нефть с мировой тенденцией к замещению природных углеводородов на экологически чистые возобновляемые источники энергии приведут к снижению её потребления, что спровоцирует интенсивное снижение объемов добычи на освоенных месторождениях и недостаточное освоение новых...» [8].

При высоких ценах на нефть и нефтепродукты добыча нефти будет осуществляться с учетом интенсивного освоения действующих и новых месторождений за счет повышения эффективности их использования. «...Предполагается ввод в разработку ранее нерентабельных низкодебитных участков недр, наращивание добычи на шельфовых месторождениях и активное освоение залежей Баженовской свиты...» [8].

Дискуссия по приоритетам развития энергетической отрасли РФ

На заседании научной сессии общего собрания членов Российской академии наук (РАН) в 2018 г. состоялась общая дискуссия по приоритету в энергетической отрасли России, на которой выступили академики РАН А.Э. Конторович, С.П. Филиппов, С.В. Алексеенко, В.И. Бухтияров и С.М. Алдошин [9].

Академик РАН А.Э. Конторович, отвечая на вопрос: «Что делать в условиях неизбежного падения добычи традиционной нефти в стране?», обратил внимание на два важнейших направления приложения сил государства. «...Первое: необходимо сфокусировать внимание на средних и мелких месторождениях, которые в изобилии открыты геологами, но мало осваиваются, поскольку на крупных месторождениях добывать нефть выгоднее. И они еще будут открываться. Такие месторождения могут давать до 100 млн т нефти в год. Это долгосрочная задача. Для ее решения не требуется супервысоких технологий, однако нужна соответствующая реформа законодательной и нормативной базы, а также подключение финансовых ресурсов...» [9].

«...Второе направление. В Западной Сибири находится уникальный объект – Баженовская свита. Это крупнейшее в России сланцевое месторождение нефти. С ним может сравниться, пожалуй, только Доманиковская свита, расположенная в Европейской части страны вдоль Уральского хребта практически от Печорского моря до Каспия, – второй по размерам и объемам после Баженовской свиты потенциальный источник сланцевой нефти в России. Аналогичные толщи есть и в Восточной Сибири и на Северном Кавказе...» [9].

Академик РАН С.П. Филиппов отметил важность проблем «...разработки конкурентоспособных отечественных газовых турбин широкого диапазона мощности, решающих задачу обеспечения научно-технологической независимости электроэнергетики

страны, и создание новых технологий распределенной генерации, способных надёжно обеспечить энергией отдаленные регионы, в том числе огромные территории Арктики, Сибири и Дальнего Востока...» [9].

Академик РАН С.В. Алексеенко считает, что «...возобновляемые источники энергии (ВИЭ), к которым относят солнечную, ветровую, геотермальную энергию, низкопотенциальное тепло, энергию малых водотоков и биомассы, включая энергию от переработки отходов...» не находят достаточной поддержки государства для их освоения, хотя «...технический потенциал ВИЭ России огромный – его оценивают, как вшестеро превосходящий сегодняшний уровень энергопотребления в стране...» [9].

Академик РАН В.И. Бухтияров, возглавляющий профильную секцию «Добыча, транспортировка и переработка углеводородного сырья» одного из семи тематических советов по реализации Стратегии научно-технологического развития РФ, остановился на проблемах добычи и глубокой переработки углеводородов, с помощью «...комплексных научно-технических программ (КНТП): "Перспективные направления развития технологий добычи и транспортировки углеводородного сырья" и "Технологии и катализаторы глубокой и эффективной переработки углеводородного сырья"...» [9].

Академик РАН С.М. Алдошин, анализируя «...возможные способы кооперации институтов РАН, вузов, крупных отечественных компаний и промышленных предприятий при создании проектов полного инновационного цикла...», привел пример удачно реализованной национальной технологической инициативы – Центра компетенций НТИ «Новые и мобильные источники энергии», созданного на базе Института проблем химической физики РАН [9].

Основной вывод дискуссии членов РАН состоит в том, что все вышеперечисленные проблемы имеют комплексный характер и могут быть решены на основе системного подхода специалистами разных направлений науки и техники к развитию энергетической отрасли РФ. В частности, академик РАН А.Э. Конторович указал: «...На разработку сланцевой нефти американцы потратили 30 лет...мы решим задачу силами мультидисциплинарного научного коллектива физиков, математиков, механиков, геологов и геофизиков за 7...10 лет и потратим на это в 5...6 раз меньше денег, чем за океанские партнеры...» [9].

Очевидно, что в составе этого коллектива обязательно должны быть представлены ученые и специалисты в области автоматизации технологических процессов нефтедобычи и локальных систем автоматического управления на основе специальных бездатчиковых регулируемых электроприводов погружных электроцентробежных и винтовых насосов.

Энергетическая политика и стратегия России

Энергетическая политика России как сложный динамически развивающийся мировой процесс представляет систему непрерывного отслеживания энергетической ситуации в стране и в мире, прогноз возможных экономических, ресурсных тенденций, фор-

мирование и совершенствование механизмов, обеспечивающих надежное энергоснабжение и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Российская энергетическая политика проводится в соответствии с главным программным документом – «Энергетической стратегией РФ на период до 2035 года», утверждена Распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р [10].

В соответствии с этой стратегией перед нефтедобывающей отраслью были поставлены задачи эффективного обеспечения потребностей социально-экономического развития Российской Федерации соответствующими объемами производства и экспорта продукции и услуг отраслей топливно-энергетического комплекса, в частности:

- обеспечение стабильного, при благоприятных условиях растущего уровня добычи нефти;
- повышение эффективности, доступности и качества удовлетворения внутреннего спроса на нефтепродукты [10].

Решение задач нефтедобывающей отрасли требует поддержания добычи нефти и газового конденсата в период до 2024 г. в диапазоне 555–560 млн т, а в период до 2035 г. – в диапазоне 490–555 млн т [10].

Для решения задач по обеспечению стабильного уровня нефтедобычи предлагается комплекс ключевых мер:

- комплексное стимулирование разработки «зрелых» месторождений [10];
- введение в экономический оборот малых месторождений, малодебитных и высокообводненных скважин, трудноизвлекаемых запасов (в том числе Баженовской свиты), а также создание условий для развития малых и средних предприятий в этой сфере деятельности преимущественно на основе инновационных отечественных технологий и оборудования [10];
- создание технологических полигонов для отработки технологий рентабельной добычи углеводородного сырья из трудноизвлекаемых запасов [10];
- развитие внутреннего рынка сервисных, инжиниринговых и строительных услуг в нефтяной отрасли и расширение участия в нем российских организаций [10].

Баженовская свита – крупнейшая в мире нефтеносная формация, располагающаяся в Западной Сибири на площади около одного миллиона квадратных километров.

По оценкам Роснедр, в Баженовской свите содержится 180–360 млрд баррелей извлекаемых запасов, а по мнению специалистов из US EIA (2013 г.), в свите суммарные запасы составляют около 1,2 трлн баррелей нефти, из которых 74 млрд могут быть технически извлекаемыми. Учитывая эти данные, возрастающее внимание к «бажену» легко объяснимо. Несомненно, свою роль здесь сыграла сланцевая революция в США, наглядно показав потенциальные перспективы разработки подобных горизонтов и необходимость создания соответствующих технологических инструментов [11–17].

Интерес, проявленный к «бажену» крупнейшими нефтедобывающими компаниями: «Сургутнефтегаз», «Роснефть», «РуссНефть», РИТЭК и «Газпром нефть», привел к созданию в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО) технологического центра «Бажен» [18]. Компанией «Газпром нефть» разработан паспорт федерального проекта «Освоение баженовской свиты в Западной Сибири» [18]. С технологических позиций баженовская свита по своему строению и геомеханическим свойствам пород является полным антиподом основного объекта сланцевой добычи – Среднего Бакена (Северная Дакота, США), на котором отрабатывались сланцевые технологии [19]. В частности, характерная особенность баженовской свиты – высокие пластовые температуры и давление, осложненные глубиной залегания пластов [14, 19–21]. Указанная специфика «бажена» усугубляет проблему надежного и энергоэффективного извлечения продукции из скважины. Основной инструмент здесь – установки электроцентробежных насосов (УЭЦН). По данным ОАО «НК «Роснефть», работа группы из 223 скважин с высокой потребляемой мощностью на «традиционных» месторождениях из-за тепловых потерь в кабельных линиях, питающих данные УЭЦН, привела к сверхнормативным потерям электроэнергии около 50 млн кВт·ч/год [22].

Эксплуатация УЭЦН в условиях «бажена» очевидно существенно усугубит эту ситуацию. Исправить ее можно только путем построения фундаментальной математической модели электротехнического комплекса скважинной нефтедобычи на основе УЭЦН, что создаст предпосылки для последующей энергоэффективной оптимизации электротехнического комплекса и перехода к промышленной разработке баженовской свиты [23].

Для освоения месторождений Баженовской свиты, характеризующихся глубоким залеганием 2–4 км «...глубина погружения Баженовской свиты на территории исследования – ...на северо-востоке Тамратской впадины (юго-восток Нюрольского осадочного бассейна..., в административном отношении территория располагается в Каргасокском районе Томской области, согласно принятому нефтегазогеологическому районированию, относится к Пудинскому нефтегазоносному району Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции ... достигает 2788...2815 м (скважина 1) и 3118...3145 м (скважина 2)» [15, 22] трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) нефти в осложненных условиях эксплуатации скважин, непрерывная и периодическая добыча нефти электроприводными установками погружных электроцентробежных насосов оказывается технически несостоятельной.

Способы эксплуатации [24], критерии перевода скважин с постоянного на периодический режим работы [25], оптимизация подбора параметров обустройства скважины с УЭЦН с учетом условий эксплуатации при проектировании периодических режимов работы [26, 27], оптимизация, методическое и экспериментальное обеспечение определения технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации рассмотрены в ра-

ботах [28, 29]. Вопросы энергоэффективности УЭЦН [30–33], в том числе эффективности периодической эксплуатации малодебитного фонда скважины, приведены в статьях [33, 34].

Особенно интересна в этом смысле статья представителя производственной сферы в области нефтедобычи. Начальник производственного отдела ОАО «Самотлорнефтегаз» М.Н. Антипин приводит результаты внедрения циклической эксплуатации скважин (ЦЭС) УЭЦН на своем предприятии [34]. По мнению М.Н. Антипина ЦЭС «... представляет собой комбинацию периодической ... и непрерывной эксплуатации скважин УЭЦН с регулируемым приводом...» [34]. При этом утверждается, что с технической точки зрения от других режимов эксплуатации скважин ЦЭС отличается возможностью регулирования объема выкачиваемой из скважины жидкости «...путем изменения соотношения продолжительности откачки жидкости из скважины и продолжительности накопления жидкости в скважине изменением скорости вращения насоса...» [34].

На разведанных нефтяных месторождениях, которые эксплуатируются достаточно продолжительное время (свыше 10–15 лет), имеется фонд высоко-, средне- и малодебитных скважин. В первую очередь осваиваются высокодебитные скважины, т. к. основной объем добытой нефти приходится именно на них. Средне- и малодебитные скважины используются для добычи во вторую очередь. По мере разработки месторождений у большинства эксплуатируемых скважин имеется тенденция к снижению дебита и объема добычи нефти за счет снижения внутрипластового давления при истощении нефтяных запасов. Закачка воды в нефтяные пласты через нагнетательные скважины для повышения внутреннего давления приводит к их обводнению и уменьшению процентного содержания нефти в добываемой пластовой жидкости.

Можно выделить три ключевые проблемы развития нефтедобычи в России: рост доли трудноизвлекаемых запасов нефти; снижение величины конечного коэффициента извлечения нефти; существенный рост себестоимости добычи нефти. Кроме того, сокращение объемов дорогостоящих геологоразведочных работ приводит к снижению количества новых месторождений. Даже крупные нефтяные компании не заинтересованы в масштабном финансировании таких работ.

Рост доли трудноизвлекаемых запасов нефти. ТРИЗ можно описать с помощью двух факторов – ухудшенные свойства нефти и (или) неблагоприятные условия добычи нефти. Сюда можно отнести запасы шельфовых месторождений, высоковязкие нефти, а также остаточные запасы месторождений на поздней стадии разработки. К трудноизвлекаемым запасам относятся: низкопроницаемые коллектора с высокой неоднородностью; нетрадиционные коллектора; остаточные запасы нефти на месторождениях с высокой обводненностью; залежи с высоковязкой нефтью. Также к ТРИЗ относят невостребованные запасы нефти: запасы законсервированных месторождений, запасы неразрабатываемых месторождений, расположенных на участках санитарных, водоохранных зон и

зон, относящихся к прочим ограничениям. Неуклонно растет доля трудноизвлекаемой нефти в структуре общих запасов. На текущий момент она составляет более 65 %. Это влечет за собой дополнительные затраты на интенсификацию притока нефти.

Соответственно, количество средне- и малодебитных скважин в общем фонде месторождений постепенно увеличивается и приближается к 50/60 % от общего фонда по Томской области/Западной Сибири [34].

«...Объем добычи нефти в Томской области увеличится к 2030 году на 30 %, до 9 млн тонн, за счет добычи трудноизвлекаемой нефти...» об этом сообщил вице-губернатор по экономике Андрей Антонов. «...Увеличение к 2030 году ожидается за счет создания технологического полигона для проекта «Палеозой», присвоения такой нефти статуса трудноизвлекаемых запасов. Ожидается, что в ближайшие два–три года получится вовлечь палеозойскую нефть в добычу...». «...Власти региона совместно с ВУЗами и нефтяными компаниями ищут способы добычи трудноизвлекаемых запасов нефти...» [35].

Существуют примеры внедрения ЦЭС на предприятиях ОАО «Самотлорнефтегаз», где применение технологии ЦЭС положительно сказывается на наработке оборудования на отказ. «...В рамках технологии ЦЭС ударные пусковые перегрузки устраняются за счет «мягкого» безударного пуска УЭЦН при помощи преобразователя частоты (ПЧ)» [34]. Запуск УЭЦН в количестве 20 тыс. раз за 600 суток при испытании скважинного оборудования не привел к негативным последствиям. Нарботка на отказ рабочих ступеней ЭЦН при ЦЭС всегда ниже, чем при непрерывной эксплуатации, поскольку продолжительность включения ЭЦН (отношение времени включения ко времени цикла) в работу всегда менее 100 %. Например, циклическая эксплуатация скважины дебитом 20 м³/сут оборудованием, рассчитанным на 130 м³/сут, увеличивает среднюю наработку на отказ в 6,5 раз, а межремонтный период (МРП) – на 20–180 % [34]. «...Увеличение МРП при ЦЭС способствует также и присущая только этому способу добычи возможность ослабления негативного влияния всех основных осложняющих эксплуатацию скважин факторов...» [34].

ЦЭС положительно сказывается на борьбе с асфальто-смоло-парафиновыми отложениями (АСПО), солеотложением, механическими примесями, повышенной температурой электромеханического оборудования и коррозией металлических узлов УЭЦН. При этом повышается отказоустойчивость элементов УЭЦН и энергоэффективность установки в целом [34].

«... ЦЭС с частотно-регулируемым электроприводом УЭЦН позволяет добиться увеличения объемов добычи в среднем на 10...15 % путем согласования параметров системы «нефтяной пласт – скважина – насосная установка ...» [34]. Это происходит за счет увеличения продолжительности включения ЭЦН, поскольку время цикла при ЦЭС меньше, чем время цикла при кратковременном режиме работы, и приводит к сокращению простоев по текущему ремонту

скважин (ТРС). «...В отличие от непрерывной эксплуатации при ЦЭС удастся оптимизировать всю систему и работу её отдельных элементов в широком диапазоне изменения условий эксплуатации...» [34].

«...Наличие в составе оборудования для ЦЭС современной станции управления (СУ) с программируемым контроллером и ПЧ...» [34] позволяет внедрять технические средства автоматизации, связывая станции управления и системы измерительной телеметрии, при этом не увеличивает капиталовложения в оборудование.

Технология ЦЭС позволяет производить согласование электрооборудования исполнительных устройств с технологическими операциями по расклиниванию ЭЦН, предупреждению заклинивания ЭЦН и профилактике осложненных условий эксплуатации [34, 36].

В статье М.Н. Антипина приведена статистика результатов опытных испытаний технологии ЦЭС в ОАО «Самотлорнефтегаз» на протяжении двух лет: «...Циклическим способом можно эффективно эксплуатировать при помощи УЭЦН не только среднедебитные (20...80 м³/сут), но и малodeбитные скважины (5...20 м³/сут). Причем на скважинах в диапазоне дебитов 20...50 м³/сут. преимущества ЦЭС не подлежат сомнению...» [34].

Таким образом, на примере месторождений ОАО «Самотлорнефтегаз» показано, что технология ЦЭС является экономически обоснованной, позволяет увеличить объемы добычи нефти, снижает себестоимость добычи нефти, доля затрат электроэнергии на единицу (тонну) добываемой нефти снижается.

В 2007 г. опубликован способ кратковременной эксплуатации скважины погружной насосной установкой с электроприводом (способ Н.П. Кузьмичева) [37]. Предложенное изобретение относится к механизированной добыче жидкости из скважин и может быть использовано для эксплуатации преимущественно среднедебитных и малodeбитных нефтяных скважин, погружными установками лопастных, преимущественно центробежных, насосов с регулируемым электроприводом.

В патенте [37] дано теоретическое обоснование применения кратковременной эксплуатации (КЭС в обозначении Кузьмичева), являющейся в определенной степени разновидностью периодической или циклической эксплуатации. Показано, что оптимизация режимов эксплуатации УЭЦН, т. е. внедрение технологии ЦЭС (КЭС в обозначении Кузьмичева), по-разному влияет на показатели нефтедобычи, так как имеются как положительные, так и отрицательные факторы при рассмотрении каждого показателя в отдельности, поскольку они влияют друг на друга. Улучшение отдельного показателя неизбежно приводит к ухудшению других из-за взаимного влияния друг на друга. Только совокупное изменение всех показателей и технических решений оптимальным образом может привести к суммарному положительному эффекту при механизированной добыче нефти.

Здесь же приведены примеры технико-экономических расчетов показателей нефтедобычи

при ЦЭС в сравнении: длительной эксплуатации скважины с нерегулируемым приводом; длительной эксплуатации скважины с регулируемым приводом; периодической эксплуатации скважины с нерегулируемым приводом; кратковременной эксплуатации.

Обсуждение и анализ результатов

Результаты обзора внедрения циклической и кратковременной периодической эксплуатации нефтедобывающих скважин с установками электроцентробежных насосов показывают, что в отличие от режима непрерывной эксплуатации, перевод на циклическую эксплуатацию скважин приносит следующие преимущества. ЦЭС (КЭС) позволяет оптимизировать фонд средне- и малodeбитных скважин, ввести их в экономический оборот, что положительно сказывается на показателях нефтедобычи, тем самым удовлетворяя потребности нефтедобывающих, нефтеперерабатывающих компаний, а также потенциальных потребителей продукции [37–40].

Однако в статье [41] указано, что при повышении количества запусков электропривода погружных насосов в режиме ЦЭС (КЭС) происходит снижение МРП погружного электрооборудования. Надежность снижена в среднем в 2,5 раза, так как не исследовано влияние бросков тока и момента погружных двигателей, влияние вибрационного состояния роторных систем погружного оборудования в переходных режимах работы. Имеются различные подходы к общей структуре снижения надежности таких систем.

В октябре 2022 г. в Москве состоялась 4-я научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации малodeбитного фонда скважин – 2022», организованная экспертным советом по механизированной добыче нефти и центром профессионального развития при поддержке союза нефтегазопромышленников России [42]. В рамках конференции состоялся круглый стол «Эксплуатация малodeбитных скважин в текущих реалиях: вызовы и возможности». Были рассмотрены «...новые подходы инновационной деятельности нефтяных компаний; существующие проблемы и перспективы развития периодической эксплуатации скважин; малodeбитные установки...» [42]. Были сформулированы следующие рекомендации: «...важно обеспечить выбор конкретного оборудования с учетом его характеристик, режима периодической работы с учетом классификации по категориям (технологический, эксплуатационный – снижение притока из пласта, низкий приток из пласта, режим малodeбитной периодической эксплуатации, режим кратковременной периодической эксплуатации, режим с возможной оптимизацией и др.), при этом необходимо разработать ряд руководящих документов, которые будут определять порядок работ с периодическим фондом скважин...». При подборе режимов работы скважин кустовой площадки нужно учитывать загрузку трубопроводов. Широкое внедрение ЦЭС (КЭС) повлияло на внедрение малodeбитных насосов, поскольку для них есть определенная ниша на рынке, причем совокупная стоимость владения является одним из основных критериев их ис-

пользования [42]. Здесь, в том числе, рассматриваются взаимовлияние двух подходов: развития режимов ЦЭС (КЭС) и создания новых аппаратов нефтедобычи для малодебитных скважин. Пока лидирует ЦЭС (КЭС).

Вместе с тем следует отметить, что для решения проблем интенсификации добычи нефти на давно разрабатываемых месторождениях с тенденциями сокращения дебита и осложненными условиями эксплуатации в России и нефтедобывающих странах мира широко используют технологии, связанные с повышением нефтеотдачи пластовых коллекторов различными тепловыми, химическими, гидравлическими и тому подобными методами, в том числе их комбинациями [43–64], но в данной работе проанализированы и рассматриваются только проблемы, связанные с системой управления технологическим процессом добычи нефти электроприводным способом путем воздействия на скважину со стороны электромеханического погружного оборудования.

Выводы

1. С точки зрения Бюджета РФ нефтегазовые доходы в настоящее время играют существенную роль.
2. Анализ возможных сценариев развития ТЭК РФ (инновационного, форсированного, экстенсивного) показал, что нефть и газ будут одним из основных источников дохода государства еще двадцать–тридцать лет.
3. Дискуссия по приоритету в энергетической сфере показала, что у РФ есть еще неосвоенные ресурсы:
 - фонд малодебитных (нерентабельных) скважин, за счет перехода нашей промышленности на новый технологический уклад, при этом их

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онуфриева О.А. Энергетическая стратегия России как основа развития ТЭК // Известия Санкт-Петербургского университета экономики и финансов. – 2010. – № 6. – С. 134–137.
2. Маккей Дж.П. Бакинская нефть и Закавказские трубопроводы, 1883–1891 гг.: исследование царской экономической политики // Славянское обозрение. – 1984. – Т. 43. – № 4. – С. 604–623.
3. Lydolph P.E., Shabad T. The oil and gas industries in the USSR // Annals of the Association of American Geographers. – 1960. – V. 50. – № 4. – P. 461–486.
4. Resnik I.N. Present-day status and main development trends in the oil industry in the USSR // World Petroleum Congress. – WPC, 1963. – P. WPC-10704.
5. Grama Yu. The analysis of Russian oil and gas reserves // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2012. – V. 2. – № 2. – P. 82–91. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/361165> (дата обращения 18.05.2023).
6. Путнев Н.С. Экономическое развитие РФ в 1990-е годы // Актуальные проблемы развития финансово-экономических систем и институтов: III междунар. науч. конф. – Самара, 10–11 апреля 2012. – С. 92–99. URL: http://repo.ssau.ru/bitstream/Aktualnye-problemy-razvitiya-finansovoeconomicheskikh-sistem/Ekonomicheskoe-razvitiye-RF-v-1990e-gody-102338/1/978-5-86465-540-5_2012-92-99.pdf (дата обращения 18.05.2023).
7. Информационно правовой материал «О мерах по повышению нефтеотдачи пластов на период до 2035 года» в Комитет Совета Федерации России по экономической политике. URL: <http://council.gov.ru/media/files/VGdL7GEAXLLocKmDf9tiKPD8fS0xuyQA.pdf> (дата обращения 18.05.2023).
8. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/>

эксплуатация и добыча нефти станут рентабельными;

- локальные микродепрессии в нефтяном коллекторе позволят сохранить, а в некоторых случаях немного увеличить нефтедобычу.
4. Плата за использование ЦЭС (КЭС) – снижение надежности некоторых модулей погружного электромеханического оборудования (например, гидрозащита изнашивается более интенсивно).
 5. Необходимо разрабатывать специальные конструкции ПЭД, совершенствовать системы электропитания и синтезировать замкнутые по основным переменным (току, моменту, частоте вращения, потокосцеплению) состояния системы автоматического управления электроприводом погружного насоса.
 6. На основе критического анализа литературных источников и технико-экономического обоснования показано, что наиболее перспективным способом добычи трудноизвлекаемых нефтяных запасов на примере Баженовской свиты является электропривод по схеме «наземный силовой преобразователь – погружной кабель – погружной электродвигатель – электроцентробежный насос», обладающий излишней производительностью по откачке нефтяного флюида, но имеющий КПД в 2–2,5 раза выше, чем насосы с малой производительностью.
 7. Технология ЦЭС (КЭС) при нефтедобыче для мало- и среднедебитных скважин является экономически обоснованной и повсеместно внедряется на скважинах, которые невозможно эксплуатировать в непрерывном режиме.
- media/files/41d457592e04b76338b7.pdf (дата обращения 17.05.2022).
9. Общая дискуссия по приоритету: выступления академиков РАН А.Э. Конторовича, С.П. Филиппова, С.В. Алексеенко, В.И. Бухтиярова, С.М. Алдошина / А.Э. Конторович, С.П. Филиппов, С.В. Алексеенко, В.И. Бухтияров, С.М. Алдошин // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 4. – С. 343–347. DOI: 10.31857/S0869-5873894343-347 (дата обращения 17.05.2023).
 10. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года». URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFoiDjGVdYT4IgsAps sm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения 17.05.2023).
 11. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. Баженовская свита – дополнительный источник углеводородного сырья в Западной Сибири / А.В. Лобусев, М.А. Лобусев, В.А. Вертивец, Л.С. Кулик // Территория нефтегаз. – 2011. – № 3. – С. 28–31.
 12. МГУ им. Ломоносова. Закономерности строения баженовского горизонта и верхов абалакской свиты в связи с перспективами добычи нефти / Н.С. Балушкина, Г.А. Калмыков, Т.А. Кирюхина, Н.И. Коробова, Д.В. Корост, Е.В. Соболева, А.В. Ступакова, Н.П. Фадеева, Р.А. Хамидуллин, Т.А. Шарданова // Геология нефти и газа. – 2013. – № 3. – С. 48–61.
 13. Стрижнев К.В., Литвин В.Т. Возможность применения технологии интенсификации добычи нефти для коллекторов баженовской свиты // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2014. – Т. 10. – Вып. № 2. – С. 1–9.
 14. Баженовская свита – главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России / А.Э. Конторович, Л.М. Буриштейн, В.А. Казаненков, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, Е.В. Пономарева, С.В. Рыжкова, П.А. Ян // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 2–10.

15. Недолишко Н.М., Перевертайло Т.Г. Литолого-петрографические особенности коллекторов баженовской свиты на юго-востоке Западно-Сибирской провинции (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 77–87.
16. Белозеров В.Б., Гарсия Бальса А.С. Перспективы поиска залежей нефти в отложениях девона юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 128–139.
17. Белозеров В.Б., Силкин Г.Е. Критерии переоценки перспектив нефтегазоносности коллекторных зон фундамента юго-востока Западной Сибири // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 7–16.
18. Тихонов С. Короля играет свита. Баженовская свита и поддержание объемов нефтедобычи в Западной Сибири // Нефтегазовая Вертикаль. – 2019. – № 12. – С. 34–43.
19. Глухманчук Е.Д., Крупичский В.В., Леонтьевский А.В. Баженовская нефть – «сланцевые технологии» и отечественный опыт добычи // Недропользование XXI век. – 2015. – № 7. – С. 32–37.
20. Баженовский горизонт Западной Сибири: строение, корреляция и толщины / С.В. Рыжкова, Л.М. Бурштейн, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, А.Ю. Нехаев, Б.Л. Никитенко, М.А. Фомин, Б.Н. Шурыгин, А.Л. Бейзель, Е.В. Борисов, О.В. Золотова, Л.М. Калинин, Е.В. Пономарева // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 7. – С. 1053–1074.
21. Конторович А.Э. За нефтью и газом нужно идти в Арктику. На баженовскую свиту и на мелкие месторождения... // Нефтегазовая вертикаль. – 2019. – Т. 458. – № 14. – С. 2–17.
22. Якимов С.Б. Современное состояние и перспективные направления снижения тепловых потерь в кабельных линиях УЭЦН большой мощности в ОАО «НК «Роснефть» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 40–46.
23. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
24. Жуков Р.А., Верисокин А.Е. Обзор способов эксплуатации малодебитных скважин // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли Северо-Кавказского федерального округа: Материалы VI ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. – Ставрополь, 2018. – С. 169–173.
25. Критерии перевода скважин с постоянного на периодический режим работы / Т.А. Гунькина, В.В. Вержбицкий, В.В. Чернова, Л.А. Суворова // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли Северо-Кавказского федерального округа: материалы VI ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону». – Ставрополь, 2018. – С. 146–149.
26. Субарев Д.Н., Лапик Н.В. Оптимизация подбора параметров обустройства скважины с ЭЦН в осложненных условиях эксплуатации // Евразийский союз ученых. – 2015. – Т. 14. – № 5-3. – С. 112–114.
27. Учет условий эксплуатации при проектировании периодических режимов работы скважин, оборудованных УЭЦН / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, С.Б. Якимов, А.А. Клусов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2013. – № 6. – С. 33–39.
28. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Кузьмин А.В. К вопросу о выборе рабочей области характеристики центробежных насосов // Территория Нефтегаз. – 2015. – № 3. – С. 88–92.
29. Шубин С.С. Методическое и экспериментальное обеспечение определения технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2014. – 24 с.
30. Кузьмичев Н. КЭС-новый подход к повышению рентабельности добычи нефти // Бурение и нефть. – 2005. – № 6. – С. 16–17.
31. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, А.В. Деговцов, Ю.А. Донской, А.В. Булат, А.С. Зуев, С.Б. Якимов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 4. – С. 25–30.
32. Багуманова К.Р., Костоломов Е.М., Копырин В.А. Способ повышения энергоэффективности и надёжности электротехнического комплекса механизированной добычи нефти // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 10–13.
33. Сундетов М.Е. Определение эффективности периодической эксплуатации малодебитного фонда скважин на примере Шингинского месторождения // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Томск, 4–8 апреля 2016. – Т. 2. – С. 1096–1099.
34. Антипин М.Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО «Самотлорнефтегаз» // ПТНЖ «Инженерная практика». – 2011. – № 5. – С. 74–80.
35. Нефтегазовая отрасль обеспечивает 24 % валового регионального продукта области. Томск, 7 февраля 2023 г. URL: <https://tass.ru/ekonomika/16980393> (дата обращения 20.05.2023).
36. Лопатин Р.Р. Модели и алгоритмы частотно-регулируемого процесса расклинивания электроцентробежного насоса при добыче нефти в осложненных условиях: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2011. – 140 с.
37. Способ кратковременной эксплуатации скважины погружной насосной установкой с электроприводом (способ Кузьмичева): пат. Рос. Федерация № 2293176 C1; заявл. 02.09.2005; опубл. 10.02.2007. Бюл. № 4. – 23 с.
38. Сагдатуллин А.М. Система автоматизированного управления приводом добывающей скважины, эксплуатируемой скважинным погружным электроцентробежным насосом // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 222–228.
39. Способ повышения дебита скважины: пат. Рос. Федерация № 2332559 C2; заявл. 28.04.2006; опубл. 27.08.2008. Бюл. № 24. – 10 с.
40. Способ освоения скважины и/или вывода ее на оптимальный режим после ремонта: пат. Рос. Федерация № 2315860 C2; заявл. 28.02.2006; опубл. 27.01.2008. Бюл. № 3. – 6 с.
41. Надёжность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачёва, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 54–58.
42. Камалетдинов Р.С. Эксплуатация малодебитных скважин в текущих реалиях: вызовы и возможности. // Деловой журнал Neftegaz. ru. – 2022. – № 12. – С. 96–103.
43. Evaluation of CO2 low salinity water alternating gas for enhanced oil recovery / C. Dang, L. Nghiem, N. Nguyen, Z. Chen, Q. Nguyen // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 35. – P. 237–258. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.018> (дата обращения 20.05.2023).
44. Modeling and optimization of alkaline-surfactant-polymer flooding and hybrid enhanced oil recovery processes / C. Dang, L. Nghiem, N. Nguyen, C. Yang, Z. Chen, W. Bae // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 169. – P. 578–601. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.017> (дата обращения 20.05.2023).
45. AI based mechanistic modeling and probabilistic forecasting of hybrid low salinity chemical flooding / C. Dang, L. Nghiem, E. Fedutenko, S.T. Gorucu, C. Yang, A. Mirzabozorg, N. Nguyen, Z. Chen // Fuel. – 2020. – V. 261. – P. 116445. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116445> (дата обращения 20.05.2023).
46. Mittal A. Recent advances in using a silica Nano fluid for enhanced oil recovery // 3-rd International Conference on Smart and Sustainable Developments in Materials, Manufacturing and Energy Engineering, SME 2021. NMAM Institute of Technology, Nitte, Karnataka; India. – 2021. – V. 52. – P. 1260–1266. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.050> (дата обращения 20.05.2023).
47. Schneider M., Cesca K., De Amorim S.M. Synthesis and characterization of silica-based nanofluids for enhanced oil recovery //

- Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – V. 24. – P. 4143–4152. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.049> (дата обращения 20.05.2023).
48. Bera Achinta, Rakesh Kumar Vij, Subhash Shah. Impact of newly implemented enhanced oil and gas recovery screening policy on current oil production and future energy supply in India // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 207. – P. 109196. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109196> (дата обращения 20.05.2023).
49. Nasser Saddam Mohammed Mohammed, Achinta Bera, Vivek Ramalingam. Comparative studies on numerical sensitivity of different scenarios of enhanced oil recovery by water-alternating-gas (CO₂) injection. // Petroleum Research. – 2023. – P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2023.07.001> (дата обращения 20.05.2023).
50. Investigation of plugging performance and enhanced oil recovery of multi-scale polymer microspheres in low-permeability reservoirs / Wang Wendong, Xincheng Guo, Penghui Duan, Bo Kang, Da Zheng, Atif Zafar // Natural Gas Industry B. – 2023. – V. 10. – Iss. 3. – P. 223–232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2023.04.001> (дата обращения 20.05.2023).
51. Numerical investigation of CO₂-carbonated water-alternating-gas on enhanced oil recovery and geological carbon storage / Ji Min-soo, Seoyoon Kwon, Suin Choi, Min Kim, Byungin Choi, Baehyun Min // Journal of CO₂ Utilization. – 2023. – V. 74. – P. 102544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102544> (дата обращения 20.05.2023).
52. A viscosity study of charcoal-based nanofluids towards enhanced oil recovery / A. Ifeoluwa, T. Bridgewater, P.J. van Koningsbruggen, Q. Yuan // Journal of Molecular Liquids. – 2023. – V. 387. – P. 122615. URL: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122615> (дата обращения 20.05.2023).
53. Parhizgar Keradeh Mahsa, Seyyed Alireza Tabatabaei-Nezhad. Comprehensive analysis of the effect of reservoir key parameters on the efficacy of DTPA chelating agent in minimizing interfacial tension and enhanced oil recovery // Results in Engineering. – 2023. – V. 19. – P. 101316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101316> (дата обращения 20.05.2023).
54. Synthesis and characterization of silica-based nanofluids for enhanced oil recovery / M. Schneider, K. Cesca, S.M. de Amorim, D. Hotza, E. Rodríguez-Castellón, R.F.P.M. Moreira // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – V. 24. – P. 4143–4152. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.049> (дата обращения 20.05.2023).
55. Parhizgar Keradeh Mahsa, Seyyed Alireza Tabatabaei-Nezhad. Investigation of the effect of diethylene triamine pentaacetic acid chelating agent as an enhanced oil recovery fluid on wettability alteration of sandstone rocks // Petroleum Exploration and Development. – 2023. – V. 50. – Iss. 3. – P. 675–687. URL: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(23\)60419-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(23)60419-7) (дата обращения 20.05.2023).
56. Nowrouzi I., Mohammadi A.H., Abbas Khaksar Manshad. A natural polymer extracted from chia seeds for application in chemical enhanced oil recovery by Taper Polymer Concentration (TPC) and Alkali-Polymer (AP) slug injection into sandstone oil reservoirs // Fuel. – 2023. – V. 350. – P. 128738. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128738> (дата обращения 20.05.2023).
57. The mechanism of hydraulic fracturing assisted oil displacement to enhance oil recovery in low and medium permeability reservoirs / Yikun Liu, Fengjiao Wang, Yumei Wang, Binhui Li, Dong Zhang, Guang Yang, Jiqiang Zhi, Shuo Sun, Xu Wang, Qingjun Deng, He Xu // Petroleum Exploration and Development. – 2022. – V. 49. – Iss. 4. – P. 752–759. URL: <http://doi.org/10.11698/PED.20210815> (дата обращения 20.05.2023).
58. Experimental study on nanoparticles-assisted low-salinity water for enhanced oil recovery in asphaltenic oil reservoirs / Amraeiniya Ali, Shojaei Soroush, Mohseni Amir Ali, Mahani Behzad Haj Abbasi, Saatchi Sogand, Barahooie Bahari Arash, Mohammad Mousavi Sisakht Seyyed // Petroleum. – 2022. – V. 74. – № 6. – P. 102544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.10.002> (дата обращения 20.05.2023).
59. Optimization of Operational Strategies for Rich Gas Enhanced Oil Recovery Based on a Pilot Test in the Bakken Tight Oil Reservoir / Wan Xincheng, Lu Jin, N.A. Azzolina, Jin Zhao, Xue Yu, S.A. Smith, J.A. Sorensen // Petroleum Science. – 2023. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.04.018> (дата обращения 20.05.2023).
60. Experimental Study on Nanoparticles-Assisted Low-Salinity Water for Enhanced Oil Recovery in Asphaltenic Oil Reservoirs / Amraeiniya Ali, Soroush Shojaei, Amir Ali Mohseni, Behzad Haj Abbasi Mahani, Sogand Saatchi, Arash Barahooie Bahari, Seyyed Mohammad Mousavi Sisakht // Petroleum. – 2022. – P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.10.002> (дата обращения 20.05.2023).
61. Gas channeling control with an in-situ smart surfactant gel during water-alternating-CO₂ enhanced oil recovery / Luo Xin-Jie, Bing Wei, Ke Gao, Bo Jing, Bo Huang, Ping Guo, Hong-Yao Yin, Yu-Jun Feng, Xi Zhang // Petroleum Science. – 2023. – P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.03.003> (дата обращения 20.05.2023).
62. Application of thermotolerant petroleum microbes at reservoir conditions for enhanced oil recovery / E.E. Okoro, E.A. Efajemue, S.E. Sanni, O.A. Olabode, O.D. Orodu, O. Temiloluwa // Petroleum. – 2023. – V. 9. – Iss. 2. – P. 223–236. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.01.008> (дата обращения 20.05.2023).
63. Paternina Ch.A., Quintero H., Mercado R. Improving the interfacial performance and the adsorption inhibition of an extended-surfactant mixture for enhanced oil recovery using different hydrophobicity nanoparticles // Fuel. – 2023. – V. 350. – P. 128760. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128760> (дата обращения 20.05.2023).
64. Zeqiraj Dulian. Enhanced Oil Recovery (EOR) project scheduling with multiobjective of maximum net present value and minimum makesapn // Results in Engineering. – 2022. – V. 13. – P. 100339. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100339> (дата обращения 20.05.2023).

Поступила 12.06.2023 г.

Прошла рецензирование: 13.07.2023 г.

Информация об авторах

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.276.4:622.276.57:622.276.58

REVIEW AND CRITICAL ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND WAYS OF DEVELOPING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF OIL PRODUCTION BY AN ELECTRIC DRIVE IN INTERMITTENT MODES OF OPERATION OF LOW- AND MEDIUM-RATE WELLS

Sergey N. Kladiev,
kladiev@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. The Russian Federation is one of the world leaders among oil-producing countries in terms of proven oil reserves. Historically, industrial oil production in the Russian Empire began in the area of the Caspian Sea on the territory of modern Azerbaijan. The energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035, as one of the measures to ensure the energy security of the country, provides for the introduction into economic circulation of hard-to-recover oil reserves (including from the Bazhenov formation) based on innovative domestic technologies and equipment. The main problem of the oil industry in Russia, as well as throughout the world, is the decline in the quality of the resource base. In oil-producing regions, there is a depletion of active oil reserves. Significant residual reserves of developed fields are expected to be brought into active exploitation using new oil production technologies. Ways of growth in oil production are possible in accordance with three different scenarios: innovative – it is supposed to increase the contribution to the total indicators of Russian oil production from new provinces, such as Eastern Siberia, the Republic of Sakha (Yakutia), as well as new fields in Western Siberia and the Krasnoyarsk Territory and the development of the shelf northern seas; forced scenario – in case of more active introduction of new technologies and incentive measures that reduce the cost of the production process, it is possible to increase the efficiency of oil production in offshore and hard-to-recover fields; extensive scenario of oil production is possible only at high market prices for oil. The main volume of production is carried out and will continue to be exclusively electrically driven.

The purpose: a review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells.

Object: theoretical substantiation of the introduction of cyclic or short-term operation of electric centrifugal pump installations with an electric drive method of downhole oil production into practice.

Methods: geophysical research to develop a concept for the operation of a marginal well stock, ways to increase the profitability of oil production, methods for optimizing the stock of medium and marginal wells, putting them into economic circulation.

Results. Based on a critical analysis of literary sources and a feasibility study, it is shown that the most promising way to extract hard-to-recover oil reserves on the example of the Bazhenov formation is the electric drive of a submersible centrifugal pump according to the scheme «ground power converter – submersible cable – submersible electric motor – electric centrifugal pump». The technology of cyclic operation of wells in oil production shown that it is economically feasible for low- and medium-rate wells and is widely implemented in wells that cannot be operated in a continuous mode.

Key words:

energy strategy of Russia in the field of the fuel and energy complex, technological process of oil production, electric drive method of oil production, low- and medium-rate wells, flooded wells, stimulation of oil production, periodic operation of oil wells, cyclic operation of wells.

REFERENCES

- Onufrieva O.A. The energy strategy of Russia as the basis for the development of the fuel and energy complex. *Proceedings of the St. Petersburg University of Economics and Finance*, 2010, no. 6. pp. 134–137. In Rus.
- McKay J.P. Baku oil and Transcaucasian pipelines, 1883-1891: a study of the tsarist economic policy. *Slavyanskoe obozrenie*, 1984, vol. 43, no. 4, pp. 604–623. In Rus. https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=industrial+oil+production+and+oil+refining+in+Baku+1879&btnG=#d=gs_cit&t=1689740433290&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3A3DtXp80c1WQJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26hl%3Dru
- Lydolph P.E., Shabad T. The oil and gas industries in the USSR. *Annals of the Association of American Geographers*, 1960, vol. 50, no. 4, pp. 461–486. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-8306.1960.tb00361.x>
- Resnik I.N. Present-day status and main development trends in the oil industry in the USSR. *World Petroleum Congress. WPC*, 1963. pp. WPC-10704. URL: <https://onepetro.org/WPCONGRESS/proceedings-abstract/WPC06/All-WPC06/198834>
- Grama Yu. The analysis of Russian oil and gas reserves. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 82–91. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/361165> (accessed 17 May 2023).
- Putnev N.S. *Ehkonomicheskoe razvitie RF v 1990-e gody* [Economic development of the Russian Federation in the 1990s]. *Aktualnye problemy razvitiya finansovo-ekonomicheskikh sistem i institutov. III Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya* [Actual problems of development of financial and economic systems and institutions: III Intern. Scientific conference]. Samara, April 10–11, 2012. pp. 92–99. Available at: http://repo.ssau.ru/bitstream/Aktualnye-problemy-razvitiya-finansovoekonomicheskikh-sistem/Ekonomicheskoe-razvitie-RF-v-1990e-gody-102338/1/978-5-86465-540-5_2012-92-99.pdf (accessed 19 May 2023).
- Informatsionno pravovoy material «O merakh po povysheniyu nefteotdachi plastov na period do 2035 goda» v Komitet Soveta Federatsii Rossii po ekonomicheskoy politike* [Information and legal material «On measures to increase oil recovery for the period up to 2035» to the Committee of the Federation Council of Russia on Economic Policy]. Available at: <http://council.gov.ru/media/files/VGdL7GEAXLLocKmDf9tiKPD8fS0xuyQA.pdf> (accessed 19 May 2023).
- Prognoz dolgosrochnogo sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya RF na period do 2030 goda* [Forecast of the long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (accessed 12 May 2023).
- Kontorovich A.E., Filippov S.P., Alekseenko S.V., Bukhtiyarov V.I., Aldoshin S.M. Discussion on the priority: speech of academicians A.E. Kontorovich, S.P. Filippov, S.V. Alekseenko, V.I. Bukhtiyarov, S.M. Aldoshin. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 4, pp. 343–347. In Rus. DOI: 10.31857/S0869-5873894343-347

10. *Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 09.06.2020 № 1523-r «Energeticheskaya strategiya RF na period do 2035 goda»* [Decree of the Government of the Russian Federation of 09.06.2020 No. 1523-r «Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035»]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZrB7wx.pdf> (accessed 12 May 2023).
11. Lobusev A.V., Lobusev M.A., Vertievets V.A., Kulik L.S. Bazhenovskaya svita – dopolnitelny istochnik uglevodorodnogo syrya v Zapadnoy Sibiri [Bazhenov suite – an additional source of hydrocarbons in Western Siberia]. *Territory oil and gas*, 2011, no. 3, pp. 28–31.
12. Balushkina N.S., Kalmykov G.A., Kiryukhina T.A., Korobova N.I., Korost D.V., Soboleva E.V., Stupakova A.V., Fadeeva N.P., Khamidullin R.A., Shardanova T.A. Zakonomernosti stroeniya bazhenovskogo gorizonta i verkhov abalaskoy svity v svyazi s perspektivami dobychi nefli [Patterns of the structure of the Bazhenov horizon and the upper part of the Abalak suite in connection with the prospects for oil production]. *Geology of oil and gas*, 2013, no. 3, pp. 48–61. In Rus.
13. Strizhnev K.V., Litvin V.T. Vozmozhnost primeneniya tekhnologii intensifikatsii dobychi nefli dlya kollektorov bazhenovskoy svity [Possibility of application of oil production stimulation technology for reservoirs of the Bazhenov formation]. *Georesursy, geoenergetika, geopolitika*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 1–9.
14. Kontorovich A.E., Burshteyn L.M., Kazanenkova V.A., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Ponomareva E.V., Ryzhkova S.V., Yan P.A. Bazhenovskaya svita – glavny istochnik resursov netraditsionnoy nefli v Rossii [Bazhenov suite is the main source of unconventional oil resources in Russia]. *Georesources, geoenergy, geopolitics*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 2–10.
15. Nedolivko N.M., Perevertaylo T.G. Lithological and petrographic characterization of Bazhenov suite reservoir rocks in the southeast of the Western Siberian province (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 77–87. In Rus.
16. Belozherov V.B., Garcia A.S. Prospects of searching for oil reservoirs in the Devonian deposits of the southeastern part of the Western-Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 128–139. In Rus.
17. Belozherov V.B., Silkin G.E. Criteria for reassessment of oil and gas potential of reservoir zones in southeastern Western Siberia basement. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 7–16. In Rus.
18. Tikhonov S. Korolya igraet svita. Bazhenovskaya svita i podderzhanie obemov nefledobychi v Zapadnoy Sibiri [The retinue plays the king. Bazhenov formation and maintenance of oil production in Western Siberia]. *Oil and Gas Vertical*, 2019, no. 12, pp. 34–43.
19. Glukhmanchuk E.D., Krupitskiy V.V., Leontevskiy A.V. Bazhenov oil – «shale technologies» and domestic production experience. *Subsoil use XXI century*, 2015, no. 7, pp. 32–37. In Rus.
20. https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/nedropolzovanie_21_vek_vyp_7.pdf
21. Ryzhkova S.V., Burshteyn L.M., Ershov S.V., Kazanenkova V.A., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Nekhaev A.Yu., Nikitenko B.L., Fomin M.A., Shurygin B.N., Beizel A.L., Borisov E.V., Zolotova O.V., Kalinina L.M., Ponomareva E.V. Bazhenov horizon of Western Siberia: structure, correlation and thicknesses. *Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 7, pp. 1053–1074. In Rus. DOI: 10.15372/GiG20180709
22. Kontorovich A.E. For oil and gas you need to go to the Arctic. To the Bazhenov suite and small deposits. Moscow, *Oil and Gas Vertical*, 2019, vol. 458, no. 14, pp. 2–17. In Rus.
23. Yakimov S.B. Current state and promising directions for reducing heat losses in cable lines of high-power ESP in OAO NK Rosneft. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2016, no. 3, pp. 40–46. In Rus.
24. Glazyrin A.S., Langraf S.V., Isaev Y.N., Filipas A.A., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
25. Zhukov R. A., Verisokin A. E. Obzor sposobov ekspluatatsii malodebitnykh skvazhin [Overview of methods of exploitation of marginal wells]. *Aktualnye problemy neftegazovoy otrasli Severo-Kavkazskogo federalnogo okruga. Materialy VI ezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta. Universitetskaya nauka – regionu* [Actual problems of the oil and gas industry of the North Caucasian Federal District. Materials of the VI annual scientific and practical conferences of the North Caucasian Federal University]. Stavropol, 2018. pp. 169–173.
26. Gunkina T.A., Verzhbitskiy V.V., Chernova V.V., Suvorova L.A. Kriterii perevoda skvazhin s postoyannogo na periodicheskiy rezhim raboty [Criteria for transferring wells from constant to intermittent operation]. *Aktualnye problemy neftegazovoy otrasli Severo-Kavkazskogo federalnogo okruga. Materialy VI ezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta. Universitetskaya nauka – regionu* [Actual problems of the oil and gas industry of the North Caucasus Federal District. Materials of the VI annual scientific and practical conferences of the North Caucasian Federal University]. Stavropol, 2018. pp. 146–149.
27. Subarev D.N., Lapik N.V. Optimizatsiya podbora parametrov obustroystva skvazhiny s EHCN v oslozhnennykh usloviyakh ekspluatatsii [Optimization of the selection of parameters for the well construction with ESP in complicated operating conditions]. *Eurasian Union of Scientists*, 2015, vol. 14, no. 5-3, pp. 112–114.
28. Ivanovsky V.N., Sabirov A.A., Yakimov S.B., Klusov A.A. Accounting for operating conditions in the design of periodic operating modes of wells equipped with ESP. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2013, no. 6, pp. 33–39. In Rus.
29. Ivanovsky V.N., Sabirov A.A., Kuzmin A.V. On the issue of choosing the working area of the characteristics of centrifugal pumps. *Neftegaz Territory*, 2015, no. 3, pp. 88–92. In Rus.
30. Shubin S.S. Metodicheskoe i eksperimentalnoe obespechenie opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya ustanovok elektrocentrovezhnykh nasosov v protsesse ekspluatatsii. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Methodological and experimental support for determining the technical condition of installations of electric centrifugal pumps during operation. Cand. Diss. Abstract]. Ufa, 2014. 24 p.
31. Kuzmichev N.P. IES – a new approach to increasing the profitability of oil production. *Drilling and oil*, 2005, no. 6, pp. 16–17. In Rus.
32. Ivanovsky V.N., Sabirov A.A., Degovtsov A.V., Donskoy Yu.A., Bulat A.V., Zuev A.S., Yakimov S.B. Voprosy energoehfektivnosti ustanovok elektroprivodnykh tsentrozvezhnykh nasosov [Issues of energy efficiency of installations of electric centrifugal pumps]. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2016, no. 4, pp. 25–30.
33. Bagumanova K.R., Kostolomov E.M., Kopyrin V.A. Sposob povysheniya energoehfektivnosti i nadezhnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa mekhanizirovannoy dobychi nefli [A way to improve the energy efficiency and reliability of the electrical complex of mechanized oil production]. *Energy saving and innovative technologies*, 2015, pp. 10–13.
34. Sundetov M. E. Opredelenie effektivnosti periodicheskoy ekspluatatsii malodebitnogo fonda skvazhin na primere Shinginskogo mestorozhdeniya [Determining the effectiveness of periodic operation of a low-rate well stock on the example of the Shinginskoe field]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Problems of geology and subsoil development. Proceedings of the XX International Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists dedicated to the 120th anniversary of the founding of the Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, April 4–8, 2016. Vol. 2, pp. 1096–1099.
35. Antipin M.N. Rezultaty vnedreniya tsiklicheskoy ekspluatatsii UEHCN v OAO «Samotlorneftegaz» [The results of the introduction of cyclic operation of ESPs in OJSC Samotlorneftegaz]. *PTNZH Engineering Practice*, 2011, no. 5, pp. 74–80.
36. *Neftegazovaya otrasl obespechivaet 24 % valovogo regionalnogo produkta oblasti* [The oil and gas industry provides 24 % of the region's gross regional product]. Tomsk, February 7, 2023. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/16980393> (accessed 17 May 2023).
37. Lopatin R.R. *Modeli i algoritmy chastotno-reguliruemogo protsessa rasklinivaniya elektrotsentrozvezhnogo nasosa pri dobyche nefli v oslozhnennykh usloviyakh*. Dis. Kand. nauk [Models and algorithms of the frequency-controlled process of wedging of an electric submersible pump during oil production in complicated conditions. Cand. Diss.] Tomsk, 2011. 140 p. In Rus.
38. Kuzmichev N.P. *Sposob kratkovremennoy ekspluatatsii skvazhiny pogruzhnoy nasosnoy ustanovkoy s elektroprivodom (sposob Kuzmicheva)* [The method of short-term operation of a well by a submersible pumping unit with an electric drive (Kuzmichev's method)]. Patent RU, no. 2293176 C1, 2007.

39. Sagdatullin A.M. Sistema avtomatizirovannogo upravleniya privodom dobyvayushchey skvazhiny, ekspluatiruemoy skvazhinym pogruzhnym elektrocentrobeznyim nasosom [Automated control system for the drive of a production well operated by a downhole submersible electric centrifugal pump]. *Scientific notes of the Al-meteyevsk State Oil Institute*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 222–228.
40. Kuzmichev N.P. *Sposob povysheniya debita skvazhiny* [Method for increasing well production]. Patent RU 2332559 C2, 2008.
41. Kuzmichev N.P. *Sposob osvoeniya skvazhiny i/ili vyvoda ee na optimalnyy rezhim posle remonta* [Method for oil well development and/or bringing into optimal operational regime after well repair]. Patent RU, no. 2315860 C2, 2008.
42. Likhacheva E.A., Ostrovsky V.G., Lykova N.A., Musinsky A.N., Baidarov P.A. Reliability of submersible oil pumps during intermittent operation. *PRONEFT. Professional about oil*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 54–58 In Rus.
43. Kamaletdinov R.S. Ekspluatatsiya malodebitnykh skvazhin v tekushchikh realiyakh: vyzovy i vozmozhnosti [Operation of marginal wells in current realities: challenges and opportunities]. *Business magazine Neftegaz.Ru*, 2022, no. 12, pp. 96–103.
44. Dang C., Nghiem L., Nguyen N., Chen Z., Nguyen Q. Evaluation of CO₂ low salinity water alternating gas for enhanced oil recovery. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 35, pp. 237–258. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.018> (accessed 17 May 2023).
45. Dang C., Nghiem L., Nguyen N., Yang C., Chen Z., Bae W. Modeling and optimization of alkaline-surfactant-polymer flooding and hybrid enhanced oil recovery processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 169, pp. 578–601. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.017> (accessed 17 May 2023).
46. Dang C., Nghiem L., Fedutenko E., Gorucu S.T., Yang C., Mirzabozorg A., Nguyen N., Chen Z. AI based mechanistic modeling and probabilistic forecasting of hybrid low salinity chemical flooding. *Fuel*, 2020, vol. 261, pp. 116445. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116445> (accessed 17 May 2023).
47. Mittal A. Recent advances in using a silica Nano fluid for enhanced oil recovery. *3-rd International Conference on Smart and Sustainable Developments in Materials, Manufacturing and Energy Engineering, SME 2021*. NMAM Institute of Technology, Nitte, Karnataka; India, 2021. vol. 52, no. 3, pp. 1260–1266. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.050> (accessed 17 May 2023).
48. Schneider M., Cesca K., De Amorim S.M. Synthesis and characterization of silica-based Nanofluids for enhanced oil recovery. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 24, pp. 4143–4152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.049> (accessed 17 May 2023).
49. Bera Achinta, Rakesh Kumar Vij, Subhash Shah. Impact of newly implemented enhanced oil and gas recovery screening policy on current oil production and future energy supply in India. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 207, pp. 109196. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109196> (accessed 17 May 2023).
50. Nasser Saddam Mohammed Mohammed, Achinta Bera, Vivek Ramalingam. Comparative studies on numerical sensitivity of different scenarios of enhanced oil recovery by water-alternating-gas (CO₂) Injection. *Petroleum Research*, 2023, pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2023.07.001> (accessed 17 May 2023).
51. Wang Wendong, Xincheng Guo, Penghui Duan, Bo Kang, Da Zheng, Atif Zafar. Investigation of plugging performance and enhanced oil recovery of multi-scale polymer microspheres in low-permeability reservoirs. *Natural Gas Industry*, vol. 10, no. 3, pp. 223–232. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2023.04.001> (accessed 17 May 2023).
52. Ji Minsoo, Seoyoon Kwon, Suin Choi, Min Kim, Byungin Choi, Bae-hyun Min. Numerical investigation of CO₂-carbonated water-alternating-gas on enhanced oil recovery and geological carbon storage. *Journal of CO₂ Utilization*, 2023, vol. 74, no. 6, pp. 102544. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102544> (accessed 17 May 2023).
53. Ifeoluwa A., Bridgewater T., Van Koningsbruggen P.J., Yuan Q. A viscosity study of charcoal-based nanofluids towards enhanced oil recovery. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, vol. 387, pp. 122615. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122615> (accessed 17 May 2023).
54. Parhizgar Keradeh Mahsa, Seyyed Alireza Tabatabaei-Nezhad. Comprehensive analysis of the effect of reservoir key parameters on the efficacy of DTPA chelating agent in minimizing interfacial tension and enhanced oil recovery. *Results in Engineering*, 2023, vol. 19, pp. 101316. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101316> (accessed 17 May 2023).
55. Schneider M., Cesca K., De Amorim S.M., Hotza D., Rodríguez-Castellón E., Moreira R.F. P.M. Synthesis and characterization of silica-based nanofluids for enhanced oil recovery. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 24, pp. 4143–4152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.049> (accessed 17 May 2023).
56. Parhizgar Keradeh Mahsa, Seyyed Alireza Tabatabaei-Nezhad. Investigation of the effect of diethylene triamine pentaacetic acid chelating agent as an enhanced oil recovery fluid on wettability alteration of sandstone rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, vol. 50, no. 3, pp. 675–687. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(23\)60419-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(23)60419-7) (accessed 17 May 2023).
57. Nowrouzi I., Mohammadi A.H., Abbas Khaksar Manshad. A natural polymer extracted from chia seeds for application in chemical enhanced oil recovery by Taper Polymer Concentration (TPC) and Alkali-Polymer (AP) slug injection into sandstone oil reservoirs. *Fuel*, vol. 350, pp. 128738. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128738> (accessed 17 May 2023).
58. Yikun Liu, Fengjiao Wang, Yumei Wang, Binhui Li, Dong Zhang, Guang Yang, Jiqiang Zhi, Shuo Sun, Xu Wang, Qingjun Deng, He Xu. The mechanism of hydraulic fracturing assisted oil displacement to enhance oil recovery in low and medium permeability reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, vol. 49, no. 4, pp. 752–759. Available at: <http://doi.org/10.11698/PED.20210815> (accessed 17 May 2023).
59. Amraeiniya Ali, Shojaei Soroush, Mohseni Amir Ali, Mahani Behzad Haj Abbasi, Saatchi Sogand, Barahoeie Bahari Arash, Mohammad Mousavi Sisakht Seyyed. Experimental study on nanoparticles-assisted low-salinity water for enhanced oil recovery in asphaltic oil reservoirs. *Petroleum*, 2022, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.10.002> (accessed 17 May 2023).
60. Wan Xincheng, Lu Jin, Azzolina N.A., Jin Zhao, Xue Yu, Smith S.A., Sorensen J.A. Optimization of operational strategies for rich gas enhanced oil recovery based on a pilot test in the Bakken tight oil reservoir. *Petroleum Science*, 2023, pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.04.018> (accessed 17 May 2023).
61. Amraeiniya Ali, Soroush Shojaei, Amir Ali Mohseni, Behzad Haj Abbasi Mahani, Sogand Saatchi, Arash Barahoeie Bahari, Seyyed Mohammad Mousavi Sisakht. Experimental study on nanoparticles-assisted low-salinity water for enhanced oil recovery in asphaltic oil reservoirs. *Petroleum*, 2022, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.10.002> (accessed 17 May 2023).
62. Luo Xin-Jie, Bing Wei, Ke Gao, Bo Jing, Bo Huang, Ping Guo, Hong-Yao Yin, Yu-Jun Feng, Xi Zhang. Gas channeling control with an in-situ smart surfactant gel during water-alternating-CO₂ enhanced oil recovery. *Petroleum Science*, 2023, pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.03.003> (accessed 17 May 2023).
63. Okoro E.E., Efajemue E.A., Sanni S.E., Olabode O.A., Orodu O.D., Ojo T. Application of thermotolerant petroleum microbes at reservoir conditions for enhanced oil recovery. *Petroleum*, 2023, vol. 9, no. 2, pp. 223–236. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.01.008> (accessed 17 May 2023).
64. Paternina Ch. A., Quintero H., Mercado R. Improving the interfacial performance and the adsorption inhibition of an extended-surfactant mixture for enhanced oil recovery using different hydrophobicity nanoparticles. *Fuel*, vol. 350, pp. 128760. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128760> (accessed 17 May 2023).
65. Zeqiraj D. Enhanced Oil Recovery (EOR) project scheduling with multi-objective of maximum net present value and minimum makespan. *Results in Engineering*, 2022, vol. 13, pp. 100339. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100339> (accessed 17 May 2023).

Received: 12 June 2023.

Reviewed: 13 July 2023.

Information about the authors

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.08.2023. Дата выхода журнала: 30.08.2023.
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,99. Уч.-изд. л. 24,41.
Заказ 215-23. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.